



document non public

**les ressources en eau : conception,
évaluation, cartographie, comptabilité**

J. Margat

**mai 1993
R 37267**

Mots clés : ressources en eau, eaux superficielles, eaux souterraines, réserves, méthodes d'estimation, exploitabilité, cartographie, comptabilité physique, utilisation des eaux, indicateurs.

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

MARGAT J. (1993) - Les ressources en eau : conception, évaluation, cartographie, comptabilité.
Rapport BRGM R 37267, 141 p., 29 fig., 12 tabl.

© BRGM, 1993, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM

AVERTISSEMENT

Ce recueil rassemble, dans un but surtout didactique et dans une composition autant que possible cohérente, des analyses, des propositions et des orientations méthodologiques exposées en grande partie de manière éparse dans diverses publications antérieures, sur différents aspects sectoriels ou thématiques des **ressources en eau** : sur leur nature, les approches de leur estimation et de leur évaluation, les modes de présentation cartographique et comptable des informations, à une échelle essentiellement macroscopique.

Il s'adresse en priorité aux cadres des administrations techniques régionales, nationales ou internationales en charge de l'évaluation et de la gestion des ressources en eau, ainsi qu'aux professionnels des établissements d'études et de conseil qui les assistent.

La diffusion de cet essai, en l'état, vise en un premier temps à recueillir des observations critiques et des suggestions propres à permettre de réviser et améliorer sa forme et son contenu, en vue d'une édition ultérieure.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	11
CHAPITRE 1 : CONCEPTION DES RESSOURCES EN EAU - DÉFINITIONS ET RELATIONS	12
1. TYPLOGIE DES RESSOURCES EN EAU NATURELLES	13
1.1. Les ressources en eau naturelles renouvelables	13
1.1.1. Ressources pluviales.....	14
1.1.2. Ecoulement potentiel et écoulement final ("inflow"/"outflow")	15
1.1.3. Ressources en eau superficielle et en eau souterraine	16
1.1.4. Ressources régulières ou irrégulières.....	17
1.2. Les ressources en eau naturelles non renouvelables	18
2. CLASSIFICATION GEOPOLITIQUE : LES RESSOURCES EN EAU INTERIEURES ET EXTERIEURES.....	19
3. LES RESSOURCES EN EAU EXPLOITABLES.....	20
CHAPITRE 2 : CADRES TERRITORIAUX D'ÉVALUATION.....	23
1. CHAMPS PHYSIQUES	23
2. CAS PARTICULIER DES RESSOURCES EN EAU SUPERFICIELLE EN ZONES ARIDE ET SEMI-ARIDE.....	25
3. ESPACES SOCIO-ECONOMIQUES.....	26
CHAPITRE 3 : ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU - MÉTHODES.....	31
1. DES DONNEES AUX INFORMATIONS	31
2. ESTIMATION DES RESSOURCES PLUVIALES	34
3. ESTIMATION DES RESSOURCES RENOUEVELABLES NATURELLES	37

3.1. Références temporelles	37
3.2. Bases hydrologiques	40
3.3. Extensions spatio-temporelles des données.....	41
3.3.1. Extensions dans le temps	41
3.3.2. Extension dans l'espace.....	41
3.4. Estimation des "ressources en eau souterraine". Aspects spécifiques et cohérences nécessaires.....	51
4. ESTIMATION DES RESSOURCES NON RENOUELABLES : RÉSERVES DES AQUIFÈRES	59
5. ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU EXPLOITABLES.....	62
5.1. Approche structurale.....	62
5.2. Modélisations et gestion prévisionnelle : instruments d'évaluation.....	65
5.3. Ressources renouvelables exploitables en eau superficielle et en eau souterraine.....	70
5.4. Evaluation des ressources non renouvelables exploitables	71
5.5. Ressources en qualité.....	75
 CHAPITRE 4 : CARTOGRAPHIE	 80
1. LES INFORMATIONS CARTOGRAPHIABLES SUR LES RESSOURCES EN EAU	81
1.1. Description des structures	81
1.2. Variables régionales continues, applicables à tout ou partie d'un territoire	82
1.3. Variables régionales discontinues	82
1.4. Caractères se référant à des typologies ou classifications ordinales.....	83
1.5. Indicateurs caractéristiques de systèmes de ressource.....	83
2. CARTES STRUCTURALES	85
2.1. Cartographie des bassins et réseaux hydrographiques	85
2.2. Cartographie des systèmes aquifères.....	85
3. CARTOGRAPHIE DES RESSOURCES PLUVIALES	86
4. CARTOGRAPHIE DES APPORTS	90
4.1. Ecoulements potentiels locaux ou "précipitations efficaces"	90
4.2. Infiltrations et apports aux aquifères.....	92
4.3. Cartographie discrète des apports	94

5.	CARTOGRAPHIE DES ECOULEMENTS DE SURFACE.....	97
6.	CARTOGRAPHIE DE RESULTATS COMPTABLES OU D'INDICATEURS.....	102
CHAPITRE 5 : COMPTABILITÉ DES RESSOURCES ET DES UTILISATIONS D'EAU		104
1.	PRINCIPES ET REGLES GENERALES DE LA COMPTABILITE PHYSIQUE.....	104
2.	UNITES DE COMPTE SPATIO-TEMPORELLES PERTINENTES	105
2.1.	Champ de référence territorial.....	105
2.2.	Durée de référence.....	105
3.	STRUCTURES COMPTABLES APPROPRIEES, COMPTES DE FLUX OU COMPTES DE STOCK ? BUDGET ET BILAN	106
4.	COMPTABILITE DES RESSOURCES.....	108
4.1.	Choix du système et de la durée de référence.....	108
4.2.	Elaboration des données comptables	109
4.3.	Présentation comptable.....	109
4.4.	Problèmes particuliers	115
4.5.	Comptabilité des ressources non renouvelables	115
5.	COMPTABILITE DES UTILISATIONS - BESOINS ET DEMANDES EN EAU.....	116
5.1.	Sujets comptables	117
5.2.	Secteurs économiques d'utilisation	118
5.3.	Sources et élaboration des données comptables sur les utilisations d'eau	120
5.4.	Présentation comptable.....	122
6.	COMPTABILITE CONJOINTE DES RESSOURCES ET DES UTILISATIONS	125
CHAPITRE 6 : INDICATEURS.....		130
1.	INDICATEUR D'ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES RESSOURCES EN EAU	130

2. INDICATEURS CARACTERISTIQUES DE LA RESSOURCE EN EAU NATURELLE D'UN TERRITOIRE	131
3. INDICATEURS DE PRESSION HUMAINE SUR LES RESSOURCES EN EAU EN QUANTITE	133
4. INDICATEURS DE PRESSION HUMAINE SUR LES RESSOURCES EN EAU EN QUALITES.....	135
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	138

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 - Exemple de division d'un grand bassin fluvial en sous-bassins : bassin du "Mississippi".
- Fig. 2 - Exemple de bassin fluvial non conservateur étendu en partie en zone aride : le bassin du Nil.
- Fig. 3 - Exemples de mise en correspondance de bassins fluviaux et d'agrégats de divisions administratives.
- Fig. 4 - Exemple d'extension des évapotranspirations réelles annuelles calculées au moyen d'un modèle global.
- Fig. 5 - Variations de la pluviosité en quatre zones de l'Afrique de l'Ouest sub-saharienne, de 1901 à 1980.
- Fig. 6 - Le modèle global à réservoirs CREC.
- Fig. 7 - Le modèle global à réservoirs GARDENIA.
- Fig. 8 - Abaque de détermination des écoulements annuels fréquents en fonction des précipitations annuelles, pour des petits bassins en région sahélienne d'Afrique de l'Ouest.
- Fig. 9 - Exemples de reconstitution des apports d'eau annuels rechargeant les aquifères (= infiltration efficace) au moyen d'un modèle global de relations pluies-niveau (GARDENIA). Schéma du modèle GARDENIA (BRGM). Calages et extensions de résultats au Burkina-Faso.
- Fig. 10 - Exemple de régionalisation de l'alimentation des aquifères calculée d'après les recharges de nappe souterraine observées au Mali.
- Fig. 11 - Schéma de répartition des flux dans un système d'eau régional.
- Fig. 12 - Exemple de carte structurale d'un réservoir aquifère appliquée au calcul de réserve (puissances et emmagasinement). Aquifère du Continental intercalaire du Sahara septentrional.
- Fig. 13 - Eau : occurrences naturelles et ressources "techniquement" mobilisables (ressources en eau renouvelables seules).

- Fig. 14 - Exemple de structure d'un modèle de bassin : bassin de la Medjerdah, Tunisie.
- Fig. 15 - Réserves d'eau souterraine exploitables dans un bassin sédimentaire.
- Fig. 16 - Relation entre les prélèvements totaux d'eau souterraine et la durée de production possible. Exemple en Arabie Saoudite.
- Fig. 17 - Exemples de cartes d'exploitabilité des eaux souterraines.
- Fig. 18 - Exemple de carte de systèmes aquifères, Maroc.
- Fig. 19 - Carte de ressources pluviales de l'Afrique australe.
- Fig. 20 - Exemples de cartes de précipitations efficaces.
- Fig. 21 - Comparaison de deux cartes mondiales d'écoulement par unité de surface. Extraits : Nordeste du Brésil.
- Fig. 22 - Exemple de carte d'écoulement souterrain potentiel, Afrique de l'Ouest.
- Fig. 23 - Exemple de régionalisation des apports dans un grand bassin fluvial subdivisé : le bassin de l'Amazone.
- Fig. 24 - Carte de réseau hydrographique classé par débit moyen annuel : bassin du Niger.
- Fig. 25 - Carte de réseau hydrographique classé par débit d'étiage moyen : bassin de l'Ogooué.
- Fig. 26 - Exemples de cartes de réseau hydrographique classé et d'écoulement potentiel cohérentes, USA.
- Fig. 27 - Exemples de cartogrammes hydrologiques. Bassin du Nil, bassin du lac Titicaca.
- Fig. 28 - Carte des ressources en eau naturelles des pays d'Afrique rapportées aux populations. Etat actuel (1985) et prospective 2020.
- Fig. 29 - Evaluation et répartition des "quantités d'eau courante" par classe de qualité.

LISTE DES TABLEAUX

- Tabl. 3.1. - Données hydrologiques sur un territoire.
- Tabl. 3.2. - Exemple de résultats pour des bassins de 25 km² (précipitations moyennes de l'ordre de 500 mm/an).
- Tabl. 3.3. - Grille de qualité des eaux de la Commission des Communautés Européennes.
- Tabl. 5.1. - Compte de ressource en eau naturelle renouvelable.
- Tabl. 5.2. - Compte analytique de ressource en eau naturelle renouvelable.
- Tabl. 5.3. - Compte (bilan) de l'aquifère du Continental intercalaire du Sahara septentrional (Algérie et Tunisie, aire : 350 000 km²) en état naturel ancien (début du 19^{ème} siècle).
- Tabl. 5.4. - Compte d'utilisation.
- Tabl. 5.5. - Compte d'utilisation.
- Tabl. 5.6. - Compte de liaison ressource/utilisation. I. Répartition des prélèvements.
- Tabl. 5.7. - Compte de liaison ressource/utilisation. II. Répartition des retours d'eau (pertes, fuites, restitutions d'eau usée).
- Tabl. 5.8. - Compte conjoint de ressource et d'utilisations.
- Tabl. 5.9. - Compte du système aquifère exploité du Continental terminal du Sahara septentrional (Algérie, Tunisie).

LISTE DES ENCADRÉS

- Encadré 1 - Confusions à éviter. Ressources en eau et productibilités. Ressources et disponibilités en eau.
- Encadré 2 - Besoins d'information.
- Encadré 3 - Ressource exploitable et surexploitation.
- Encadré 4 - Qualités des eaux superficielles et des eaux souterraines.
- Encadré 5 - A propos d'échelles.
- Encadré 6 - Comment comptabiliser les ressources en eau suivant les qualités ?
- Encadré 7 - Prospective des utilisations.
- Encadré 8 - Indicateurs - Récapitulation.

INTRODUCTION

L'importance d'une évaluation pertinente des **ressources en eau**, l'une des bases essentielles des projets de développement, notamment du "développement durable", n'est plus à démontrer. Une approche assez universelle à ce sujet est particulièrement opportune au niveau des organisations internationales soucieuses de procéder à des synthèses et à des analyses comparatives cohérentes. Cela implique la nécessité d'une unité de concept, de langage et de méthode au sein de la communauté scientifique et technique. Tel est l'objet du présent essai qui traite successivement :

- des concepts,
- des cadres territoriaux de référence des évaluations,
- des méthodes d'évaluation,
- de la cartographie des informations sur les ressources,
- de la comptabilité des ressources et des utilisations,
- des indicateurs significatifs.

CHAPITRE 1 : CONCEPTION DES RESSOURCES EN EAU - DÉFINITIONS ET RELATIONS

Le concept de ressource en eau procède d'un regard utilitaire et non pas seulement "naturaliste" sur les eaux de la nature : c'est l'"offre en eau" de la nature à comparer aux demandes en eau humaines de toutes sortes et à évaluer suivant les critères des utilisateurs. Ce concept est donc par essence physico-économique.

Au plan physique, les ressources en eau sont structurées par la répartition spatio-temporelle des eaux dans la nature en "systèmes d'eau" ouverts et emboîtés, de tailles et de complexités très variées, dont l'ensemble forme l'hydrosphère globale. Définir les ressources en eau c'est donc analyser ces systèmes, décrire leur structure et leur dynamique, estimer les quantités d'eau en jeu (flux et stocks), leur énergie potentielle et leurs caractéristiques physico-chimiques et biotiques, facteurs de qualités (y compris celles de milieu aquatique), enfin comprendre leur comportement, apprécier leur sensibilité et connaître les conditions de leur exploitation et de leur conservation.

La notion de ressource en eau est donc multi-dimensionnelle - en correspondance avec les dimensions des demandes - et ne se réduit pas à la seule dimension quantitative de flux, même si celle-ci est souvent privilégiée et seule considérée, comme l'est symétriquement la dimension quantitative des "besoins" ou demandes en eau. L'accent mis dans cet essai sur les ressources en quantité ne devra cependant pas faire perdre de vue les autres dimensions, notamment qualitatives.

Le concept de ressource en eau est communément sujet à différentes dichotomies et qualifications qui se réfèrent soit aux structures et aux conditions du milieu naturel - notamment au fonctionnement et aux étapes du cycle de l'eau -, soit à des points de vue socio-économiques, soit parfois aux deux, telles que :

- ressources renouvelables/non renouvelables,
- ressources pluviales/ressources en eau stricto sensu,
- ressources en eau superficielle/en eau souterraine,
- ressources intérieures/extérieures,
- ressources naturelles/exploitable.

Dans un souci de clarification sémantique, on va s'efforcer ci-après de définir ces différents termes.

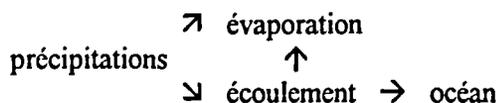
1. TYPOLOGIE DES RESSOURCES EN EAU NATURELLES

Par une pétition de principe révélatrice d'une optique anthropocentrique, toutes les eaux occurrentes dans la nature et plus particulièrement celles présentes et circulantes dans les terres émergées - eaux continentales ou "*inland waters*" - sont assimilées aux **ressources en eau naturelles** ou **physiques** (on pourrait aussi les dénommer "ressources sauvages" par homologie au "potentiel sauvage" des hydroélectriciens).

Les eaux en circulation, par le jeu du cycle de l'eau, ou contenues à un moment donné dans les différents réservoirs superficiels ou souterrains sont quantifiées respectivement en termes de flux et de stock auxquels on fait correspondre les **ressources en eau renouvelables** et **non renouvelables**.

1.1. LES RESSOURCES EN EAU NATURELLES RENOUVELABLES

Elles correspondent aux phases terrestres du cycle de l'eau, suivant l'enchaînement :



dont les flux peuvent être plus ou moins régularisés par les variations de stock des réservoirs (lacs et marais, humidité des sols, aquifères, glaciers, etc.), et dont les quantités rapportées à un système d'eau défini et à une durée donnée peuvent être mises en équation sous la forme budgétaire classique :

$$\text{Précipitations} = \text{Evaporation} + \text{Ecoulement total} \pm \Delta \text{ Réserve,}$$

ou en d'autres termes :

$$\text{Recettes (ou Apports)} = \text{Dépenses} \pm \Delta \text{ Stock.}$$

Les ressources en eau naturelles renouvelables sont donc estimées essentiellement sur des bases hydrologiques. Toutefois, en se référant à la composition du budget, ou "bilan" d'eau classique de l'hydrologie, la définition des ressources pose deux problèmes :

- les ressources sont-elles identifiables au seul terme écoulement total (superficiel et souterrain), présumé seul maîtrisable en tout ou partie, ou aussi à une partie utilisable des précipitations non génératrices d'écoulement, dénommée "ressources pluviales" (cf. 1.1.1), voire à la totalité des précipitations ?
- lorsque la somme des flux locaux engendrant l'écoulement (ruissellement et infiltration) n'est pas égale à l'écoulement total issu d'un système d'eau (bassin, etc.) du fait d'évaporation intercalaire, à quelle étape de la circulation des eaux faut-il référer la définition de la ressource (cf. 1.1.2) ?

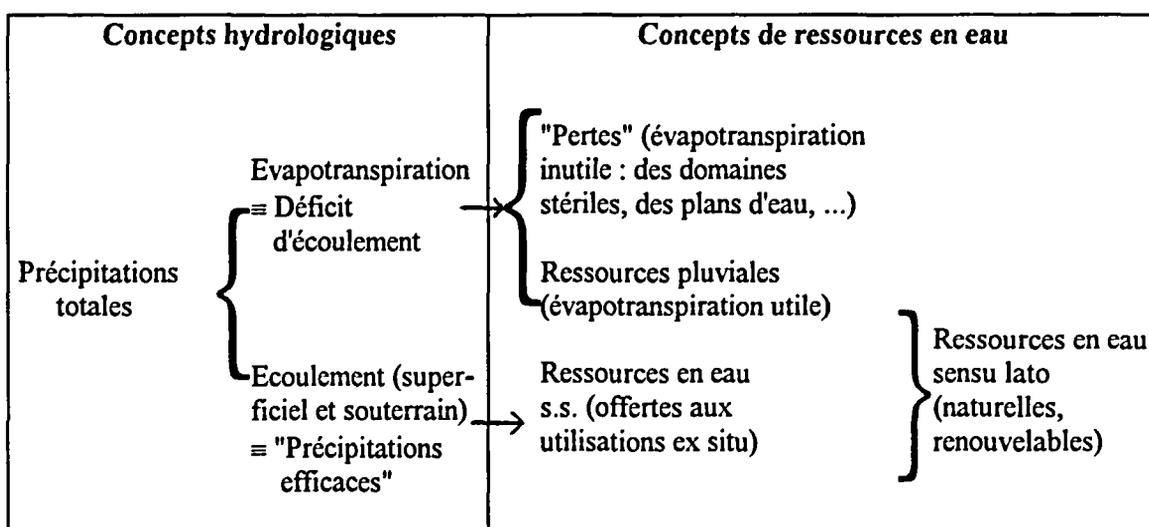
Enfin, les ressources en eau naturelles renouvelables assimilées à l'écoulement sont souvent subdivisées :

- suivant les milieux de résidence et de parcours de l'eau au cours de sa circulation terrestre, en **ressources en eau superficielle et en eau souterraine**, ce qui implique une analyse cohérente de la structure de l'écoulement dans l'espace et dans le temps (cf. 1.1.3) ;
- suivant la variation et la continuité des écoulements dans le temps, en **ressources régulières et irrégulières** (cf. 1.1.4).

1.1.1. Ressources pluviales

Les **ressources pluviales** sont la part des apports d'eau météoriques ou précipitations sur un territoire utile à la végétation cultivée, à l'agriculture dite "pluviale" ou "en sec" (par opposition à l'agriculture irriguée), élargie aux prairies, pâturages et forêts exploitées. Elles correspondent en pratique aux flux d'évapotranspiration réelle du complexe sol + végétation de ces domaines cultivés ou plantés. Elles sont ainsi additives à la part des précipitations génératrice d'écoulement, dites souvent "efficaces" ou "utiles" dans l'optique de l'aménageur ou de l'exploitant qui assimile les "ressources en eau" à ce seul écoulement et qualifie alors "pertes" le déficit d'écoulement

Bien que rarement prises en compte dans l'évaluation des ressources en eau, les "ressources pluviales", facteur essentiel des productions agricoles non irriguées et des productions pastorales, devraient être intégrées aux ressources en eau naturelles au sens large, comme le propose le schéma de correspondances suivant :



N.B : Ne pas confondre les **ressources pluviales**, dans le sens que l'on vient de définir, avec la possibilité offerte de capter directement l'eau de pluie par des impluviums, le drainage des toits, etc., suivi de stockage en citernes. La "ressource" est alors définie par les précipitations totales, mais rapportée à des surfaces négligeables au regard d'un territoire. Il s'agit en fait de prélèvements "à la source" de ruissellement avec un taux très élevé par rapport aux précipitations, donc soustraits localement à l'écoulement. Dans le même ordre d'idée, on peut évoquer la "ressource" offerte aux capteurs de brouillard

1.1.2. Ecoulement potentiel et écoulement final ("*inflow*"/"*outflow*")

Alors que les précipitations et l'évaporation sont des variables régionales continues, exprimables en flux par unité de surface, donc en hauteur locale par unité de temps (mm/an par exemple), il n'en est pas de même du troisième terme du budget hydrologique : l'écoulement, précisément celui auquel s'identifie la ressource en eau naturelle renouvelable. L'écoulement factuel observable et quantifiable se réfère nécessairement à un système d'eau "producteur" - bassin superficiel et/ou souterrain - d'une étendue définie, donc relatif à une échelle spatiale donnée. C'est seulement conceptuellement que l'écoulement peut être rapporté à la superficie du système considéré et exprimé en flux par unité de surface, comparable aux précipitations et à l'évaporation et assimilé souvent, dans une optique explicatrice, aux "**précipitations efficaces**", conçues comme la part des précipitations génératrice d'écoulement. Toutefois, suivant les conditions climatiques et morphologiques, les relations entre les apports d'eau locaux générateurs d'écoulement et l'écoulement global effectif d'un système d'eau plus ou moins étendu, ne sont pas les mêmes : les systèmes sont inégalement conservateurs d'écoulement.

- Dans des conditions de conservation parfaite, réalisées dans une partie des zones humides (régions montagneuses à réseau hydrographique sans déperdition, dépourvues de plans d'eau permanents ou temporaires notables), l'écoulement total final issu d'un système d'eau assez étendu (bassin, système aquifère), pendant une période assez longue, est bien la somme des apports élémentaires (ruissellement et infiltration) formés localement et collectés par le réseau hydrographique et par les aquifères. L'écoulement potentiel qui se déduit de l'intégration des "précipitations efficaces" calculées localement par des voies indépendantes - sur la base des précipitations observées et de l'évaporation réelle estimée - équivaut (aux approximations près des hypothèses et des méthodes) à l'écoulement total naturel.

La distinction des deux stades initiaux et finaux de la circulation des eaux dans un système conservateur offre ici surtout deux voies possibles et complémentaires d'estimation puis de représentation de l'écoulement et de la ressource en eau naturelle correspondante, notamment dans les cas où des extrapolations ou des désagrégations de données hydrologiques sont nécessaires pour évaluer l'écoulement rapporté à des étendues plus grandes ou plus petites que celles des bassins à écoulement connu (cf. chap. 3, 3.3.2).

- Beaucoup plus généralement, en zone climatique aride et semi-aride tout particulièrement mais aussi dans une grande partie des régions tempérées ou tropicales humides, la circulation des eaux subit des "pertes en ligne", des déperditions par évaporation ou évapotranspiration (directement ou après infiltration), notamment dans les vallées à végétation dense et à partir des marécages, qui contrarient la conservation des écoulements. De ce fait, l'écoulement final effectif peut être inférieur, parfois de beaucoup, à l'écoulement potentiel estimé par sommation des apports élémentaires locaux ou intégration des "précipitations efficaces". L'écart est amplifié par l'endoréisme, l'écoulement final pouvant alors être nul. Dans ces conditions, la ressource en eau naturelle renouvelable d'un domaine doit se référer à l'écoulement potentiel ou du moins à l'écoulement des parties "productives" du bassin, rapporté au site du cours d'eau collecteur où l'écoulement moyen est maximal (cf. chap. 3).

Ainsi, la correspondance quantitative entre la ressource en eau naturelle et les données hydrologiques n'est pas indépendante des conditions climatiques et de l'échelle des champs d'estimation dans une grande partie du monde.

En résumé :

- dans les systèmes conservateurs :
Ressource en eau naturelle = Apports = Ecoulement sortant
- dans les systèmes non conservateurs :
Ressource en eau naturelle = Apports > Ecoulement sortant.

1.1.3. Ressources en eau superficielle et en eau souterraine

Aux deux milieux porteurs bien différenciés des eaux terrestres, surface du sol et sous-sol, il est classique de faire correspondre la dichotomie **ressources en eau superficielle** et **ressources en eau souterraine**, objets le plus souvent d'estimations séparées sans toujours se préoccuper de l'additivité des quantités respectives.

Cette distinction traduit deux modes effectivement bien différents d'accession et d'exploitation de l'eau, deux ensembles de méthodes d'estimation des ressources et des productivités (affaires de deux catégories de professionnels) et même deux approches de gestion liées le plus souvent à des statuts juridiques de l'eau différents. A un instant donné il est relativement facile de distinguer des eaux momentanément superficielles et souterraines. Cela ne doit pas occulter la continuité des écoulements dans un système d'eau, y compris par des échanges dans les deux sens : les écoulements de surface sont formés en grande partie d'eau initialement souterraine, mais des eaux souterraines peuvent réciproquement provenir d'eau superficielle (en zone aride et en domaine karstique notamment).

Les ressources naturelles attachées aux deux formes de circulation sont donc fortement interdépendantes et en grande partie redondantes. Leurs conceptions respectives comme deux composantes distinctes et complémentaires des ressources en eau d'un territoire doivent alors être cohérentes et permettre l'additivité des estimations, en proscrivant les doubles-comptes.

Les concepts hydrologiques qui décrivent le fonctionnement des systèmes d'eau se rapportent respectivement aux entrées et aux sorties :

Apports (genèse de l'écoulement)	Ecoulements (flux sortants)			
Ruissellement	→	Ecoulement superficiel	} Ecoulement des cours d'eau de surface	Ecoulement total
Infiltration (alimentation des aquifères)	→	Ecoulement souterrain		
	→	Sous-écoulement		

Deux niveaux de correspondance possible des concepts de ressource (naturelle) respectifs en eau superficielle et en eau souterraine se présentent alors :

a) au niveau des apports :

{	ruissellement	→	ressource en eau superficielle
	infiltration	→	ressource en eau souterraine

b) au niveau de l'écoulement sortant ou final (aux issues d'un système d'eau) :

{	écoulement de surface	→	ressource en eau superficielle
	écoulement souterrain ("sous-écoulement")	→	ressource en eau souterraine

La "ressource en eau souterraine " sera maximisée dans le premier cas et minimisée dans le second, au contraire de la "ressource en eau superficielle". Une partition intermédiaire est concevable mais relativement arbitraire : elle peut se baser sur le choix de la part du débit de base des cours d'eau ("écoulement souterrain") à conserver, ce qui dépend de critères des utilisateurs et non plus de l'analyse du système naturel, donc procède plutôt d'une partition des "ressources exploitables" (cf. chap. 3).

En fait le concept de ressource devient ici inséparable de la référence à un mode de mobilisation préférentiel : par prise d'eau de surface ou par captage d'eau souterraine.

En tout cas, les assimilations encore trop souvent pratiquées séparément :

- ressource naturelle en eau souterraine = alimentation des aquifères (infiltration, cf. a.),
- ressource naturelle en eau superficielle = écoulement de surface final (cf. b.),

sont incohérentes et aboutissent à des doubles comptes. Il est préférable d'adopter les correspondances (a), quitte à réajuster la partition au stade de l'évaluation des ressources exploitables.

1.1.4. Ressources régulières ou irrégulières

La référence à la variabilité temporelle des écoulements, celles des écoulements superficiels tout particulièrement, aux fréquences d'occurrence des composantes de l'écoulement, amène à subdiviser conceptuellement la ressource en eau naturelle renouvelable, identifiée à l'écoulement moyen, en :

- **Ressource régulière ou permanente**, équivalente à la composante continue de l'écoulement superficiel et souterrain, qui correspond à une fréquence d'occurrence assez élevée à convenir : par exemple, 90 % du temps. En pratique, c'est l'écoulement superficiel d'étiage moyen des cours d'eau et l'écoulement des nappes souterraines, en grande partie en continuité, donc confondus (la composante assez stable ou "débit de base" des cours d'eau est d'ailleurs souvent dénommée "écoulement souterrain"). Elle inclut l'écoulement des nappes souterraines non collectées par les cours d'eau.

C'est la ressource offerte aux prises ou dérivations "au fil de l'eau", aux captages d'eau souterraine, à débit régulier ou variable ; le régime de prélèvement peut varier en fonction de la demande dans les seules limites du flux naturel (cours d'eau) ou des possibilités permises par le réservoir régulateur (aquifère).

- **Ressource irrégulière ou variable**, équivalente à la composante variable et discontinue des écoulements superficiels (crues notamment) et exceptionnellement souterrains (crues d'aquifères karstiques). C'est la ressource que les aménagements régulateurs (réservoirs d'accumulation) ont pour objet de maîtriser.

Ces deux composantes de la ressource naturelle sont additives, exprimées en flux moyen.

Cette distinction peut s'avérer plus pertinente pour l'évaluation des ressources exploitables que la dichotomie classique entre ressources en eau de surface ou en eau souterraine (cf. 1.1.3).

1.2. LES RESSOURCES EN EAU NATURELLES NON RENOUVELABLES

Elles correspondent non plus aux flux mais aux stocks d'eau de réservoirs naturels mobilisables en tant que tels. La possibilité de vider des lacs ou de faire fondre des glaciers étant exclue, seuls des réservoirs aquifères offrent de telles ressources, qui sont donc essentiellement souterraines.

Mais tous les réservoirs aquifères n'offrent pas des ressources non renouvelables. Dans la plupart des cas les réserves des aquifères, surtout de ceux à nappe libre, jouent seulement par leurs variations un rôle régulateur des ressources renouvelables, y compris des écoulements superficiels. C'est seulement lorsque le volume d'eau stocké, en état moyen, est considérable dans l'absolu et au regard du volume moyen annuel reçu et débité par un aquifère que celui-ci peut offrir des ressources non renouvelables, c'est-à-dire la possibilité d'extraire pendant une durée assez longue - de l'ordre de plusieurs décennies ou du siècle - des quantités d'eau annuelles très supérieures à celles des apports qui le renouvellent.

En pratique on peut considérer, par convention, qu'un aquifère peut offrir des ressources non renouvelables si sa réserve est d'au moins 100 fois - et a fortiori 1000 fois ou plus - supérieure au volume moyen annuel de son flux, autrement dit si son taux de renouvellement moyen annuel est égal ou inférieur à 0,01.

A la différence d'autres ressources naturelles non renouvelables (minérales, etc.), la ressource en eau (souterraine) non renouvelable est ainsi doublement relative :

- relative à la comparaison entre le volume et le flux d'un réservoir aquifère : le taux de renouvellement doit être négligeable ;
- relative à l'échelle humaine des projets d'utilisation de l'eau et de développement : la durée de la production d'eau possible doit être assez longue.

La ressource non renouvelable s'exprime alors par un volume d'eau, comparable à un gisement, que l'on peut convertir en flux moyen temporaire en le rapportant à une durée d'exploitation "minière" à choisir. Toutefois, toute la ressource non renouvelable définie physiquement par le stock d'eau en réserve n'est pas nécessairement exploitable (cf. chap. 3, 5.4).

La ressource non renouvelable qui a la dimension d'un volume (L^3) n'est pas additive à la ressource renouvelable qui a la dimension d'un flux ($L^3 T^{-1}$), ni à l'échelle d'un système aquifère défini (dont de toute façon le flux est négligeable en comparaison du stock), ni à l'échelle d'un territoire pouvant comporter les deux types de ressources, qui doivent alors être estimées séparément (cf. chap. 3).

En pratique, ce sont les réservoirs aquifères profonds des grands bassins sédimentaires, le plus souvent captifs - mais parfois libres, en zone aride - qui offrent le plus communément des ressources non renouvelables.

2. CLASSIFICATION GÉOPOLITIQUE : LES RESSOURCES EN EAU INTÉRIEURES OU EXTÉRIEURES

Il est rare qu'un territoire défini par des limites administratives ou politiques (province, pays) coïncide avec le champ physique d'un système d'eau ou d'un ensemble agrégable de systèmes entiers. Seuls des territoires insulaires non divisés peuvent être dans ce cas. Les intersections entre ces champs socio-politiques et les champs physiques auxquels se réfèrent la définition et l'évaluation des ressources en eau, conduisent à distinguer des ressources **intérieures** et **extérieures** par rapport à un territoire régional ou national.

- Les **ressources intérieures** (ou **internes**) sont formées par les écoulements naturels engendrés dans le territoire.
- Les **ressources extérieures** (ou **externes**) sont formées par les écoulements des cours d'eau ou des nappes souterraines transfrontières, issus de territoire(s) limitrophe(s), ou par la possibilité (et/ou le droit) de dériver l'eau de fleuve frontière. Il s'agit cette fois d'écoulements réels, à une époque donnée, car ils peuvent être plus ou moins influencés et réduits par les utilisations dans le territoire émetteur et sont par conséquent susceptibles d'évoluer.

Sauf cas de convention de partage de l'écoulement transféré, qui permettrait de le répartir entre les territoires émetteurs et receveurs, seules les ressources intérieures de chaque territoire sont additives (cf. chap. 5).

3. LES RESSOURCES EN EAU EXPLOITABLES

Concevoir que seules sont ressources les eaux utilisables d'un point de vue socio-économique se traduit par l'expression quelque peu pléonastique de ressources en eau exploitables, par opposition aux ressources naturelles, ce qui revient à donner son plein sens à la notion de ressource en eau, en excluant des ressources les eaux "inexploitables" (ou *unmanageable*). L'exploitabilité des eaux est liée d'abord à la faisabilité des opérations d'aménagement et de mobilisation, voire de traitement des eaux brutes, mais aussi à l'acceptabilité des impacts de l'exploitation sur le milieu naturel, notamment sur la reproduction des ressources renouvelables en quantité et en qualités et sur les biotopes aquatiques. Elle est donc relative à la fois aux moyens disponibles liés à un niveau de développement technique et économique, à l'acceptabilité des efforts à consentir pour mobiliser l'eau (jugée en fonction des objectifs d'utilisation) et à des points de vue socio-culturels dans une société donnée.

Du fait de la pluralité des usages de l'eau, de la variété des besoins en quantité et en qualités, comme des valorisations permises par son utilisation ou sa conservation, les critères d'exploitabilité, ou réciproquement d'"inexploitabilité", diffèrent suivant les secteurs économiques d'utilisation et même chaque utilisateur d'eau, y compris in situ, ainsi que les divers intérêts attachés à la préservation des eaux dans l'"environnement" (demandes sociales).

Du fait de la diversité des niveaux de développement et de capacités techniques, ainsi que des structures des demandes en eau et encore des objectifs de préservation, ces critères diffèrent aussi suivant les pays. En outre, ils peuvent évoluer en fonction des changements économiques et sociaux ou technologiques.

Le concept de ressource en eau exploitable perd ainsi en unicité ce qu'il gagne en pertinence. Il est mieux adapté à des analyses a posteriori de choix d'aménagements faisables projetés qu'à des évaluations a priori, indépendantes de scénarios de demandes. Aussi peut-il difficilement servir à des analyses comparatives régionales ou internationales qui impliqueraient un minimum de critères communs. Les évaluations quantitatives de ressources exploitables globales et uniques indiquées dans divers pays sont peu comparables et ne permettent pas des statistiques homogènes.

Néanmoins, jusqu'à un certain point, un "tronc commun" de critères techniques d'exploitabilité pourrait permettre une démarche d'évaluation commune (cf. chap. 3, 5.1).

Comme on l'a indiqué plus haut, c'est en se référant à des critères d'exploitabilité préférentielle que la distinction entre des ressources respectives et additives en eau superficielle et en eau souterraine prend davantage de sens : celui de parts de la ressource en eau totale - d'un territoire donné - qu'il est plus praticable et avantageux de mobiliser soit par prise et dérivation (y compris régularisation par barrage) d'eau en surface, soit par captage ou pompage de nappes souterraines. Ces exploitabilités respectives sont étroitement subordonnées d'une part à la disponibilité des sites de prise et notamment de barrages-réservoirs régulateurs (eaux superficielles), d'autre part aux productivités locales des ouvrages de captage possibles dépendant des transmissivités des aquifères (eaux souterraines) (cf. chap. 3, 5.3).

A l'échelle régionale, lorsqu'une partie des eaux souterraines prélevées et utilisées peut être retournée après usage à des cours d'eau, ou bien au contraire lorsqu'une partie des eaux de surface utilisées peut recharger des nappes souterraines (ce qui est fréquent dans le cas des périmètres irrigués), l'évaluation des ressources exploitables totales doit alors en tenir compte et pourra compter deux fois certains flux, en dépassant parfois les ressources naturelles (cf. chap. 3, 5.3) (cela pourra aussi s'exprimer par la prise en compte de "réutilisation" dans l'analyse du système d'eau utilisé et la comptabilité des ressources et des utilisations, cf. chap. 5).

Enfin, les ressources en eau non renouvelables peuvent elles-aussi faire l'objet d'évaluation d'exploitabilité, exprimée sous la forme de stock "extractible", à la manière d'un gisement minier, suivant des critères de faisabilité économique propres aux exploitants-utilisateurs (profondeur maximale de pompage acceptable suivant le coût de production induit, compte tenu parfois aussi d'incidences sur les qualités de l'eau ; contraintes d'occupation du sol, etc.) et suivant des contraintes extérieures (impacts éventuels sur des ressources renouvelables locales à conserver). Là encore ces évaluations sont sans unicité et peuvent être évolutives et à réviser périodiquement (chap. 3, 5.4).

ENCADRÉ 1

CONFUSIONS A ÉVITER :

• RESSOURCES EN EAU ET PRODUCTIBILITÉS :

Les **productibilités** sont les quantités d'eau mobilisables dans un état d'aménagement et d'équipement donné des ressources en eau naturelles d'un territoire : ouvrages de prise et de régularisation d'eau superficielle, de captage d'eau souterraine, supposés fonctionner au maximum de leurs capacités et continuellement.

Cette offre des appareils de production, en particulier des agents aménageurs et producteurs-distributeurs desservant des usagers, est interne à la sphère économique : elle ne doit donc pas être confondue avec l'offre de la nature, bien qu'elle soit souvent dénommée aussi "ressource" par bien des praticiens qui identifient les travaux d'aménagement et de production d'eau à des "accroissements", voire à des "créations de ressource". L'expression "ressource mobilisable" est parfois employée dans ce sens, mais parfois aussi dans celui de "ressource exploitable" si elle se réfère non plus aux équipements existants mais à ceux "possibles", aussi est-elle ambiguë et à déconseiller. La distinction entre ressources et productibilités en eau correspond exactement avec celle en usage en hydro-électricité qui oppose clairement le "potentiel sauvage" ou naturel et la "puissance productible" par les équipements installés.

• RESSOURCES ET DISPONIBILITÉS EN EAU :

Bien que ces deux termes soient souvent employés comme équivalents, il est préférable de spécialiser le second, non dans le sens d'offre mais plutôt en référence à la comparaison comptable offre/demande (en quantités) dans le sens de "solde disponible" dans un état donné d'exploitation et d'utilisation des ressources :

- soit ressources – prélèvements, à l'échelle locale d'un sous-système où une partie des quantités d'eau prélevée peut n'être pas restituée ;
- soit ressources – consommations nettes, à une échelle plus régionale (bassin, pays) où la totalité des circuits d'utilisation est comprise dans le champ du "bilan".

CHAPITRE 2 : CADRES TERRITORIAUX D'ÉVALUATION

Hors du cas particulier des ressources pluviales, définissables ponctuellement et intégrables pour toute aire donnée, les ressources en eau s'évaluent, en quantité, nécessairement en référence à des champs territoriaux définis.

1. CHAMPS PHYSIQUES

Les unités d'évaluation élémentaires pertinentes correspondent aux systèmes d'eau déterminés par les structures physiques : bassins fluviaux et systèmes d'aquifères généralement en interconnexion. Ces unités indépendantes correspondent à des champs territoriaux très différents non seulement par leurs étendues, mais aussi par leurs structures d'organisation des écoulements :

- les bassins fluviaux ont une structure hiérarchisée par le réseau hydrographique arborescent, qui permet de les décomposer en sous-bassins, avec plusieurs ordres d'emboîtement, et en bassins partiels relatifs à des sections ou "biefs" de cours d'eau définis ;
- les systèmes aquifères ont une structure non hiérarchisée et sont divisibles seulement en sous-bassins hydrogéologiques relatifs à la répartition des émergences aux limites, mais sans délimitations rigoureusement fixes, notamment sous l'effet des exploitations.

Ces systèmes peuvent être agrégés pour permettre des sommations des flux de ressource globalisés pour des territoires plus étendus (pays entiers, ensembles de pays, etc.).

Leur subdivision, à l'inverse, ne permet pas de définir des sous-systèmes de ressource indépendants, mais seulement de décrire la structure et la répartition des flux dans un système, donc leur cartographie (cf. chap. 4).

La subdivision des bassins fluviaux, notamment lorsqu'ils sont très étendus, en sous-bassins ou en bassins partiels intercalaires, permet de répartir les écoulements et leurs contributions à la ressource globale, mais elle doit être associée à la structure du réseau hydrographique qui les relie, schématisable par un "graphe" des liaisons (cf. chap. 4 et fig. 1).

Une discrétisation plus fine en "mailles" élémentaires permet seulement une régionalisation des apports (écoulement potentiel par unité de surface : ruissellement et/ou infiltration), mais non une répartition des ressources en cellules indépendantes, puisque ces mailles sont ouvertes et en continuité. A l'apport propre à l'espace d'une maille peuvent s'ajouter les écoulements (superficiels ou souterrains) de mailles limitrophes situées en amont. De même toute exploitation dans une maille influence nécessairement l'écoulement réel à l'aval (dans un bassin fluvial), ou transforme les écoulements souterrains alentours (dans un aquifère). Là encore, la discrétisation du système doit s'accompagner de la prise en compte des liaisons entre les mailles élémentaires.



Fig. 1 - Exemple de division d'un grand bassin fluvial en sous-bassins : subdivision du bassin du Mississippi (USA) en *Water Resources Regions* et *Subregions* avec indications des liaisons.

1. Limite de *Water Resources Region*
2. Limite de *Subregion*
3. Connexions (*Flow Patterns*).

(Extrait de "The Nation's Water Resources 1975-2000", vol. 3, US Water Resources Council, 1978).

Ces subdivisions ne valent donc pour l'estimation des ressources en eau locales que dans la mesure où celles-ci sont définies au niveau des apports - du moins lorsque ceux-ci sont bien des variables régionales continues, engendrés par les précipitations efficaces - et non au niveau des écoulements sortants (cf. chap. 1, 1.1.2).

La taille et la configuration des aires élémentaires de référence dépendent des structures d'écoulement :

- **Pour les eaux superficielles** : elles dépendent de la densité de drainage du réseau hydrographique qui détermine les bassins élémentaires à écoulement permanent ou temporaire significatif (cette densité est elle-même en partie déterminée par les conditions hydrogéologiques : elle est d'autant plus forte que la part souterraine de l'écoulement total est faible).

Des mailles géométriques régulières, indépendantes de la structure du réseau hydrographique, peuvent aussi être conçues. Mais elles servent à affiner la représentation des apports dans des modèles de bassin matriciels, applicables notamment à la synthèse de l'écoulement dans des sous-bassins ou à des extrapolations, et non à définir chacune séparément des ressources en eau superficielle locales.

- **Pour les eaux souterraines** : elles ne sont pas déterminées a priori car elles dépendent de la densité des ouvrages d'exploitation envisageables, liée elle-même à la fois aux productivités unitaires, donc aux transmissivités, et à la répartition des demandes (concentrée ou dispersée) ; elle se réfère en pratique aux "aires d'influence" des captages en régime d'équilibre dynamique moyen. Néanmoins, beaucoup d'aquifères à nappe libre peuvent être subdivisés par des lignes de partage des eaux souterraines assez stables, en bassins hydrogéologiques relativement indépendants propres à chaque ensemble d'émergences individualisé, sous réserve que des exploitations intensives ne transforment pas sensiblement les écoulements souterrains.

Cela ne s'applique pas, par contre, aux nappes captives profondes dont la ressource offerte doit se référer globalement à l'ensemble indivisible de chaque système aquifère considéré.

Ces considérations sur les références spatiales de l'estimation des ressources en eau naturelles auront à l'évidence des implications quant à leur représentation cartographique (chap. 4).

2. CAS PARTICULIER DES RESSOURCES EN EAU SUPERFICIELLE EN ZONES ARIDE ET SEMI-ARIDE

On sait qu'en zones aride et semi-aride, les écoulements des cours d'eau (y compris temporaires) n'augmentent pas tous d'amont en aval - comme en zones humides - mais que les parties aval de nombreux cours d'eau ont des débits décroissants sous l'effet de déperditions par évaporation, directement ou après infiltration (cf. chap. 1, 1.1.2).

Cela conduit à distinguer à l'intérieur des bassins fluviaux :

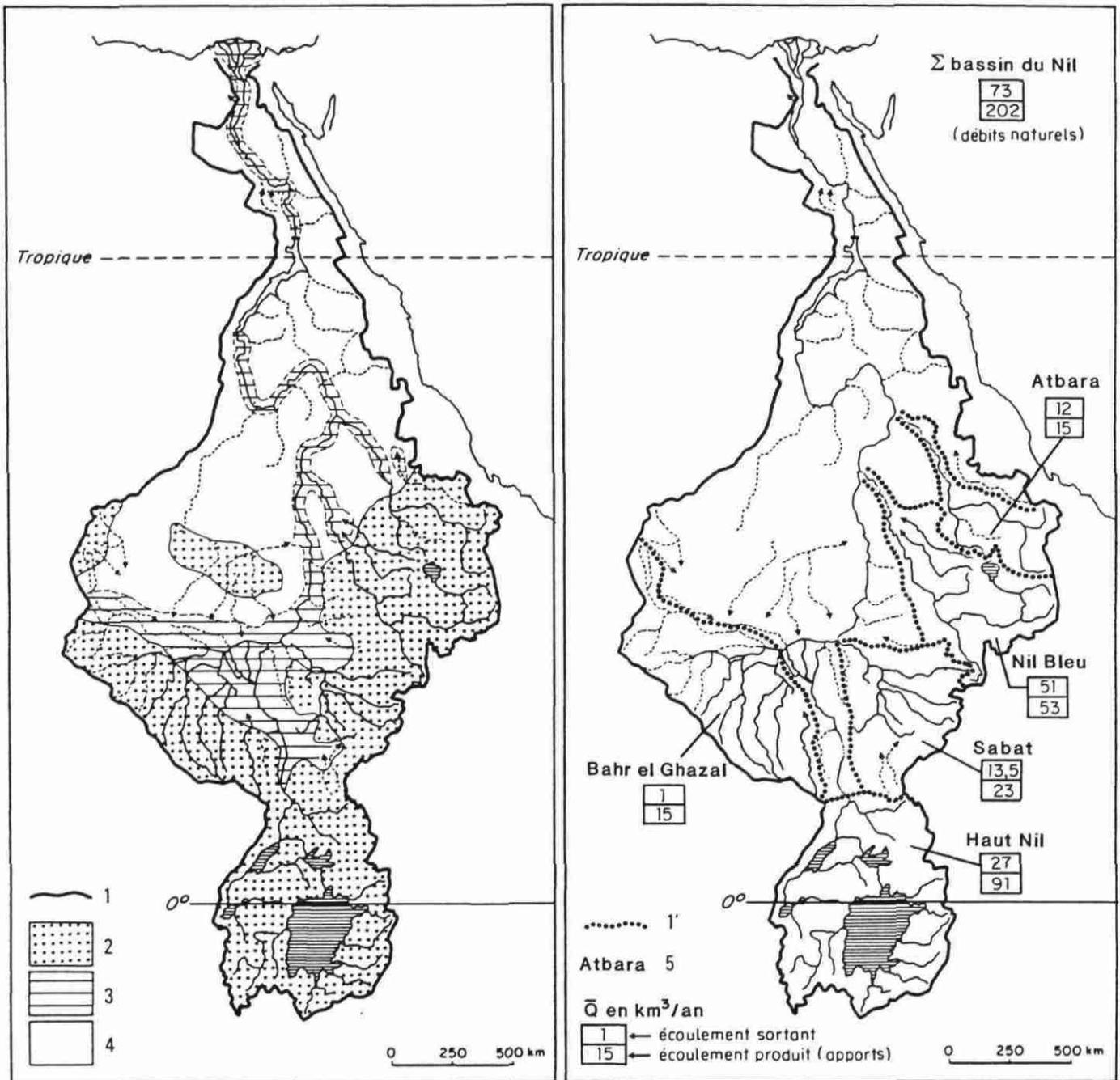
- des bassins partiels amont productifs d'écoulement, dominant les sites où les écoulements moyens sont maximaux (ils correspondent souvent à la limite aval des hauts bassins en domaine montagneux et/ou en zone plus humide, notamment dans le cas de bassins étendus sur plusieurs zones climatiques) ;
- des bassins partiels aval, "consommateurs" d'écoulement (des "anti-bassins" à écoulement négatif, en quelque sorte ...), où l'écoulement final sortant est inférieur à la somme des affluences reçues de l'amont et des apports locaux (faibles mais non nuls), sous l'effet des déperditions, donc où le cours d'eau principal a un débit décroissant d'amont en aval et pouvant être finalement nul en domaine endoréique ; il peut s'agir soit des parties aval de bassins fermés, soit de bassins intercalaires de bassins exoréiques composites, comportant des deltas intérieurs et des marais (exemples : Bahr-el-Ghazal dans le bassin du Nil (fig. 2), delta intérieur du Niger (fig. 24), Mésopotamie, etc.) ;
- en outre des domaines aréiques improductifs, où les rares apports locaux sont "consommés" sur place. Exemples : bassin du Nil (fig. 2), bassin de l'Euphrate et du Tigre, etc.

N.B. Dans les conditions d'aridité la dégradation du fonctionnement hydraulique morcelle l'unité apparente des bassins hydrographiques hérités de périodes plus humides. Beaucoup d'affluents théoriques ne rejoignent plus - ou exceptionnellement - le cours d'eau principal et correspondent à des sous-bassins indépendants en fait (endoréisme fonctionnel).

Dans ces conditions, l'estimation des ressources en eau superficielle doit se référer aux seuls bassins productifs. La subdivision en sous-bassins ou bassins partiels intercalaires évoquée plus haut est ici particulièrement appropriée et doit être adaptée à cette distinction, chaque sous-bassin pouvant être alors le cadre de bilan d'eau fractionné plus révélateur qu'un bilan global du bassin, qui ne met pas en lumière la répartition interne des "productions" et des pertes d'écoulement (fig. 2).

3. ESPACES SOCIO-ÉCONOMIQUES

Si les unités physiques définies par les systèmes d'eau sont les champs de référence les plus pertinents pour estimer les ressources en eau, les espaces socio-économiques, voire géopolitiques, sont mieux appropriés pour définir et prévoir les demandes en eau engendrées par les différentes activités humaines, pour la plupart fixées dans le territoire. De ces demandes dépendent au surplus les critères d'évaluation des ressources exploitables. Aussi, pour rendre comparables les estimations (en quantité) des demandes ou besoins en eau et celles des ressources, donc pour évaluer celles-ci suivant des critères pertinents, un compromis est-il à rechercher pour rapprocher autant que possible les champs territoriaux de référence respectifs.



Source : UNESCO 1979

Fig. 2 - Exemple de bassin fluvial non conservateur, étendu en partie en zone aride, comportant des aires de déperdition "consommatrices" et des cours d'eau à débit décroissant : le bassin du Nil.

à gauche : zones productrices et consommatrices d'écoulement

à droite : productions et écoulements sortants des principaux sous-bassins

1 : limite du bassin versant théorique

1' : limite de sous-bassin tributaire principal

2 : zone productrice d'écoulement

3 : zone consommatrice d'écoulement : évaporation réelle locale supérieure aux précipitations

4 : zone "arérique" en pratique, à écoulement potentiel local négligeable, à écoulement régional nul

5 : sous-bassin tributaire principal.

A une échelle très macroscopique, les ressources d'un pays entier, voire d'un ensemble "régional" de pays, peuvent être globalisées en agrégeant l'ensemble des bassins compris en totalité dans le territoire considéré, et s'il y a lieu les parties de bassins partagés pour lesquelles des estimations fractionnées sont possibles, tout en distinguant les éventuelles ressources extérieures (cf. chap. 1, 2). La construction similaire d'un agrégat d'unités de ressource peut permettre la correspondance avec une région économique ou administrative assez étendue.

A l'inverse, une autre démarche consiste à mieux se conformer à un champ de ressource physique (bassin ou groupe de bassins), en lui faisant correspondre un agrégat de circonscriptions administratives ou politiques définies à un niveau assez bas, facilitant la compatibilité des données statistiques et pouvant être le champ de compétence d'autorité de gestion ad hoc. Exemples : les *Water Resources Regions* des Etats-Unis (ensemble de "Counties" entiers) ou les Circonscriptions de bassin des Agences de l'eau en France (ensemble de cantons entiers), (fig. 3).

Par ailleurs, l'évaluation des ressources exploitables (cf. chap. 1, 3 et chap. 3, 5) pourrait se référer de préférence aux bassins "utiles" et aménageables, c'est-à-dire aux parties de bassin dominant les sites de prise et/ou de barrage-réservoir les plus en aval possible, ce qui peut exclure une partie du territoire. De même, des zones d'inaccessibilité peuvent rendre inexploitable une partie des ressources (renouvelables ou non renouvelables) d'aquifères (cf. chap. 3, 5.3 et 5.4).

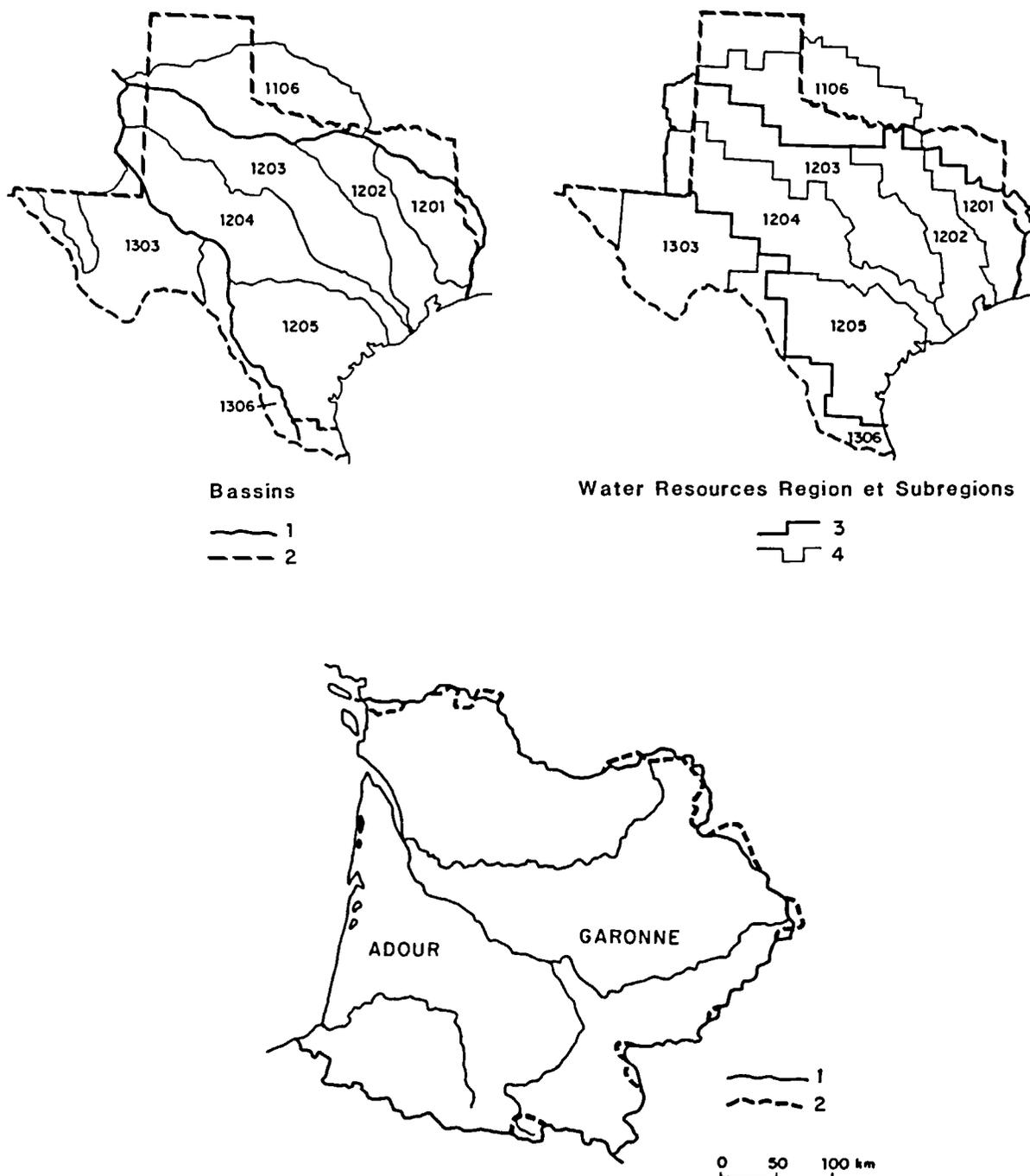


Fig. 3 - Exemples de mise en correspondance de bassins fluviaux et d'agrégats de divisions administratives.

a. Water Resources Region "Texas Gulf Region" aux USA :

1. Limite de bassin
2. Frontière d'état du Texas
3. Limite de Water Resource Region
4. Limite de subregion, agrégat de "counties"

b. Circonscription de bassin Adour-Garonne (Agence de l'eau) en France :

1. Limite d'ensemble de bassins
2. Limite d'agrégat de départements ou de cantons (lorsqu'elle ne coïncide pas avec la limite du bassin).

En conclusion :

Les bassins fluviaux sont les unités d'évaluation de ressource en eau les plus pertinentes, en les restreignant en zone aride et semi-aride, aux parties "productives". Accessoirement s'y ajoutent les systèmes aquifères profonds, relativement indépendants, des bassins sédimentaires.

La référence à des sous-bassins est possible et particulièrement appropriée au cas des bassins très étendus, à la condition que les ressources correspondantes soient bien additives et que cela n'occulte pas l'unité des bassins concrétisée par la continuité des réseaux hydrographiques. La structure de ces réseaux facilite plus ou moins la subdivision en sous-bassins relativement indépendants. Les sous-bassins qui affluent non loin de l'embouchure du collecteur principal (exemples : Euphrate, Tigre et Karun, Chari et Logone, ou Shire et Zambèze) ou qui, en zone aride, sont en pratique déconnectés du cours d'eau principal, se prêtent le mieux à des évaluations séparées et additives.

CHAPITRE 3 : ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU MÉTHODES

1. DES DONNÉES AUX INFORMATIONS

Evaluer les ressources en eau a pour objet de les décrire et de les quantifier dans des termes et suivant les dimensions qui permettent de les comparer aux besoins ou demandes d'utilisation, présents ou prévisibles, à des échelles et dans des cadres spatio-temporels appropriés (cf. chap. 2). De même que les ressources en eau sont une offre à la rencontre de demandes, leur évaluation est une offre d'informations utiles, interprétant, sélectionnant et adaptant des connaissances, à la rencontre de demandes d'éléments d'appréciation et de décision. L'évaluation des ressources est donc à la fois déterminée par l'amont - par l'état des connaissances sur lesquelles elle se base - et commandée par l'aval, par les questions auxquelles elle a pour finalité de répondre. Réciproquement l'utilité escomptée des informations voulues motive les efforts d'acquisition de données et l'ajustement des moyens à cette fin.

Il est nécessaire de distinguer clairement données et informations. On entend ici par :

- **Données** : 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 critique) de données", leur conservation peut-être pratiquée par des procédés traditionnels (fichiers manuels, publications) et/ou informatiques (banques de données). Les données résultent de l'application des techniques de connaissance au milieu naturel.
- **Informations** : les expressions quantitatives ou qualitatives élaborées à partir des données et adaptées aux demandes, c'est-à-dire utilisables comme élément de décision.
Exemple :
 - chronique de hauteurs observées dans un cours d'eau : donnée primaire,
 - chronique des débits moyens mensuels d'un cours d'eau : donnée élaborée par un traitement systématique,
 - "cru de projet" calculée à partir des données : information.

Le concept de données utiles découle directement de la confrontation entre demandes et offres d'informations : ce sont les données nécessaires, mais non obligatoirement suffisantes, pour élaborer les informations demandées (dans les formes, suivant les précisions requises, et cela, au moment voulu).

En somme un "système de relations entre offres et nécessités d'informations sur l'eau", théâtre des actions d'acquisition de données puis d'élaboration et de gestion des informations, se superpose et se relie au système physico-économique de relations entre ressources et utilisation d'eau.

Comprendre et différencier les besoins d'informations utiles est donc un préalable à toute démarche d'évaluation des ressources. Sans développer ici une analyse détaillée de ces besoins, rappelons seulement qu'ils procèdent de trois stades ou niveaux principaux d'intervention et de décision, en matière d'aménagement et d'utilisation des eaux :

- la **planification** : choix stratégiques et élaboration des schémas directeurs ;
- la **conception des projets** : choix tactiques ;
- la **gestion** : choix opérationnels, adaptation aux conjonctures.

A chaque niveau correspondent des besoins d'information spécifiques (encadré 2).

Dans ce contexte, l'"évaluation de la ressource en eau" est souvent restreinte à l'élaboration des informations utiles au niveau de la planification, donc assez globales et relatives surtout aux quantités(*) (flux et stock) et aux occurrences naturelles. Cette approche est pourtant réductrice, elle tend à négliger le caractère multidimensionnel de la ressource en eau et sa relativité aux critères d'exploitabilité.

Néanmoins, l'évaluation des ressources naturelles demeure une première étape nécessaire.

A ce sujet, il ne s'agit pas d'exposer ici, même en abrégé, les techniques et les méthodes d'acquisition de données - observation, mesures, analyses, etc. - appliquées en hydroclimatologie, hydrologie, hydrogéologie, etc., qui forment la matière de maints traités et manuels et qui sont largement connues et pratiquées par les professionnels ad hoc. On s'attachera seulement ci-après à l'exploitation de ces données, notamment les données hydrologiques au sens large, pour les transformer en informations sur les ressources suivant les définitions présentées au chapitre 1.

(*) Combien de fois ne voit-on pas distinguer les "problèmes de ressource" et les "problèmes de qualité"

ENCADRÉ 2 : BESOINS D'INFORMATION

Niveaux d'aménagement	Décisions à prendre	Informations nécessaires
PLANIFICATION	<ul style="list-style-type: none"> • Choix des aménagements (équipements) appropriés à la maîtrise des eaux pour les utiliser ou pour prévenir des calamités (transports, accumulation, traitements et épuration) : ordres d'urgence. • Choix d'allocation des ressources pour satisfaire les demandes : arbitrages, priorités. • Arbitrages d'aménagement du territoire (réservations, etc.). • Institutions de règlements, de juridictions (droit des eaux) : opportunité, champ d'application. 	<ul style="list-style-type: none"> • Définition et description des systèmes de ressource, quantification, et localisation des potentialités et des risques par rapport aux demandes (d'eau, de protection contre l'eau). • Estimation des risques de défaillance et/ou de calamité. • Inventaire des sites d'aménagement possibles. • Prévision des effets des aménagements : <ul style="list-style-type: none"> - efficacité (vis-à-vis de l'objectif à atteindre) - rétroactions - incidences sur le milieu (impacts). • Indices d'exploitation et de consommation des ressources naturelles (de système défini), actuels et projetés suivant les prévisions de demande.
CONCEPTION DES PROJETS	<ul style="list-style-type: none"> • Choix de(s) type(s) d'équipement. • Choix de localisation. • Choix de dimensionnement. • Choix de régime d'exploitation prévisionnel (consignes). • Choix des servitudes à prescrire (pour garantir la sécurité d'exploitation, la protection de l'eau, etc.). 	<ul style="list-style-type: none"> • Caractéristiques des sites. • Caractéristiques du régime des eaux (variabilité en quantité et qualité) aux sites d'aménagement ou d'exploitation. • Sensibilité des sites (identification des effets externes du projet, expression des contraintes pouvant constituer des facteurs limitant).
GESTION	<ul style="list-style-type: none"> • Décisions ou directives opérationnelles : <ul style="list-style-type: none"> - directes (techniques) ou - indirectes : <ul style="list-style-type: none"> • autorisations, dérogations, etc. (police des eaux) • incitations économiques (aides, tarifications). • Actions : <ul style="list-style-type: none"> - sur les flux (prises, rejets) - sur les relations flux/stock (accumulation, déstockage, lachures) - sur les qualités (traitements, épurations, mélanges). • Avertissement aux utilisateurs (annonces de crue, de pollution accidentelle, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Connaissance en temps réel et prévision : <ul style="list-style-type: none"> - des situations des flux et des stocks (naturels et/ou artificiels) - des situations des qualités (naturelles ou modifiées), dans les milieux exploités (par prises ou par rejets). • Description des effets (immédiats et/ou différés) de décisions à prendre (actions techniques, mesures), donc prévision de ces effets dans différentes conjonctures.

(d'après J. MARGAT et M. ROCHE, CEFIGRE, 1978)

2. ESTIMATION DES RESSOURCES PLUVIALES

La ressource pluviale présente un double avantage qui simplifie son évaluation :

- elle n'est pas sujette à aménagement, aussi la distinction entre ressource naturelle et ressource exploitable est sans objet ;
- elle est définissable par une variable régionale continue, donc sans se rapporter à des cadres spatiaux imposés.

Etant conceptuellement identifiable à l'évapotranspiration réelle (ETR) (cf. chap. 1), la ressource pluviale est indissociable de la fonction de rétention d'eau des sols, facteur essentiel du déficit d'écoulement. Son estimation procède d'abord de deux approches complémentaires :

- **Première approche, en trois étapes :**

1. Calcul de valeurs d'ETR locale à partir de données climatologiques de station, par application de "formules" empiriques, statistiques ou analytiques connues, comme celles de THORNTHWAITE (1948), PENMAN (1956) ou TURC mensuelle (1961), ou encore de la méthode complexe de BUDYKO (1956), ou bien au moyen de modèles globaux à réservoirs dont les paramètres, notamment la capacité de rétention et le coefficient d'emmagasinement du sol, sont calés soit sur un ruissellement local mesuré, soit sur une variation de niveau de nappe souterraine observée et convertie en flux de recharge (on reviendra plus loin sur ces modèles globaux à propos des extensions de données sur les écoulements, infra 3.3). Ces calculs sont à opérer de préférence par pas de temps assez courts, journalier à décadaire, d'autant plus courts sous climat semi-aride ou aride. L'évapotranspiration réelle dépendant de la réserve d'eau du sol, irrégulièrement reconstituée par les eaux pluviales infiltrées, et de l'évapotranspiration potentielle, elle est plus continue et moins irrégulière que les précipitations, à tous pas de temps. Aussi, ne peut-elle en aucun cas être calculée par l'application d'un coefficient linéaire aux hauteurs de pluie. En règle générale, à l'échelle annuelle, l'ETR est naturellement plafonnée par les précipitations.
2. Extension de ces données en chroniques pluriannuelles plus longues, au moyen de ces modèles, en se basant sur des chroniques pluviométriques et de hauteurs d'évapotranspiration potentielle calculées (exemple, au Burkina-Faso, fig. 4). Là encore on constate que les ETR annuelles sont moins variables que les précipitations annuelles et non proportionnelles à celles-ci.
3. Enfin, interpolation des valeurs moyennes ou médianes d'ETR annuelle, exprimée par une carte dont l'intégration permet de calculer un flux global pour un territoire défini, exprimable éventuellement par une hauteur moyenne surfacique (en mm/an) comparable à un indice pluviométrique.

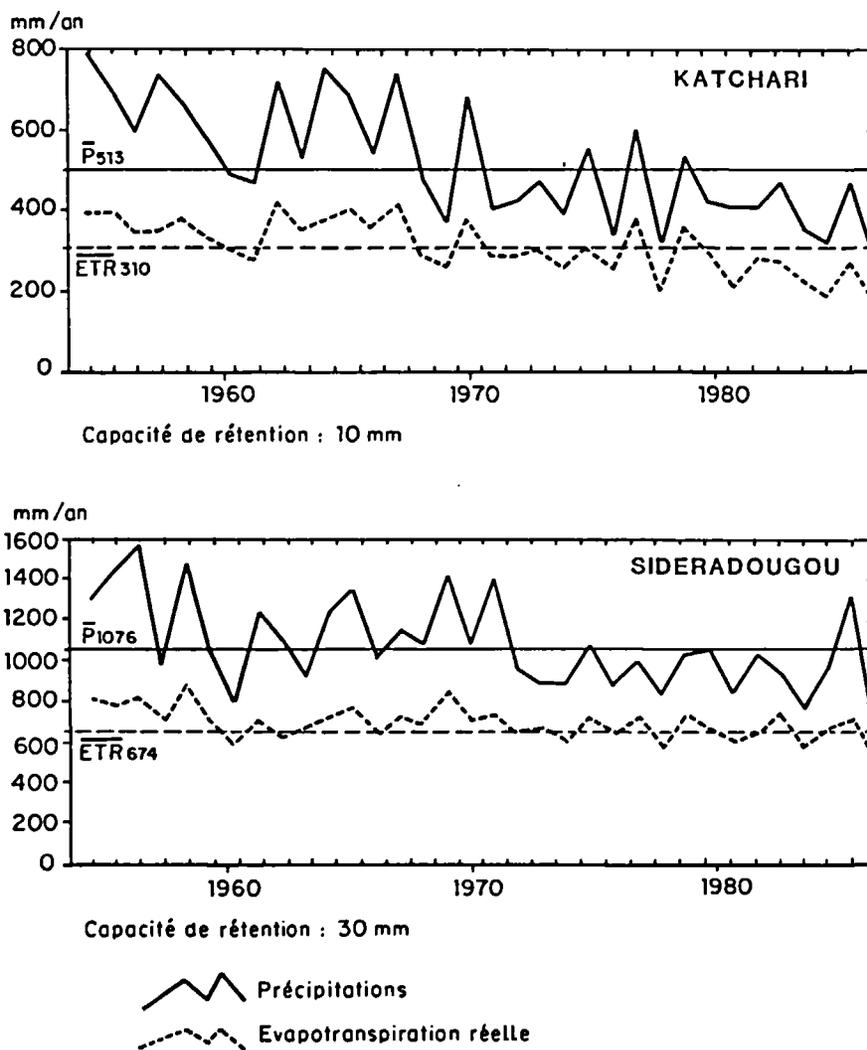


Fig. 4 - Exemple d'extension des évapotranspirations réelles annuelles calculées au moyen du modèle global GARDENIA (BRGM) (cf. fig. 7), en deux stations du Burkina-Faso : Katchari au Nord, Sideradougou au Sud, période 1954-1986, source : BRGM-AQUATER 1986.

A noter que la tendance récessive restreint la signification de moyennes annuelles, malgré la durée de la période (33 années)

De telles cartes d'évaporation réelle moyenne annuelle ont été dressées à petite échelle en divers pays et pour le monde entier :

- dans l'"Atlas of World Water Balance" (USSR Com. IHD, 1974 et UNESCO, 1977) sur la base de la méthode complexe de BUDYKO ;
- dans "The World Water Balance" de BAUMGARTNER et REICHEL (Elsevier, 1975), par application de la formule de THORNTHWAITE. Exemple : fig. 19, chap. 4).

– **Seconde approche :**

Ajustement sur une régionalisation de déficit d'écoulement déduit de "bilan hydrologique" de bassin (complet, c'est-à-dire prenant en compte un éventuel "sous-écoulement"), mais dont la validité est fonction de l'estimation des indices pluviométriques globaux du bassin.

La première approche est basée sur une meilleure connaissance locale des précipitations et des facteurs de l'évapotranspiration potentielle, mais elle est calée sur des variables mal identifiables, tandis que la seconde permet seule un calage sur l'écoulement mesuré, mais reste globale.

La cartographie joue donc un rôle primordial pour jumeler les deux approches en conjuguant l'interpolation de données ponctuelles et la régionalisation de données globales (cf. chap. 4, 3).

Une approche nouvelle et prometteuse, directement régionalisée, basée sur des données thermiques satellitaires interprétées au moyen d'un modèle hydrologique, fournit des hauteurs annuelles cumulées d'ETR cartographiées suivant un maillage assez fin. Elle a été appliquée par exemple sur l'ensemble de la France à petite échelle par l'INRA, sur la base des données thermiques du satellite NOAA, au moyen d'un modèle couplé "bilan d'énergie - bilan hydrique" (MAGRET) et en s'appuyant sur des cartes de variables climatiques interpolées par krigeage (COURAULT *et al.*, ORSTOM, 1992).

En règle générale, les sols régularisent suffisamment l'ETR par rapport aux précipitations, pour que l'estimation annuelle de la ressource pluviale soit significative. Par contre la capacité régulatrice interannuelle des sols est quasi-nulle, donc rend peu significatif le calcul de hauteur moyenne pluriannuelle d'ETR, à laquelle il convient de préférer des estimations fréquentielles : médiane ou plutôt des hauteurs annuelles "garanties" 4 années sur 5 ou 9 années sur 10.

Dans le cas de sols à faible capacité de rétention, il conviendrait d'en tenir compte dans le calcul de l'ETR (en réduisant la capacité du "réservoir" du modèle), voire en soustrayant de la somme annuelle les valeurs d'ETR mensuelles non utilisables

Une classification des sols suivant leurs capacités de rétention pourrait alors être utile. Toutefois, ce raffinement paraît plus adapté à des études locales qu'à l'estimation des ressources pluviales à l'échelle régionale.

La carte d'ETR ajustée (ou construite à partir de données satellitaires) obtenue doit ensuite être relativisée aux surfaces des terres arables ou à végétation utile (pâturages, forêt exploitée, etc.).

C'est ici que les "systèmes d'information géographique" (SIG), traduisant l'analyse d'occupation du sol obtenue par traitement d'image de télédétection, peuvent apporter une contribution efficace, en permettant de sélectionner les surfaces auxquelles les hauteurs d'ETR sont à rapporter.

L'expression des ressources pluviales peut alors être soit ponctuelle (en mm/an ou en m³/an.hectare) et cartographiée comme une variable régionale (cf. chap. 5), soit globalisée par intégration de la carte établie pour un territoire délimité (en hm³ ou km³/an).

Enfin, l'évaluation proprement dite de la ressource pluviale résultera de sa comparaison avec les besoins en eau des cultures "pluviales". C'est le déficit de cette ressource par rapport aux besoins qui détermine les besoins en eau d'irrigation de cultures définies, notamment la distribution fréquentielle de ces besoins.

3. ESTIMATION DES RESSOURCES RENOUVELABLES NATURELLES

Conformément à la définition des ressources en eau renouvelables naturelles (chap. 1), leur estimation consiste à décrire et essentiellement à quantifier les écoulements superficiels et souterrains "produits" ou affluants dans un territoire défini (cf. chap. 2), en termes de flux et de stocks régulateurs. Il s'agit à la fois de les chiffrer globalement et de décrire leur répartition dans ce territoire, dans le ou les "systèmes d'eau" qui le composent, notamment pour permettre d'estimer des écoulements locaux rapportés à des sites particuliers. Ce second objet se relie à la cartographie traitée au chapitre suivant (4), aussi s'attachera-t-on ici plus particulièrement aux estimations globales. Celles-ci procèdent d'une synthèse et d'une extension de données hydrologiques et hydrogéologiques ajustées à un cadre spatio-temporel pertinent.

3.1. RÉFÉRENCES TEMPORELLES

L'expression de flux moyens annuels, la plus couramment pratiquée (qu'il s'agisse d'écoulement global synthétisé sur un territoire ou d'écoulement local), implique que la période de référence soit assez longue pour que cette moyenne soit assez stable - de l'ordre d'une trentaine d'années en général - et que cette période soit spécifiée pour permettre les comparaisons. Toutefois, une moyenne pluriannuelle est une information relativement pauvre sur la ressource : il convient de la compléter par des indications de variabilité tant infra-annuelle (régime moyen annuel) qu'inter-annuelle (distribution fréquentielle des écoulements annuels, médiane et décile, notamment du côté des sécheresses). Cette distribution peut souvent être approchée avec assez de validité sur des durées moins longues (une vingtaine d'années), du moins en zone climatique humide. On sait qu'en zone semi-aride et surtout aride, une durée sensiblement plus longue peut être nécessaire pour calculer des moyennes et des distributions fréquentielles avec la même approximation qu'en zone humide.

Exemple : le nombre d'années d'observations qu'il faudrait en un point donné, pour connaître un débit moyen annuel avec une précision donnée et une probabilité donnée de recouvrement de la moyenne vraie, a été estimé dans la zone intertropicale d'Afrique, d'après l'analyse de 83 stations, par N.O. AKMANOGLU (ORSTOM, 1970). Cette étude a montré que pour avoir une précision de 10 % sur le débit moyen annuel et un intervalle de confiance de 90 %, il suffit de 10 à 15 ans sur le Niger, de 15 à 30 ans sur le Sénégal, mais qu'il faut de 150 à 200 ans sur les cours d'eau les moins irréguliers de la zone sahélienne.

Il est vrai que les chroniques de données hydrologiques disponibles sont pour la plupart nettement plus courtes. Cela rend les opérations d'extension de données dans le temps d'autant plus nécessaires et préférables à l'emploi de séries trop courtes qui conduisent à des estimations douteuses et sujettes à révision. Le calcul de "moyennes" à partir de séquences d'années à dominante humide conduit évidemment à des surestimations, ou à l'inverse à des sous-estimations à partir de séquences d'années sèches. Des moyennes séquentielles d'ordre décennal peuvent servir à mettre en évidence la variabilité hydroclimatique à moyen terme^(*), mais pour estimer la ressource la moyenne annuelle (et la distribution fréquentielle) doivent se référer à la série intégrant le mieux possible les alternances d'années et de séquences pluriannuelles sèches et humides.

En cas où préférence est donnée à des périodes de référence plus courtes, pour réduire l'incertitude, il est recommandé à tout le moins d'indiquer le sens de l'écart présumé par rapport à une période plus longue, en se basant notamment sur des chroniques pluviométriques ou des chroniques de pluviosité (écarts relatifs des précipitations annuelles à la moyenne annuelle) de longue durée (exemple : graphiques de NICHOLSON pour l'Afrique de l'Ouest, fig. 5).

(*) malgré une tentation parfois observée, ne pas pour autant interpréter l'écart entre des moyennes séquentielles ou la révision à la baisse d'une moyenne d'années humides en intégrant des années plus sèches, comme l'indice d'un "changement de climat" d'une décennie à l'autre

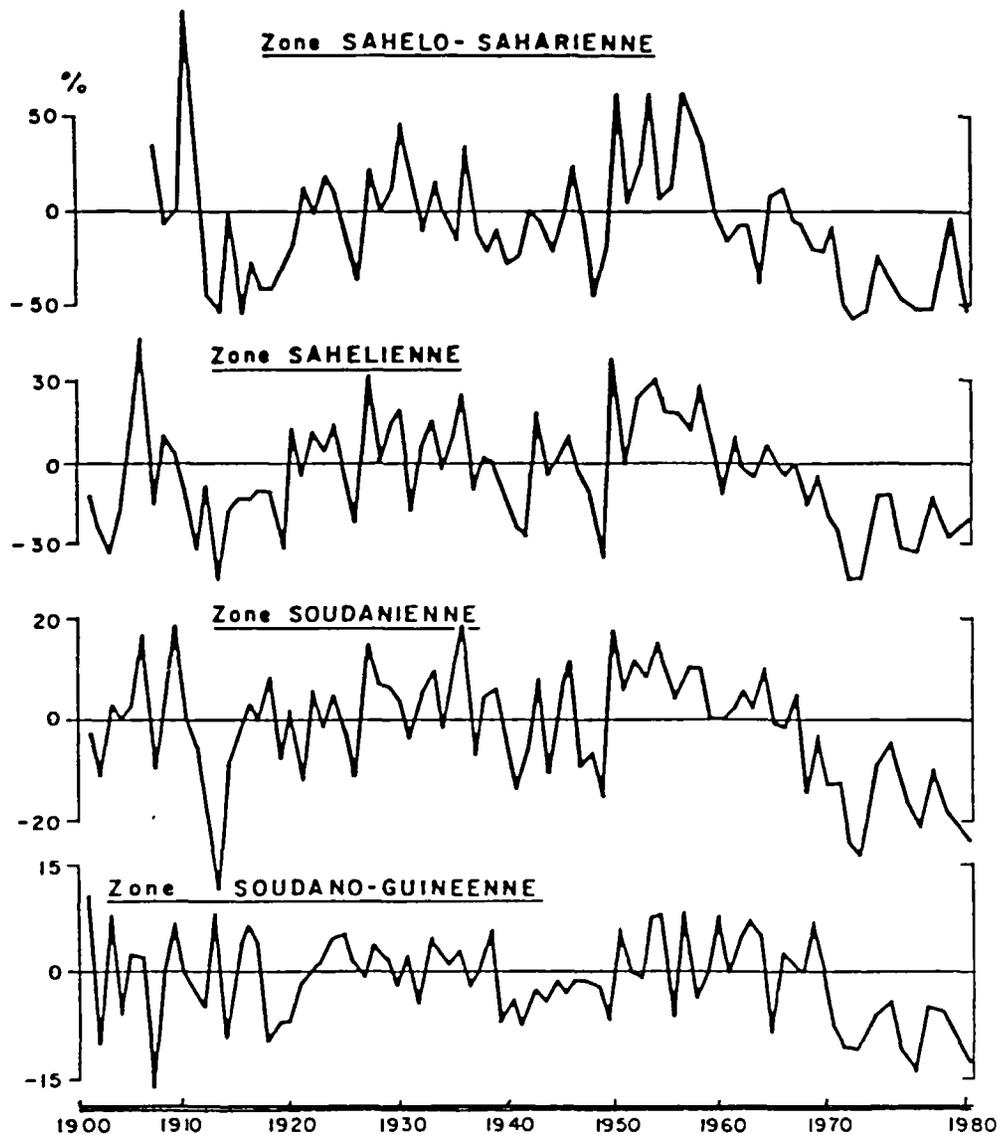


Fig. 5 - Variations de la pluviosité en quatre zones de l'Afrique de l'Ouest sub-saharienne, de 1901 à 1980.

Ecarts relatifs des précipitations annuelles (moyennes des stations de chaque zone) à la moyenne annuelle de cette période, exprimés en % de cette moyenne annuelle.

Source : NICHOLSON S.E. "The Sahel: a climatic perspective", nov. 1982. Publ. Com. inter. état pour la lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS/OCDE/Club du Sahel)

3.2. BASES HYDROLOGIQUES

Les données de réseau hydrométrique convenablement filtrées et critiquées (notamment en reconstituant les débits naturels) sont naturellement les bases essentielles, synthétisées sous la forme de chroniques de débits annuels et de débits mensuels d'étiage (débits mensuels minimaux) de chaque année, ainsi que de moyennes et de distribution fréquentielles de ces débits, exprimés aussi en écoulement spécifique par unité de surface.

En zone climatique humide (tempérée ou intertropicale), les écoulements d'étiage naturels définissent les ressources régulières et représentent généralement l'écoulement souterrain minimal.

Une attention particulière est à porter aux données sur les écoulements de cours d'eau transfrontières entrant, c'est-à-dire mesurés le plus près possible des points de franchissement de frontière, de même que sur les écoulements de cours d'eau frontière, à considérer aux sections les plus en amont et les plus en aval de leur tracé frontalier (frontière ayant ici le sens de limite de circonscription administrative aussi bien que de limite d'état).

L'analyse des références spatio-temporelles de ces données, résumées commodément dans un tableau ad hoc (exemple : tableau 3.1) complété par une carte, permet de programmer les opérations d'extrapolation à entreprendre ensuite.

Territoire :						
Superficie totale : km ²						
Cours d'eau	Station de jaugeage	Aire du bassin versant à la station (km ²)	Années de mesure (19.. à 19..)(*)	Débit moyen annuel (m ³ /an)	Débit d'étiage moyen (m ³ /an)	Observations par exemple :
.....	- cours d'eau intérieur
.....	- cours d'eau sortant → mer
.....	- cours d'eau sortant → pays voisin
.....	- cours d'eau affluent à bassin versant extérieur de x km ²
.....	- emboîtement dans le bassin défini par la station "n"
Eventuellement :						
Aquifère	Section d'estimation du flux	Aire du bassin hydrogéologique	Flux moyen annuel calculé (m ³ /an)		- écoulement sortant → mer - écoulement sortant → pays voisin	
.....			
.....			

(*) Lacunes éventuelles

Tabl. 3.1 - Données hydrologiques sur un territoire

3.3. EXTENSIONS SPATIO-TEMPORELLES DES DONNÉES

3.3.1. Extensions dans le temps

Il s'agit à la fois de combler les lacunes des chroniques de données (années incomplètes ou manquantes) et d'étendre ces chroniques pour les conformer à la période de référence adoptée. Ces extensions peuvent procéder :

- soit de l'application de corrélations jugées satisfaisantes entre des chroniques hydrométriques synchrones de stations de bassins voisins, en mettant à profit la durée d'observation plus longue de certaines ;
- soit en tirant parti du fait que les historiques climatologiques, notamment pluviométriques, sont souvent plus complets et plus longs que les chroniques hydrologiques, en appliquant des relations entre précipitations et écoulement, établies sur la période d'observation hydrométrique.

On revient plus loin, à propos des extensions dans l'espace (cf. 3.3.2), sur les différentes formes que peuvent prendre ces relations : fonctions de transfert et modèles statistiques ou modèles déterministes de bassin. Dans le cas présent, un modèle conceptuel de la relation pluie-écoulement peut être moins nécessaire, dans la mesure où la constance des paramètres physiques déterminants peut être admise.

Même si l'on vise à étendre une chronique d'écoulements annuels, pour améliorer la stabilité d'une moyenne annuelle et/ou la validité d'une distribution fréquentielle des écoulements annuels, les relations pluie-écoulement doivent être établies suivant des pas de temps plus courts que l'année, au moins mensuels, sinon décennaires, voire journaliers dans le cas de régime d'écoulement très irrégulier et épisodique. On intègre ensuite les résultats de calcul par année.

Signalons seulement pour mémoire les essais d'extension basés sur une corrélation entre les écoulements annuels et une variable exogène, telle que les données dendrochronologiques.

Dans tous les cas, un compromis reste nécessaire entre la durée de référence idéale qu'il serait souhaitable d'adopter et l'état des données disponibles (nombre d'"années-station" dans un territoire) : une marge d'extrapolation trop large peut neutraliser l'intérêt d'étendre davantage la période de référence.

3.3.2. Extension dans l'espace

L'extrapolation des écoulements connus aux bassins ou parties de bassin non "contrôlés" par des stations hydrométriques, repose naturellement d'abord sur les relations que l'on peut établir entre l'écoulement et la variable régionale continue la plus universellement observée et décrite (encore qu'avec bien des lacunes ...) : les précipitations. Néanmoins, on sait combien ces relations sont sensibles aux références spatio-temporelles des deux variables. Les réduire à une proportion exprimée par un "coefficient d'écoulement" linéaire, même en s'en tenant à la relation entre les

moyennes annuelles respectives, est beaucoup trop simpliste. Se baser sur un tel coefficient pour extrapoler les écoulements et transformer une carte d'isohyètes en carte de hauteur d'écoulement potentiel (précipitations efficaces) permettant, par intégration, le calcul d'écoulements supputés, est à l'évidence une approche à abandonner.

Il est sans doute moins risqué d'extrapoler directement les écoulements par unité de surface, c'est-à-dire les hauteurs d'écoulement (moyennes annuelles, voire annuelles de fréquence donnée) lorsque les facteurs climatiques et morphologiques de l'écoulement sont présumés similaires. Mais là encore on se heurte à la forte relativité de ces hauteurs moyennes "surfaiques" à la taille des bassins, dans de vastes régions du monde, en particulier dans les zones arides et semi-arides, et même dans une grande partie des zones humides. Une hauteur moyenne d'écoulement ne vaut alors que pour des bassins d'une classe d'étendue donnée, par exemple : bassins de 10 à 50 km² ou bassins de 100 à 1000 km². Autrement dit, l'écoulement observé dans un bassin de taille donnée n'est extrapolable - toutes choses égales -qu'à des bassins de taille similaire ou voisine.

La première étape de ces démarches d'extrapolation consiste à régionaliser l'écoulement dans les bassins où il est connu globalement, en se basant sur la répartition des précipitations et un zonage des facteurs physiographiques présumés et en s'appuyant éventuellement sur les écoulements mesurés de sous-bassins, de telle sorte que l'intégration de l'écoulement distribué reste bien égale à celui mesuré à l'exutoire. On s'efforce ensuite de raccorder les bassins traités pour généraliser empiriquement la cartographie de l'écoulement en s'appuyant encore sur la distribution des précipitations et des mêmes facteurs physiographiques dans les bassins non jaugés.

C'est par une telle démarche d'extrapolation que des régionalisations de l'écoulement moyen annuel ont été opérées en divers pays pour l'ensemble de leur territoire et même pour le monde entier, en établissant des cartes à petite échelle des hauteurs moyennes annuelles écoulées conçues comme une variable régionale continue (cf. chap. 4). C'est le cas par exemple des cartes de "Mean annual River Runoff" de l'"Atlas of World Water Balance" (USSR Com. IHD, 1974, UNESCO 1979), exemple fig. 21.

On peut penser que ces cartographies nationales ou internationales à petite échelle sont plus représentatives de l'écoulement des grands bassins, dont elles régionalisent la formation, que des écoulements locaux qu'elles tendent à sous-estimer dans tous les bassins non conservateurs d'écoulement.

Des démarches moins empiriques et plus fiables reposent sur l'établissement de relations statistiques ou déterministes entre les précipitations et l'écoulement à références temporelles et spatiales pertinentes - pas de temps assez courts et bassins assez petits pour être relativement homogènes - en prenant en compte les variables d'état physiographiques déterminantes, autrement dit sur des **modélisations** ; puis sur la régionalisation des écoulements calculés, relatifs à des bassins de taille définie, en s'appuyant sur la répartition spatiale de ces variables décrites par unité de surface cohérente.

Les "opérateurs pluie-débit", "fonction de production" ou autres "synthétiseurs d'écoulement" reliant la distribution des précipitations (traduits en indices pluviométriques de bassin) aux écoulements sont de deux sortes :

- Les modèles mathématiques ou opérateurs statistiques basés sur l'application de l'hydrogramme unitaire, l'analyse de corrélation ou des fonctions de transfert identifiées par déconvolution. Ces modèles sont très nombreux, depuis la "formule de HORTON" basée sur la théorie de la "capacité d'infiltration" (1935), jusqu'au modèle de GIRARD (ORSTOM, 1975). Toutefois, certains visent à reproduire le ruissellement plutôt que l'écoulement total, ce qui est mieux adapté à l'échelle de petits bassins.
- Les modèles déterministes, basés sur une analyse plus physique des phénomènes. Leur prototype est la méthode du bilan d'eau (ou "méthode de THORNTHWAITE") où l'écoulement est déduit de l'équation :

Écoulement = Précipitations - Evapotranspiration réelle calculée,

se référant à différentes durées (année, mois, journée, etc.) inégalement pertinentes L'estimation de l'écoulement repose alors sur le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) à partir de données climatologiques, au moyen des formules et méthodes déjà signalées à propos de l'estimation des ressources pluviales (supra 2). Basées sur des données mesurées ponctuellement, ces "précipitations efficaces" calculées ont donc une signification locale et ne sont représentatives que d'un écoulement potentiel localisé.

Néanmoins l'interpolation des hauteurs de précipitations efficaces calculées ponctuellement, aux sites de stations climatologiques, a permis une cartographie des précipitations efficaces moyennes annuelles en beaucoup de pays (fig. 20) et même pour le monde entier dans l'atlas de "The World Water Balance" de BAUMGARTNER et REICHEL (1975), où les cartes de "Discharge" résultent de bilans P-ETR calculés par point suivant un "Grid Network" (cf. chap. 4, 4.1), exemple : fig. 21.

Les modèles déterministes à réservoirs sont en principe mieux adaptés à la reproduction de l'écoulement total et de la séparation de ses composantes engendrées par le ruissellement et l'infiltration jusqu'aux aquifères. Des modèles de ce type, plus ou moins complexes suivant le nombre de réservoirs et de paramètres, sont également nombreux et ils sont souvent "modulables", c'est-à-dire plus ou moins simplifiables suivant leur objet. Citons parmi les plus modernes, en se limitant au "rayon" français :

- CREC (CORMARY, GUILBOT, 1974) (fig. 6) ;
- GARDENIA (BRGM, 1984) (fig. 7) ;
- GR3 (EDIJATNO, MICHEL, 1989).

Dans les deux cas ces modèles peuvent être globaux, chaque paramètre caractérisant globalement le bassin représenté, ou matriciels ("à discrétisation spatiale"), les paramètres étant répartis suivant des subdivisions du bassin régulières ("mailles") ou non (zones présumées homogènes), dont les écoulements élémentaires produits sont transférés à l'exutoire du bassin. Les modèles matriciels peuvent notamment servir à régionaliser à l'intérieur d'un bassin l'écoulement total connu pour calculer l'écoulement de sous-bassin ou de bassin partiel non mesuré.

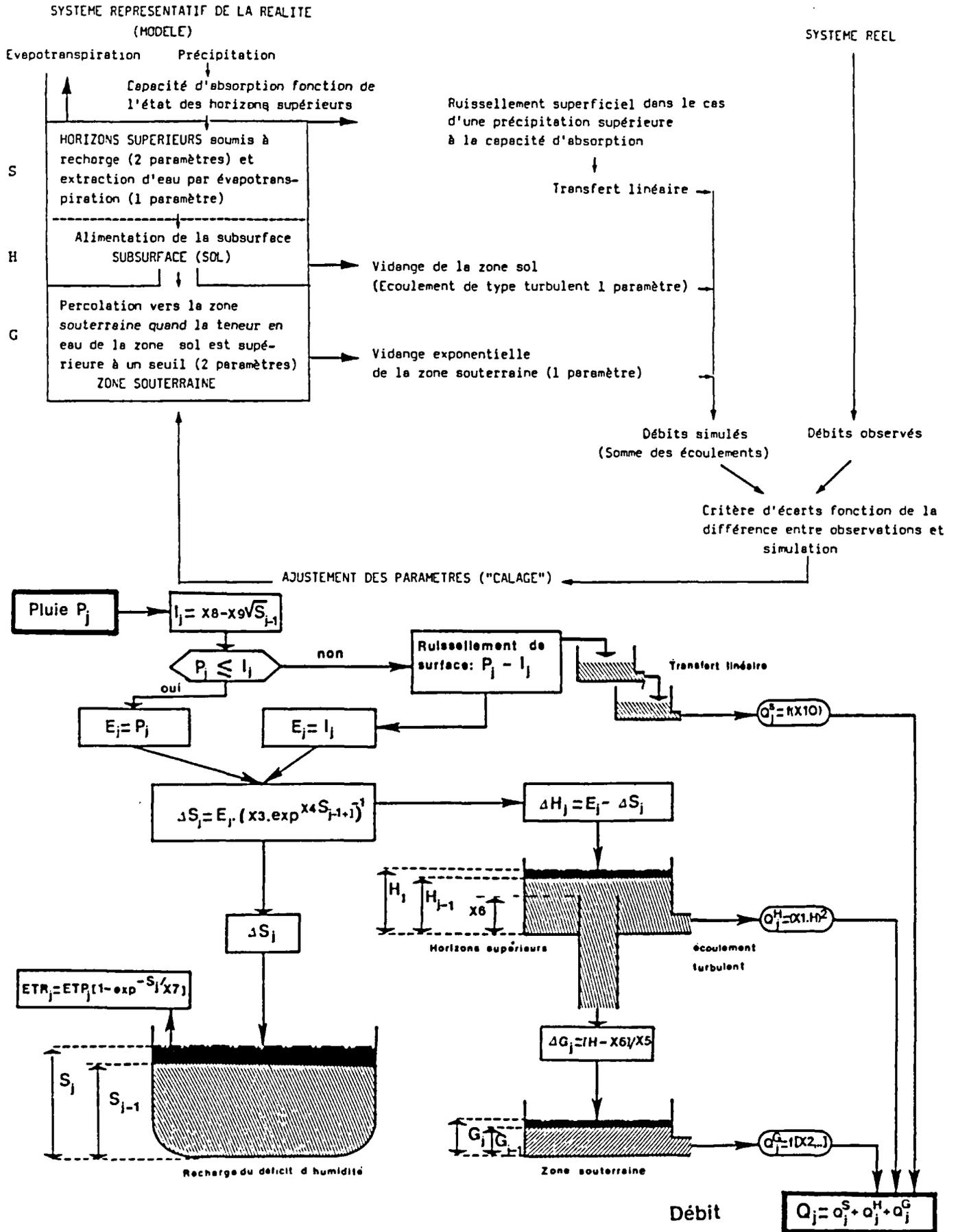


Fig. 6 - Le modèle global à réservoirs CREC - Schéma et mode de fonctionnement (d'après A. GUILBOT, 1986)

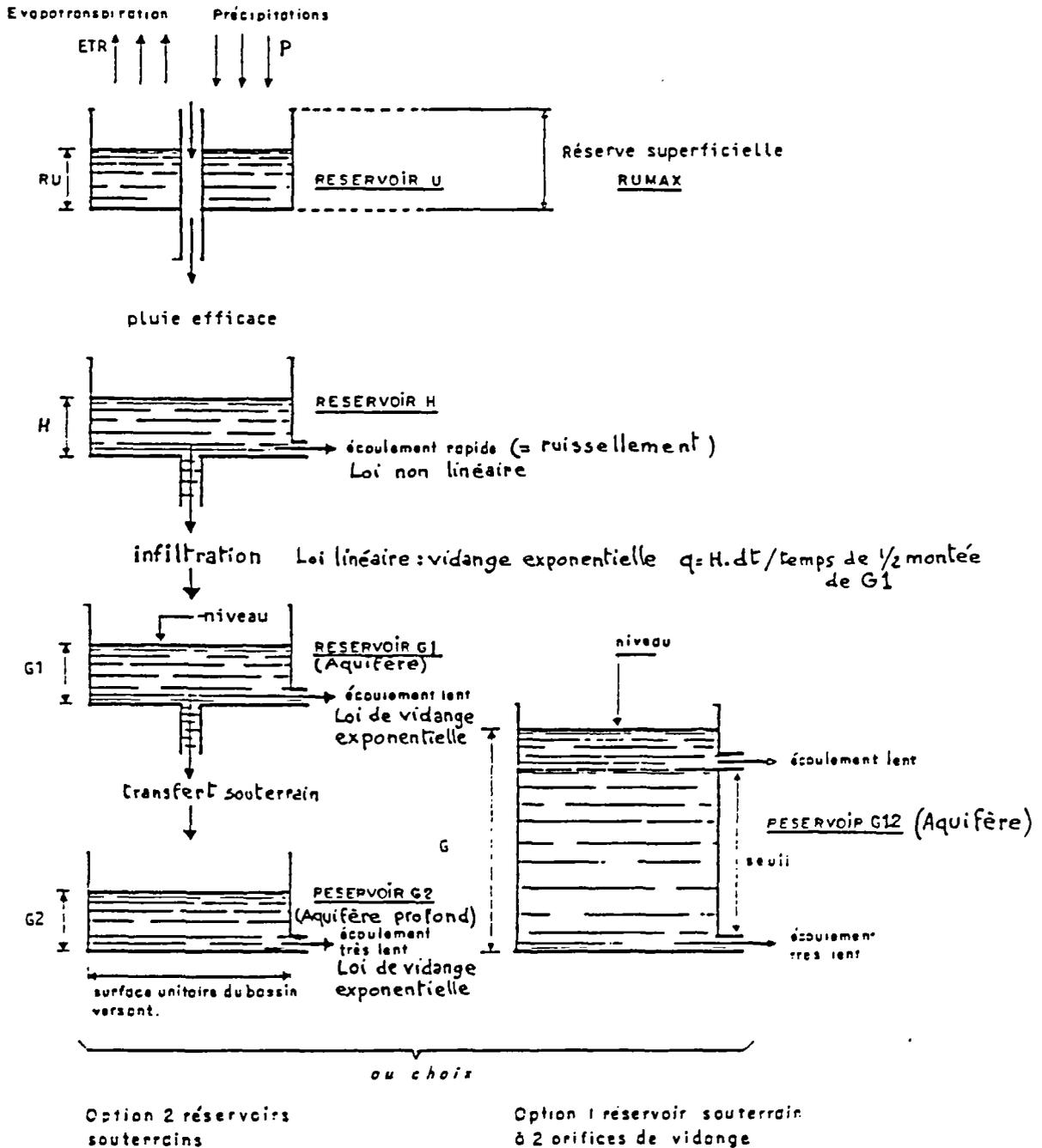


Fig. 7 - Le modèle global à réservoirs GARDENIA - Schéma de fonctionnement (BRGM, 1984)

Il n'y a pas de critère de sélection décisif entre tous ces modèles de bassin ni même entre les deux catégories. La validité de leurs résultats dépend en fait surtout de la qualité et de la justesse des données entrées, et du choix des paramètres (globaux ou distribués), plus que des structures des modèles. Leur "calage" sur des écoulements mesurés, par ajustement des paramètres des réservoirs ou des fonctions de transfert, lorsqu'il est possible, améliore la représentativité de ces modèles de bassin, notamment leur capacité à étendre des chroniques d'écoulement (cf. supra 3.3.1). A propos de ce calage, rappelons que, du point de vue de l'estimation des ressources en eau, la reproduction des volumes écoulés importe plus que celle de débits instantanés, notamment des pointes.

Dans la mesure où les données entrées (précipitations, ETR calculée) ont une signification ponctuelle, on peut penser que ces modèles ont surtout une représentativité locale et que l'écoulement calculé doit correspondre plutôt à celui de petits bassins, ce qui conduit au risque de surestimer l'écoulement de grands bassins.

Les modèles globaux précipitations-écoulement : sélection de références

CORMARY Y., GUILBOT A. (1974) - Etude des relations pluie-débit sur trois bassins représentatifs. *AIHS, Actes du Colloque de Madrid*. Publ. USA n° 108, part. 1, pp. 265-269.

EDIJATNO, MICHEL C. (1989) - Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, n° 2/1989, pp. 113-121, Grenoble.

GUILBOT A., GIRARD G., THIERY D. (1978) - Etude de l'efficacité relative et du domaine d'application de différents modèles hydrologiques pour prévoir les étiages. *Société Hydro-technique de France, XVème Journées de l'Hydraulique, Question 1, Rapport 1*, Toulouse, pp. 1-15.

GUILBOT A. (1986) - Des multiples applications d'un modèle conceptuel du cycle de l'eau en France. *Revue Internationale des Sciences de l'Eau*, vol. 2-1, pp. 19-26, Québec.

ROCHE M. (1970) - Les divers types de modèles déterministes. *Cahiers ORSTOM, Sér. Hydrologie*, vol. VII, n° 4, pp. 39-66, Paris.

ROCHE P.A., THIERY D. (1984) - Simulation globale de bassins hydrologiques. Introduction à la modélisation et description du modèle GARDENIA. *Rapport BRGM n° 84 SGN 337 EAU*, Orléans.

SERVAT E., DEZETTER A. (1990) - Modélisation pluie-débit. Analyse des calages des fonctions de transfert et de production. Programme ERREAU. ORSTOM, Abidjan, Côte d'Ivoire. *Soc. Hydrot Fr.*, 22ème Journées de l'Hydraulique : "L'avenir de l'eau", Paris, Sept., Question III, 10 p.

Exposer les modes d'emploi de ces modèles sortirait du cadre de cet essai. Dans l'optique présente des extensions spatiales de données, rappelons seulement qu'il s'agit dans tous les cas :

- d'abord de caler les paramètres du modèle en reproduisant les écoulements observés de bassins jugés "représentatifs" et dont différentes caractéristiques physiographiques (pentes, sols, structure et densité du drainage, présence et profondeur de nappe souterraine, végétation, etc.) sont identifiables macroscopiquement. L'ajustement entre les variables observées et calculées laisse supposer une relation "statistique" entre les paramètres globaux du modèle et ces caractéristiques moyennes ;
- puis d'appliquer le modèle ajusté à des bassins non jaugés, comparables par leur taille et leurs caractéristiques aux bassins d'étalonnage et situés dans une zone à hauteur de pluie moyenne du même ordre et à régime des précipitations similaire.

Quels que soient les types de modèles utilisés, cette approche requiert donc une connaissance des conditions climatiques et physiographiques du champ d'extension, cartographiées à l'échelle appropriée. La validité des résultats dépend naturellement :

- de la représentativité des bassins-étalons et de leur caractérisation physiographique "moyenne" ;
- de la validité des indices pluviométriques annuels attribués aux bassins dont on cherche à reconstituer l'écoulement ;
- de la conformité réelle des conditions physiographiques de ces bassins avec celles des bassins-étalons.

Une démonstration des capacités de régionalisation de cette approche a été faite il y a une quinzaine d'années par l'ORSTOM pour l'ensemble de la région semi-aride d'Afrique de l'Ouest (Sahel). Sur la base des données d'un grand nombre de bassins (130) de faible superficie (moins de 500 km²) représentatifs de conditions variées (morphologie, sol, végétation très liée à la zone climatique) fondements d'une typologie et de l'élaboration pour chaque zone climatique de courbes de distribution des précipitations annuelles, l'application du modèle de GIRARD "simplifié" a permis d'établir des diagrammes de distribution (fréquences cumulées au dépassement) des écoulements annuels pour chaque type et classe de superficie de bassin (J. RODIER, 1975). Exemple : fig. 8 et tabl. 3.2.

Nature du terrain	Ecoulement médian annuel		Hauteur écoulée en année sèche décennale (mm)
	Coefficient d'écoulement (%)	Hauteur écoulée (mm)	
Sables	0,45	2,2	ε
Granite, migmatite : - Abou-Goulem - Gagara Ouest	3,5 14	17,5 72	4 30
Grès non altérés	14	72	30
Sables et marnes	9	45	15
Schistes	19,5	98	45
"Continental terminal" de l'Adar Douchi : - Kountkouzout - Galmi	14 35	72 175	30 77

Tabl. 3.2 - Exemple de résultats pour des bassins de 25 km² (précipitations moyennes de l'ordre de 500 mm/an) (d'après J. RODIER, 1977).

N.B. : dans les bassins de cette classe de taille l'écoulement est formé seulement de ruissellement.

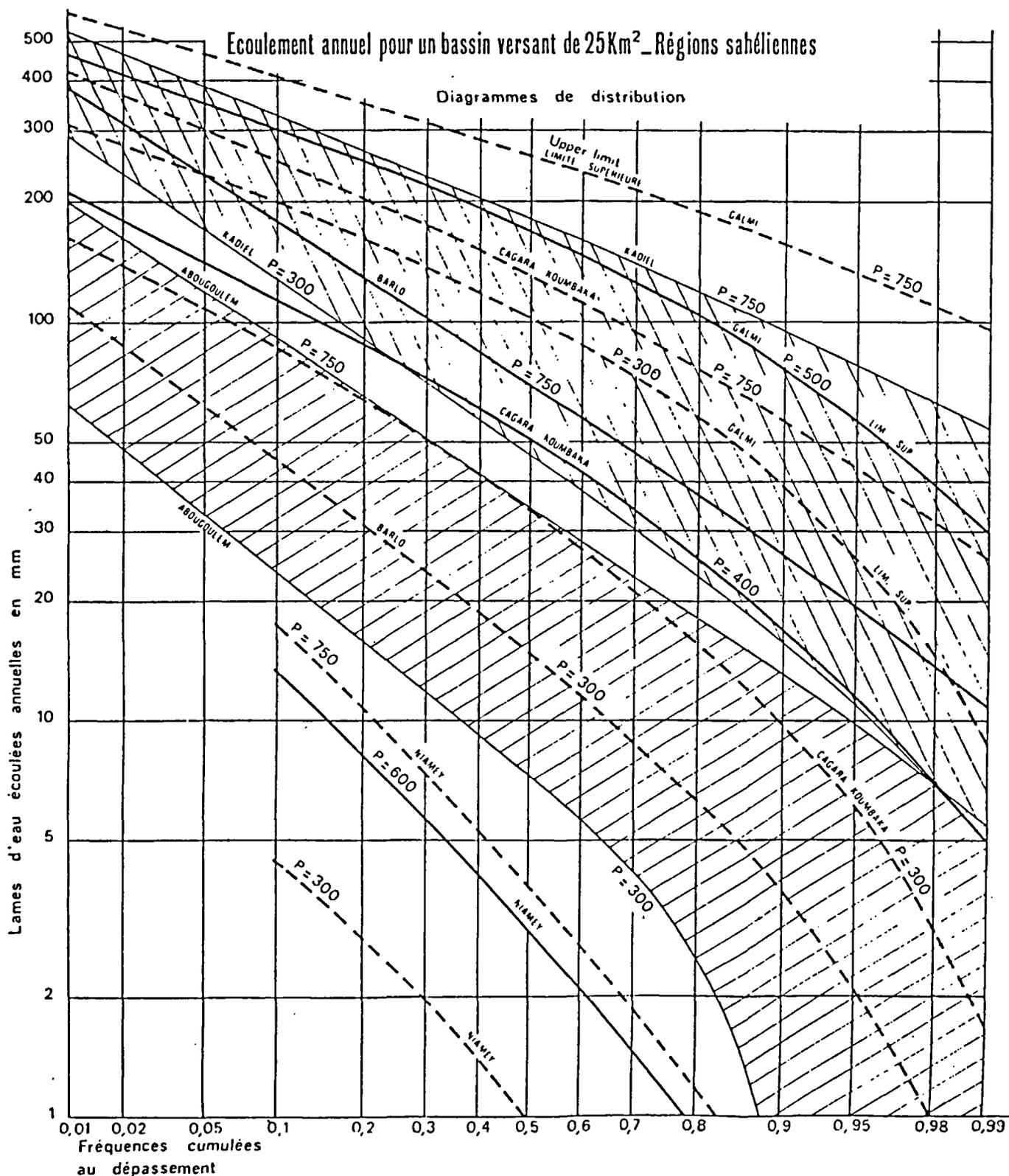


Fig. 8 - Abaque de détermination des écoulements annuels fréquents en fonction des précipitations annuelles P, pour des bassins de 25 km² en régions sahéliennes d'Afrique de l'Ouest (source : J. RODIER, 1977)

Une récente étude de l'ORSTOM au Mali (A. JOIGNEREZ *et al.*, 1992) a confirmé l'adaptation de cette approche à la régionalisation des écoulements superficiels non pérennes de petits bassins dans ces conditions climatiques et morphologiques, notamment pour estimer les ressources en eau mobilisables par de petits réservoirs (lacs collinaires).

En résumé, l'estimation régionalisée des écoulements passe par les étapes suivantes :

- exploitation de bassins représentatifs de tailles variées, notamment emboîtés. Caractérisation de ces bassins suivant une typologie physiographique ;
- collecte des données d'observation dans ces bassins et des données de réseaux hydrométriques et climatologiques ;
- modélisation de ces bassins et établissement de relations pluie-écoulement pour chaque classe et type de bassin ;
- analyse et régionalisation des données pluviométriques ;
- analyse et description des conditions physiographiques du territoire. Subdivision du territoire en bassins élémentaires, suivant plusieurs classes de superficie. Classement des bassins, pour chaque ordre de subdivision, suivant la typologie adoptée pour les bassins représentatifs ;
- application des relations pluie-écoulement ajustées dans les bassins représentatifs à l'extension des écoulements probables pour chaque classe et type de bassin. Expression cartographique discrète ou continue des résultats propres à chaque classe de superficie de bassin.

N.B. : c'est seulement dans le cas où l'effet d'échelle serait jugé négligeable sur la relation pluies-écoulement - en zone très humide ? - que l'on pourrait faire abstraction d'une approche par classes de bassin séparées. Par ailleurs, plus les bassins de référence sont étendus, plus ils peuvent prendre en compte l'écoulement total et non pas seulement l'écoulement superficiel.

En définitive, dans de vastes territoires (sur plus des 2/3 du continent africain, par exemple), une régionalisation de l'écoulement potentiel (ou "précipitation efficace"), qu'il soit moyen ou fréquentiel, conçu comme une variable continue indépendante de la taille des aires de référence est impossible et sa représentation cartographique unique serait peu significative. A la différence d'une carte pluviométrique qui peut être unique, la cartographie des précipitations efficaces devrait être le plus souvent multiple : plusieurs cartes relatives chacune à l'écoulement escomptable pour des bassins d'un ordre de superficie défini devraient être dressées séparément. Cela peut mettre en question la validité de certaines cartes de précipitations efficaces ou d'écoulement potentiel établies en zone semi-aride sans être rapportées à une superficie de référence significative (cf. chap. 4, 4.1, fig. 20).

Les précipitations efficaces calculées puis cartographiées doivent avoir moins le sens d'une variable absolue servant à supputer des écoulements inconnus, que celui d'un index relatif servant à régionaliser des écoulements connus globalement.

3.4. ESTIMATION DES "RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE" ASPECTS SPÉCIFIQUES ET COHÉRENCES NÉCESSAIRES

Distinguer et estimer séparément d'un côté des "ressources en eau superficielle" et de l'autre des "ressources en eau souterraine" est le fait de la division du travail courante entre les disciplines qui concourent à l'évaluation des ressources en eau (hydrologie "superficielle", hydrogéologie) chacune avec sa propre approche, ce qui correspond aussi à la distinction entre les modes d'exploitation des eaux et à la partition des acteurs : les agents qui exploitent soit l'eau superficielle, soit l'eau souterraine, ont naturellement une vision séparatiste de la ressource à estimer. C'est cependant le plus souvent une erreur qui conduit à des estimations redondantes.

En dehors des cas particuliers - non négligeables dans certaines régions - où les systèmes d'eau souterraine (systèmes aquifères) sont indépendants des eaux superficielles, on ne peut quantifier séparément des ressources naturelles en eau superficielle et des ressources naturelles en eau souterraine, indépendantes et additives, basées respectivement sur des données hydrologiques (écoulements superficiels) et sur des données hydrogéologiques (écoulements souterrains), qui décrivent en partie des flux communs (cf. chap. 1, 1.1.3). Le risque de redondance est d'autant plus grand lorsque les flux d'eau superficielle sont estimés par l'aval (écoulement sortant) et les flux souterrains par l'amont (alimentation des aquifères), ce qui est courant en pratique.

La quantification des flux souterrains, en particulier des apports qui alimentent les aquifères, ne se confond pas avec l'estimation des "ressources en eau souterraine" renouvelables, même naturelles et théoriques, parce que celles-ci équivalent au mieux à la part de ces flux qu'il est physiquement possible de détourner et soustraire des issues naturelles des aquifères (cours d'eau collecteurs, écoulements occultes à d'autres aquifères ou à la mer, évaporation, etc.), avant même toute prise en compte de critères de faisabilité et de contraintes extérieures d'"exploitabilité" que l'on considérera plus loin (5.2). Cette part est très difficilement estimable a priori puisqu'elle dépend de la disposition et de la densité des captages et de leurs effets sur la dynamique des nappes souterraines (abaissments de niveau plus ou moins amples et étendus, capables de réduire des émissions d'eau souvent extensive). Bien souvent cette part ne représente qu'une faible proportion des flux d'apport.

En certains cas par contre, il est toutefois possible en pratique de capter la totalité du flux souterrain moyen, voire même d'aller au-delà plus ou moins temporairement en épuisant le stock, en régime de "surexploitation" délibérée ou non ou d'exploitation minière volontaire de ressources renouvelables (cf. infra 5.3 et 5.4). C'est seulement dans ce cas que l'alimentation moyenne d'un aquifère peut déterminer le flux de ressource renouvelable, avec le sens d'une limite physique.

La quantification des flux reçus et débités en moyenne par les aquifères ne définit en somme que le maximum théorique possible de la part des ressources en eau renouvelables naturelles offerte aux prélèvements d'eau souterraine.

Dans tous les cas, l'estimation des flux souterrains n'en est pas moins un élément essentiel de la connaissance des systèmes aquifères, en tant que sous-systèmes de ressource en eau, dont l'analyse permet de définir la ressource offerte.

Comme un écoulement d'eau de surface, un flux d'écoulement souterrain doit s'estimer suivant une référence spatio-temporelle définie :

- Dans l'espace il doit se référer à un système aquifère défini. D'abord globalement : l'alimentation et le débit global sont alors, en moyenne, équivalents. Puis en étant réparti plus ou moins finement suivant les limites du système, en différenciant alors les flux d'apport et d'émission, ce qui revient à analyser le budget d'eau moyen du système et à le spatialiser, donc à le relier à une cartographie.

L'expression du flux global par unité de surface a peu de signification, surtout quand les entrées sont loin d'être uniformément réparties, sauf dans le cas particulier où les échanges d'eau verticaux locaux entre l'eau souterraine, le sol et la surface (infiltration, "exfiltration" + évaporation) prédominent sur les écoulements à composante horizontale : le système aquifère est alors composé de la juxtaposition de cellules quasi-indépendantes, à circulation unidimensionnelle. C'est le cas notamment, en zone aride ou semi-aride, des formations aquifères peu perméables comme les altérites sur socle.

Par contre décrire la répartition spatiale des flux sortants, en général plus localisés, est primordial pour définir la ressource offerte en tenant compte à la fois des possibilités physiques de les influencer par les exploitations et des contraintes éventuelles de conservation limitant ces possibilités.

Reconnaître, identifier et délimiter les principaux systèmes aquifères d'un territoire est donc un préalable aussi important que la description des structures hydrographiques et la délimitation des bassins versants, pour l'estimation des ressources en eau renouvelables.

- Dans le temps la référence à une année moyenne est généralement suffisante, significative du fait de la régulation pluriannuelle des flux sortants par les réservoirs aquifères, sauf naturellement dans le cas particulier d'aquifères très peu capacitifs où une référence fréquentielle est préférable.

La connaissance des flux souterrains régionaux peut procéder de deux approches :

- **Approche par l'aval**, qui privilégie l'estimation des flux sortants, assimilés aux composantes régulières (débit de base ou "écoulement souterrain") des écoulements de cours d'eau mesurés - et naturellement des sources - : soit par analyse des hydrogrammes disponibles, suivant diverses procédures classiques, soit de manière plus simplifiée en identifiant l'écoulement souterrain à un débit de "basses eaux" (étiage) convenu, par exemple au débit moyen mensuel le plus faible (donnée d'annuaire hydrologique), généralement alors par défaut. Il convient toutefois de s'assurer alors que d'éventuels "sous-écoulements" sont négligeables ou bien qu'ils peuvent être estimés et pris en compte. Cette approche est la plus pertinente en zone à climat humide, tempérée ou intertropicale. Mais son exhaustivité dépend beaucoup de la proportion du territoire comprise dans les bassins dominant des stations de mesure. L'extension des résultats de ces analyses, exprimés en "module" d'écoulement souterrain par unité de surface significatif pour des zones de caractéristiques climatiques et hydrogéologiques assez homogènes, aux zones à aquifère identifié du reste d'un territoire s'appuiera sur leur régionalisation et elle pourra aboutir à une cartographie de l'écoulement souterrain potentiel conçu comme une variable régionale en partie continue (cf. chap. 4, 4.2 et fig. 21), dont on peut alors déduire par intégration des flux globaux d'aquifères définis.

Par contre cette approche n'est pas appropriée en zone semi-aride ou aride, ou même en zone tropicale humide, où une part notable, souvent prépondérante, des flux d'eau souterraine n'est pas collectée par des cours d'eau ou des aires d'émergence, mais a pour issue des aires d'évaporation plus ou moins diffuse, ou des reprises par évapotranspiration. Elle y conduit donc à une sous-estimation du flux global d'eau souterraine. Toutefois, dans la mesure où le flux qui échappe à l'estimation par l'aval est lui-même difficile à capter, cette sous-estimation peut ne présenter qu'un inconvénient mineur du point de vue de l'estimation de ressource.

Il en est de même dans le cas d'aquifères littoraux à exutoires occultes à la mer, dont les débits ne sont pas directement mesurables mais ne sont que partiellement captables.

L'approche par l'aval présente en tous cas la meilleure garantie d'additivité avec les écoulements superficiels engendrés par le ruissellement.

- **Approche par l'amont**, privilégiant l'estimation des flux d'apport. Il s'agit surtout de calculer les flux d'infiltration d'eaux météoriques, conçus comme une variable régionale continue, puis de les régionaliser, donc de les cartographier.

Des procédures souvent appliquées dans le passé sont ici à proscrire absolument :

- application aux précipitations totales de "coefficients d'infiltration" invariants (on sait qu'il n'y a pas de relation linéaire entre les hauteurs de précipitation et les flux d'infiltration "efficace", c'est-à-dire d'apport aux nappes souterraines, quel que soit le pas de temps de référence) ;
- calcul de ces flux par pas de temps annuels, voire même mensuels. Des pas de temps décennaux à journaliers sont seuls pertinents pour aboutir à des sommes annuelles valables.

L'application de coefficients "moyens" aux précipitations efficaces est plus acceptable, mais encore trop simple, surtout si on opère à l'échelle annuelle.

Les procédures "infiltrométriques" plus ou moins directes (qu'elles soient empiriques comme la lysimétrie, basées sur l'hydrodynamique de la zone non saturée et sa modélisation, ou sur la cinématique des transferts d'eau dans cette zone et leur traçage), appropriées à l'échelle des investigations ponctuelles, n'étant pas multipliables, l'approche la plus pertinente consiste dans une modélisation semi-globale des relations entre précipitations et quantités d'eau infiltrée, par des modèles à "réservoirs" ajustés sur des variations de niveau piézométrique de nappe libre connues même durant peu d'années d'observation, en procédant par pas de temps assez courts (journaliers à décennaux), puis en étendant les résultats sur de plus longues périodes à partir des chroniques de données pluviométriques et climatologiques. L'expression des résultats de tels modèles "pluie/niveau" en terme de flux implique toutefois une hypothèse sur l'emmagasinement .. Exemple : le modèle "GARDENIA" du BRGM (1984), cf. fig. 9, FILIPPI *et al.*, 1990.

Cette approche n'a cependant encore qu'une portée locale et la régionalisation de ses résultats doit s'appuyer sur celle des variables déterminantes (précipitations, facteurs d'évapotranspiration, coefficients d'emmagasinement, variations de niveau de nappe souterraine, etc.)

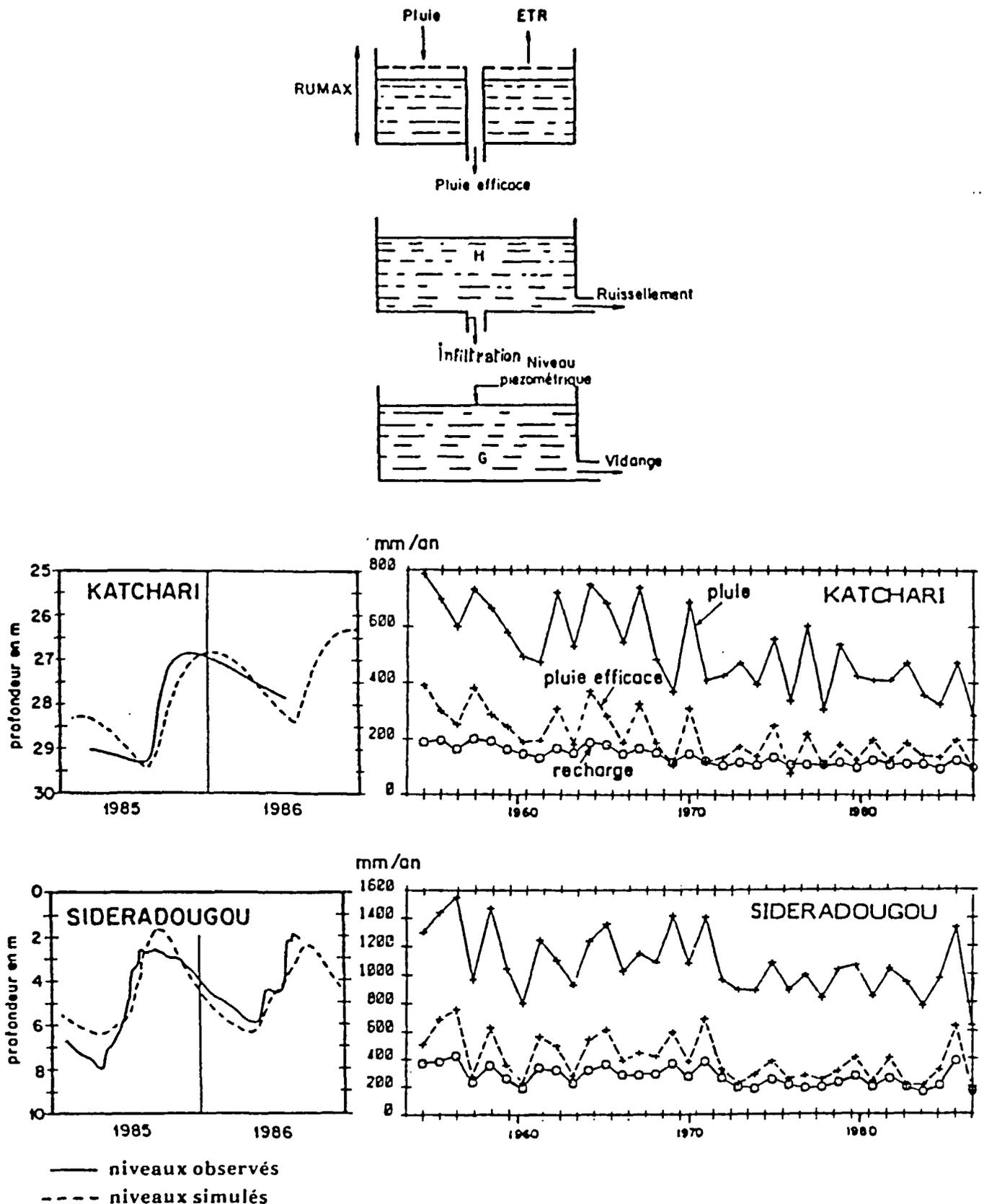


Fig. 9 - Exemples de reconstitution des apports d'eau annuels rechargeant des aquifères (= infiltration efficace) au moyen d'un modèle global de relations pluies-niveaux ("GARDENIA"), en région semi-aride d'Afrique de l'Ouest.

en haut : schéma de fonctionnement du modèle GARDENIA (BRGM).

RUMAX : Réserve Utile Maximale du réservoir sol (cf. fig. 7)

en bas : applications à deux stations du Burkina-Faso, Katchari, au Nord, et Sidéradougou, au Sud :

à gauche : calage sur les niveaux observés en 1985-1986

à droite : extension à la période 1954-1986, pluies efficaces et hauteurs de recharge annuelles

Source : BRGM-AQUATER, 1986 ; FILIPPI *et al.*, 1990

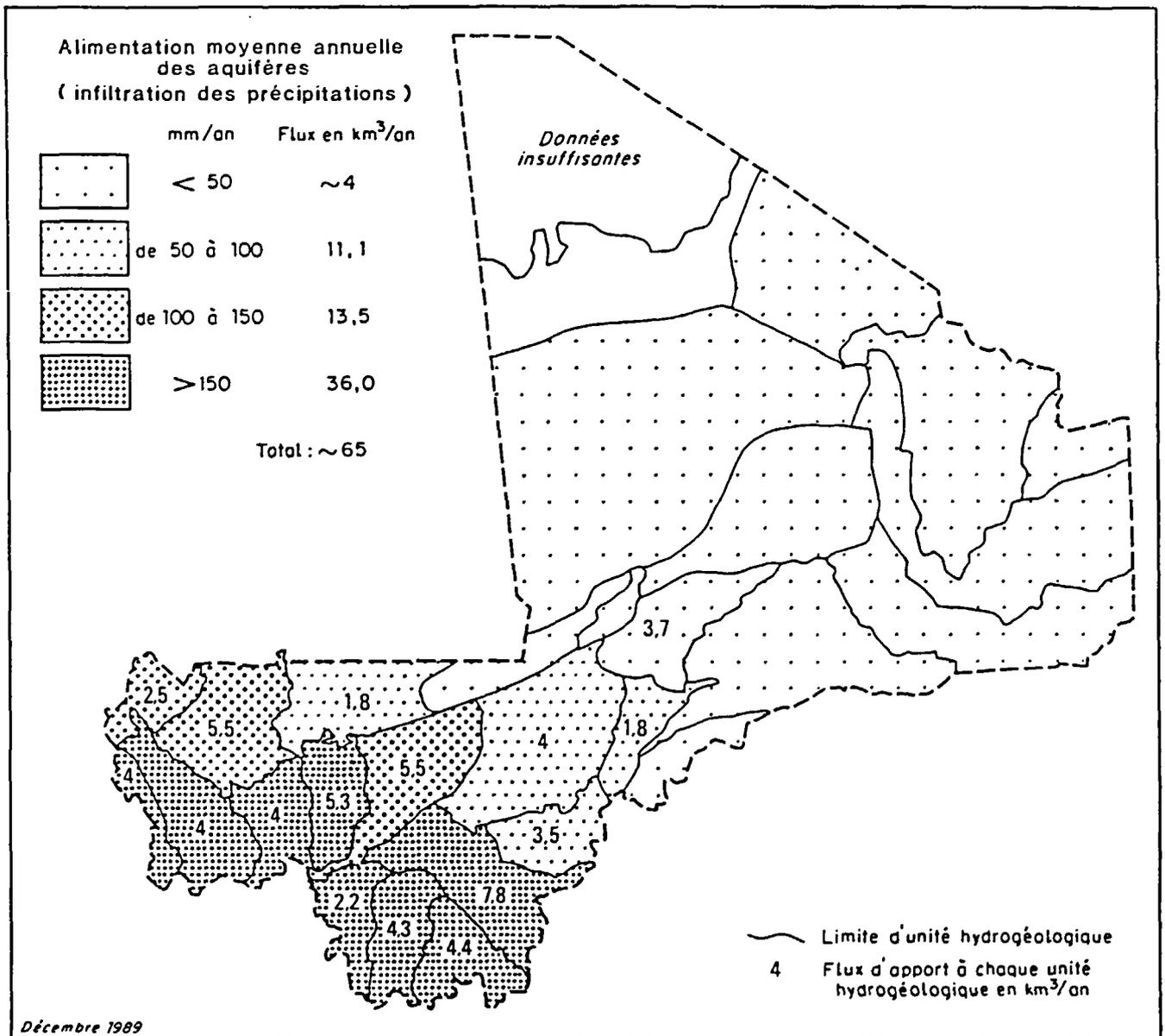


Fig. 10 - Régionalisation de l'alimentation des aquifères calculée d'après les recharges de nappe souterraine observées au Mali (source : DNHE/PNUD/DTCD - Projet MLI 84/005, 1990)

Une approche simplifiée peut être basée sur la seule analyse des fluctuations des surfaces libres de nappe souterraine, en identifiant les recharges imputables aux apports, moyennant là encore des hypothèses sur l'emmagasinement, à condition de disposer de données assez denses et sur d'assez longues durées pour définir des hauteurs de recharge annuelles moyennes ou médianes régionalisées. L'alimentation moyenne des aquifères de l'ensemble du Mali, par exemple, a été calculée et cartographiée suivant cette méthode (Projet PNUD/MLI 84/005, 1990, fig. 10).

Les approches par l'amont sont seules possibles en zone semi-aride ou aride où elles sont cependant handicapées par :

- les difficultés de régionalisation des précipitations et des hauteurs de recharge des eaux souterraines ;
- la discontinuité spatiale des phénomènes d'infiltration et le fait que ceux-ci sont souvent tributaires du ruissellement.

En particulier elles sont mal adaptées à l'estimation des apports engendrés par d'autres sources que les précipitations, telles que des eaux fluviales affluantes.

Enfin, en réciproque à la sous-estimation des apports totaux lorsqu'on les déduit des seuls écoulements souterrains visibles ou occultes, les essais de chiffrage des apports conduisent à une surestimation de ces écoulements souterrains - donc des ressources qu'on leur fait correspondre en partie - lorsqu'une partie de ces apports est "consommée" dans les systèmes et n'engendre pas d'écoulement sortant.

De fait, les estimations globales de flux d'eau souterraine opérées pour des pays entiers suivant les deux approches montrent bien que les flux estimés par l'amont, par calcul de l'alimentation des aquifères, sont sensiblement supérieurs à ceux estimés par l'aval d'après les débits de base des cours d'eau. Exemples :

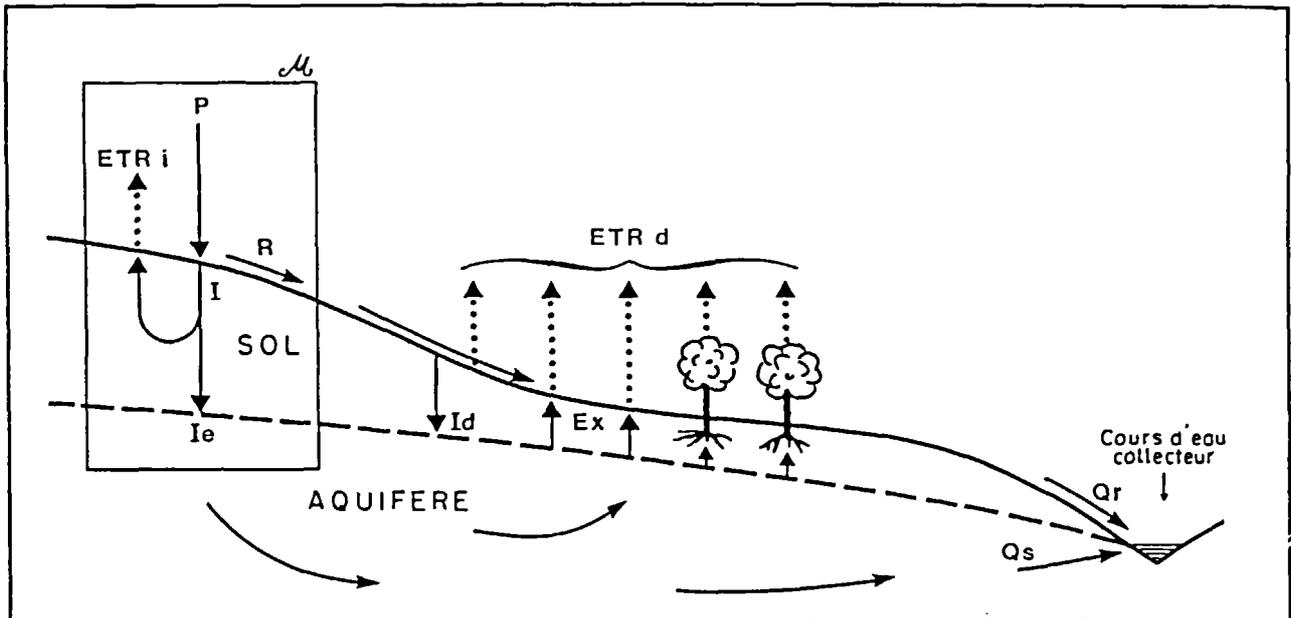
Pays	Flux d'eau souterraine naturel estimé par calcul de l'alimentation des aquifères (en 10 ⁹ m ³ /an)		Flux d'eau souterraine naturel calculé d'après le débit de base des cours d'eau (en 10 ⁹ m ³ /an)
AFRIQUE :	Réf. :		Réf. : (4)
Cameroun	147	(2)	93
Congo	192	(6)	68
Gabon	223	(6)	62
Ghana	26,3	(1)	10
Mali	65	(8)	16
Sénégal	9,3	(5)	7,6
Tchad	20,6	(5)	11,5
Togo	5,7	(1)	1,4
Indonésie	455	(7)	226
Australie	72	(3)	38

Références :

- (1) BOURGEOIS M. (1979) - Notice explicative de la carte de planification des ressources en eau de Côte d'Ivoire, du Ghana, du Togo et du Bénin. *CIEH, BRGM*, doc. 79 AGE 005, 99 p., Orléans.
 - (2) BOURGEOIS M. (1979) - Notice explicative des cartes de planification des ressources en eau du Cameroun. *CIEH, BRGM*, Doc. 80 AGE 007, 68 p., Orléans.
 - (3) LAU J.E. *et al.* (1987) - Hydrogeology of Australia. *BMGG*, Bull. 227, Austr. Gov. Publ. Serv. Camberra.
 - (4) L'VOVICH M.I. (1974) - World water resources and their future. *Mysl' P.H.* Moscow, Engl. Transl. 1979, AGU, Washington.
 - (5) ANONYME/BRGM (1976) - Cartes de planification des ressources en eau souterraine des états membres du CIEH de l'Afrique soudano-sahélienne. Notice explicative. *Com. interafr. ét. hydr.*, Sér. hydrogéologie, FAC/BRGM, Ouagadougou. Pays intéressés : Burkina-Faso, Cameroun, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal, Tchad.
 - (6) ANONYME/BRGM (1982) - Notice explicative de la carte de planification des ressources en eau du Gabon et du Congo. *CIEH, BRGM*, Doc. 82 AGE 055, 116 p., Orléans.
 - (7) ANONYME (1983) - Ground Water in the Pacific Region. *UN-DTCD*, Natural Resources/Water Series n° 12, New-York.
 - (8) ANONYME/PNUD (1990) - Synthèse hydrogéologique du Mali. *Rép. du Mali/PNUD-DTCD*, Rapport du projet MLI/84/005, Sept.
-

Le caractère systématique de ces écarts conduit à les attribuer à l'effet des "consommations" spontanées d'une partie importante des flux d'eau souterraine par l'évapotranspiration "différée" du sol et de la couverture végétale, qui réduit les écoulements souterrains sortants par rapport à l'alimentation des aquifères. Cela revient, en d'autres termes, à considérer que le flux d'apport aux aquifères estimé par l'amont peut empiéter largement sur la "ressource pluviale", ou encore que le "déficit d'écoulement" équivaut bien à tout le flux finalement évapo-transpiré et non pas à la seule évaporation initiale (précipitation totale - précipitation efficace) régionalisée (fig. 11).

La relativité de tous ces flux à l'échelle spatio-temporelle à laquelle on les considère est encore une fois à souligner, ce qui implique des références cohérentes.



- P, précipitations totales
 - R, ruissellement
 - I, infiltration initiale (apport au sol)
 - Ie, Id, infiltration efficace initiale ou différée (apport à l'aquifère)
 - Ex, exfiltration
 - ETR_i, évapotranspiration initiale
 - ETR_d, évapotranspiration différée
 - Q_r, écoulement superficiel
 - Q_s, écoulement souterrain
-) ETR totale

Fig. 11 - Schéma de répartition des flux dans un système d'eau régional

La généralisation régionale d'un modèle global à réservoir "unidimensionnel" (\mathcal{M}) n'est pas nécessairement représentative : les apports alimentant l'aquifère (I_e) peuvent être supérieurs à l'écoulement souterrain (Q_s) dès que l'évapotranspiration "différée" (ETR_d) n'est pas négligeable.

Une troisième approche, plus synthétique et mieux spatialisée consiste à déduire les flux entrés et sortis de systèmes aquifères de leur modélisation hydrodynamique.

Recherchant et vérifiant la cohérence entre les conditions aux limites, le champ des potentiels et les paramètres structuraux, les modèles de simulation hydrodynamiques permettent de chiffrer les flux imposés ou trouvés aux limites, globalement et localement. En particulier les flux d'apport sont plus souvent une inconnue à déterminer qu'une donnée imposée.

La modélisation est la seule approche possible dans les cas où les modes d'alimentation sont complexes et les apports sont localisés et discontinus et/ou lorsqu'une part notable des sorties est occulte, ainsi que dans les cas d'échanges alternatifs aux limites (échanges nappe souterraine/rivière, etc.). Les exemples d'application abondent, à toutes sortes d'échelle.

Cette méthode plus rigoureuse n'est cependant pas généralisable. La construction de tels modèles nécessite des jeux de données dont l'acquisition implique des efforts d'investigation notables justifiés par des objectifs d'étude de plan d'exploitation. L'estimation des flux circulant dans le système aquifère est plutôt un résultat de la modélisation que l'objet premier des simulations.

En outre, les modélisations hydrodynamiques de système aquifère tendent à privilégier leurs états relativement stables, notamment dans le cas des nappes libres, ce qui risque de minimiser les flux moyens par sous-estimation des composantes temporaires. L'expérience a souvent montré que les flux d'apport calculés par ajustement sur les paramètres des aquifères (transmissivités, potentiels) étaient inférieurs à ceux déduits d'approches plus globales

De cette revue comparée sommaire des approches visant à quantifier les flux des aquifères dans une optique d'estimation des "ressources naturelles" qu'ils offrent, on conclura que l'approche par l'aval est de beaucoup à préférer, en la complétant quand c'est possible par des modélisations, tandis que l'approche par l'amont est plutôt un substitut faute de mieux dont les résultats sont à utiliser avec prudence, mais qui peut aider à régionaliser relativement (à déglobaliser) les résultats de l'approche par l'aval.

Cela dit, en revenant au propos initial, rappelons encore que la distinction entre des ressources en eau naturelles et renouvelables respectivement souterraines et superficielles ne correspond pas à la séparation de l'écoulement total en composantes souterraine et superficielle. Elle a plutôt le sens d'une partition de la ressource totale entre les parts qu'il est jugé préférable ou plus avantageux (pour la collectivité) de réserver respectivement aux prélèvements dans les aquifères et aux prises dans les cours d'eau. Cette partition ressortit en pratique de l'évaluation des ressources exploitables (cf. infra 5.3).

4. ESTIMATION DES RESSOURCES NON RENOUVELABLES : RÉSERVES DES AQUIFÈRES

Estimer les ressources en eau non renouvelables, telles qu'elles ont été définies (chap. 1), consiste d'abord à quantifier les réserves des aquifères dont le taux global de renouvellement est assez faible : inférieur à 0,01 ou moins encore, ce qui est le cas de la plupart des réservoirs aquifères profonds des grands bassins sédimentaires, sous tous les climats, mais aussi d'aquifères étendus à nappes libres en zone aride où les apports sont très réduits. Cela implique d'estimer à la fois (en ordre de grandeur) :

- les volumes d'eau stockés dans les réservoirs en état moyen dans le cas de nappes libres ;
- les flux globaux d'apport moyens annuels.

L'estimation des seconds ne procédant pas différemment de la démarche appliquée dans le cas plus général des aquifères à ressources renouvelables (cf. supra 3.4), on s'attachera ici seulement à l'estimation des réserves.

Le calcul de réserve d'un système aquifère repose sur des données hydrogéologiques :

- connaissance de la géométrie du réservoir : étendue, puissances (décrites par une carte d'isopaches), dont la validité dépend de la densité des observations - notamment des sondages d'investigation - et aussi de la complexité de constitution de l'aquifère dont les limites ne sont pas toujours visibles et nettes (limites masquées par des terrains de couverture, toit ou substratum flou par passage de faciès progressif, etc.) ;
- connaissance de la distribution des paramètres d'emmagasinement.

La description synthétique de ces données la plus appropriée est cartographique (exemple : fig. 12).

Cette estimation ne doit pas se réduire au chiffrage d'un volume d'eau global mais doit le répartir dans l'espace en fonction de la structure du réservoir aquifère, de ses variations de puissance et surtout de l'importance et des positions respectives des composantes dont les coefficients d'emmagasinement (S) sont d'ordre de grandeur différents :

- aquifères à nappe libre (y compris par dénoyage d'aquifère captif) :
 $S = 10^{-2}$ ou plus ;
- formations capacitives mais peu transmissives à fonction de "magasin" (*aquitards*) :
 $S = 10^{-3}$;
- aquifères à nappe captive :
 $S = 10^{-4}$.

Faut-il le rappeler : un rabattement d'un mètre dans un aquifère libre peut produire autant d'eau qu'un rabattement de 100 mètres dans un aquifère captif, par unité d'aire influencée.

Il serait donc totalement irréaliste de calculer une réserve en appliquant à tout le volume d'un réservoir aquifère une "porosité utile", c'est-à-dire un coefficient d'emmagasinement d'aquifère à nappe libre. Les volumes de réserve d'eau totale ainsi calculés, souvent énormes dans le cas d'aquifères profonds de grands bassins sédimentaires et chiffrés en milliers voire en dizaines de milliers de milliards de m³, sont impressionnants mais illusoire, car une faible partie seulement peut être extraite en pratique, même en tenant compte de la possibilité de "dénoyer" - donc de rendre libre - une partie peu profonde des aquifères initialement captifs. L'information, par exemple, que les aquifères du Sahara septentrional contenaient 60 000 milliards de m³ d'eau - après l'étude du "Projet ERESS"/UNESCO -, séparée de son contexte, ne constituait pas un message approprié pour les autorités et les responsables du développement économique

Même dans une approche d'abord physique, l'estimation de la réserve globale d'un aquifère doit donc résulter de la sommation de volumes d'eau calculés par zone présumée homogène ou mieux par maille élémentaire, en interprétant les cartes structurales et les cartes d'interpolation des emmagasinevements mesurés ou supputés. Ces chiffrages sont inévitablement frappés d'une assez forte approximation qu'il convient d'exprimer par une fourchette d'incertitude. En pratique, compte tenu des différences de coefficient d'emmagasinement rappelées ci-dessus, c'est la partie libre d'un système aquifère, même si son extension n'est pas prédominante, qui est déterminante.

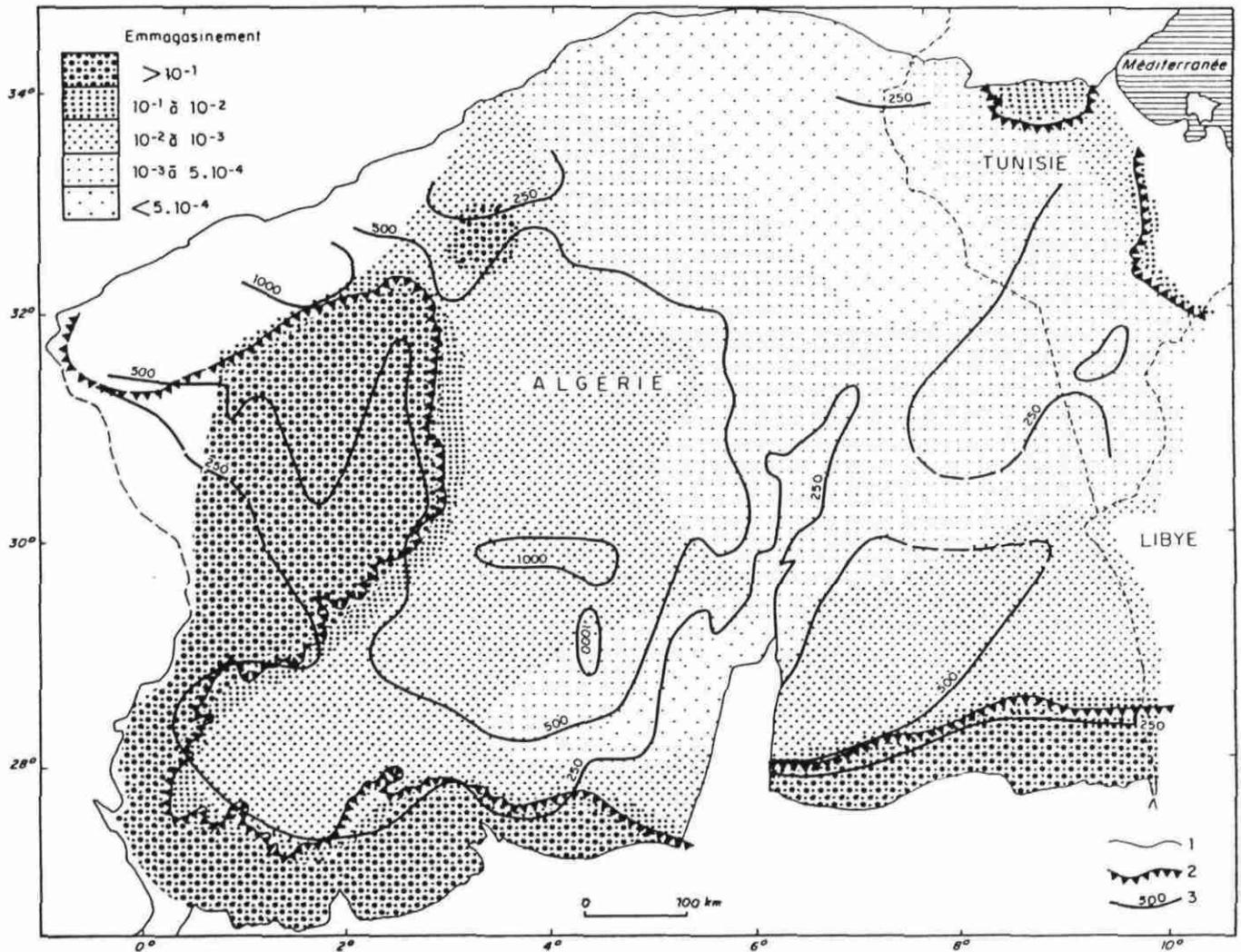


Fig. 12 - Exemple de carte structurale de système aquifère appliquée au calcul de réserve : puissance et emmagasinement du réservoir. Aquifère du Continental intercalaire du Sahara septentrional (Algérie, Tunisie). Source : UNESCO, Projet ERESS, 1972.

1. limites du système aquifère
2. limites du réservoir affleurant ou sous couverture perméable, proches des limites de l'aquifère à surface libre
3. isopaches du réservoir utile, en mètre

Dans un système aquifère à nappe(s) libre(s) périphérique(s) et à nappe(s) captive(s) ailleurs, ces dernières ont surtout une fonction conductrice facilitant grâce à leur forte diffusivité l'exploitation des réserves des nappes libres périphériques ou sus-jacentes (*aquitards*), (cf. fig. 15).

Les volumes de réserve d'eau totale ainsi estimés ne doivent cependant être assimilés tels quels qu'à des ressources non renouvelables théoriques, car elles restent encore incomplètement mobilisables. En pratique, la ressource non renouvelable réelle est indissociable du concept de **réserve exploitable** : c'est bien celle-ci qu'il s'agit d'évaluer, suivant des critères et une démarche exposés plus loin (5.3), puis d'indiquer aux planificateurs.

Intermède :

Evaluer les ressources en eau au sens plein c'est plus que chiffrer ou estimer des grandeurs significatives. C'est aussi les apprécier suivant une échelle de **valeurs**, suivant différents critères d'exploitabilité, d'accessibilité et d'utilité, qui sont tous relatifs aux points de vue des utilisateurs, à leurs moyens et à leurs objectifs, donc nécessairement pluralistes (cf. chap. 1).

C'est bien, par conséquent, la **ressource exploitable** qui doit faire pleinement l'objet d'évaluation. Des indications sur les conditions de maîtrise, d'accès et de mobilisation des eaux, sur les rendements escomptés des aménagements, sur les qualités des eaux, sur les sensibilités aux opérations d'exploitation ou à d'autres impacts, doivent accompagner les informations sur les quantités.

5. ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU EXPLOITABLES

5.1. APPROCHE STRUCTURALE

L'évaluation des ressources **exploitables** offertes dans un territoire défini peut-elle se dégager du dilemme : ou bien baser une sélection unique, mais très simplificatrice, sur des critères d'exploitabilité généraux donnés a priori indépendamment de la diversité des utilisations ou bien comparer toutes les conditions et contraintes des occurrences offertes (à multiples variables) à l'ensemble explicite des demandes, des projets d'utilisation (à multiples critères et à options variées), démarche plus pertinente mais sans unicité de résultat ?

L'analyse des approches pratiquées, dans une optique macro-économique, pour évaluer les ressources en eau exploitables d'un pays ou d'une région, montre qu'en général :

- les critères d'évaluation des quantités d'eau "inexploitables" à exclure sont tantôt uniquement techniques, tantôt technico-économiques, sans cependant dans le second cas se référer à des secteurs d'utilisation explicites, ce qui rend les résultats mal comparables ;
- les démarches privilégient tantôt l'espace (exclusion des bassins non "aménageables"), tantôt le temps (exclusion des tranches d'écoulement de fréquence extrême non régularisables), pour définir la part non maîtrisable des écoulements totaux, sans intégrer les deux motifs d'exclusion ;

- la "ressource exploitable" est définie pour l'essentiel dans une optique d'aménageur et d'exploitant de l'eau-matière première, sans prendre en compte l'idée de conserver une partie des flux naturels, à maintenir dans le milieu pour des raisons écologiques, voire pour des usages in situ, y compris pour conserver les fonctions de dissipation ou auto-épuration des eaux usées retournées, ou encore à réserver pour un pays en aval dans le cas de cours d'eau transfrontière.

L'approche structurale préconisée consiste à relativiser d'abord l'estimation des ressources en eau d'un territoire défini aux conditions de la maîtrise des eaux imposées par les structures naturelles : structure de leur répartition dans l'espace et facteurs physiographiques de leur accessibilité et de leur régulation, structure de leur régime dans le temps. Les ressources en eau "techniquement maîtrisables" ainsi estimées pourraient répondre à la double exigence fixée, en constituant un "tronc commun" des ressources exploitables et utilisables offertes aux évaluations selon des critères économiques plus diversifiés et plus relativisés aux critères des utilisateurs. Cette démarche s'inspire de la procédure classique appliquée pour évaluer les "ressources hydrauliques" en hydroélectricité, en estimant successivement le "potentiel sauvage" ou théorique, le potentiel "techniquement équipable" et le potentiel "économiquement équipable" (ce dernier étant seul présumé sans critères d'évaluation stables) ; la similitude se limite toutefois aux deux premiers stades.

En se basant à la fois et explicitement sur les difficultés ou les obstacles qui empêchent de maîtriser les eaux dans l'espace et dans le temps et en les combinant, on peut appliquer aux flux naturels - "ressources sauvages" - une série de "troncatures" successives, éliminant les écoulements de surface irréguliers des zones dépourvues de site d'accumulation et/ou ceux des fréquences extrêmes non maîtrisables dans tous les cas, ainsi que certains flux d'eau souterraine techniquement inexploitable. C'est ce que résume le schéma de la figure 13.

Une telle démarche apparaît a priori codifiable et objective : ses résultats peuvent être relativement indépendants des opérateurs d'estimation. Elle doit reposer :

- dans l'espace, sur un inventaire des sites de réservoir d'accumulation constructible, des capacités de "surcharge" artificielle d'aquifères, des champs offrant des possibilités d'utilisation directe du ruissellement local, des domaines assujettis à des contraintes limitant les détournements d'eau de surface ou les rabattements de nappe souterraine ;
- dans le temps, sur l'estimation des tranches régularisables des écoulements de surface irréguliers, suivant les méthodes de gestion prévisionnelle de réservoirs, ou sur celle des flux de ruissellement local utilisable, ou encore sur les écoulements souterrains minimaux assez réguliers dans le cas d'aquifères peu capacitifs.

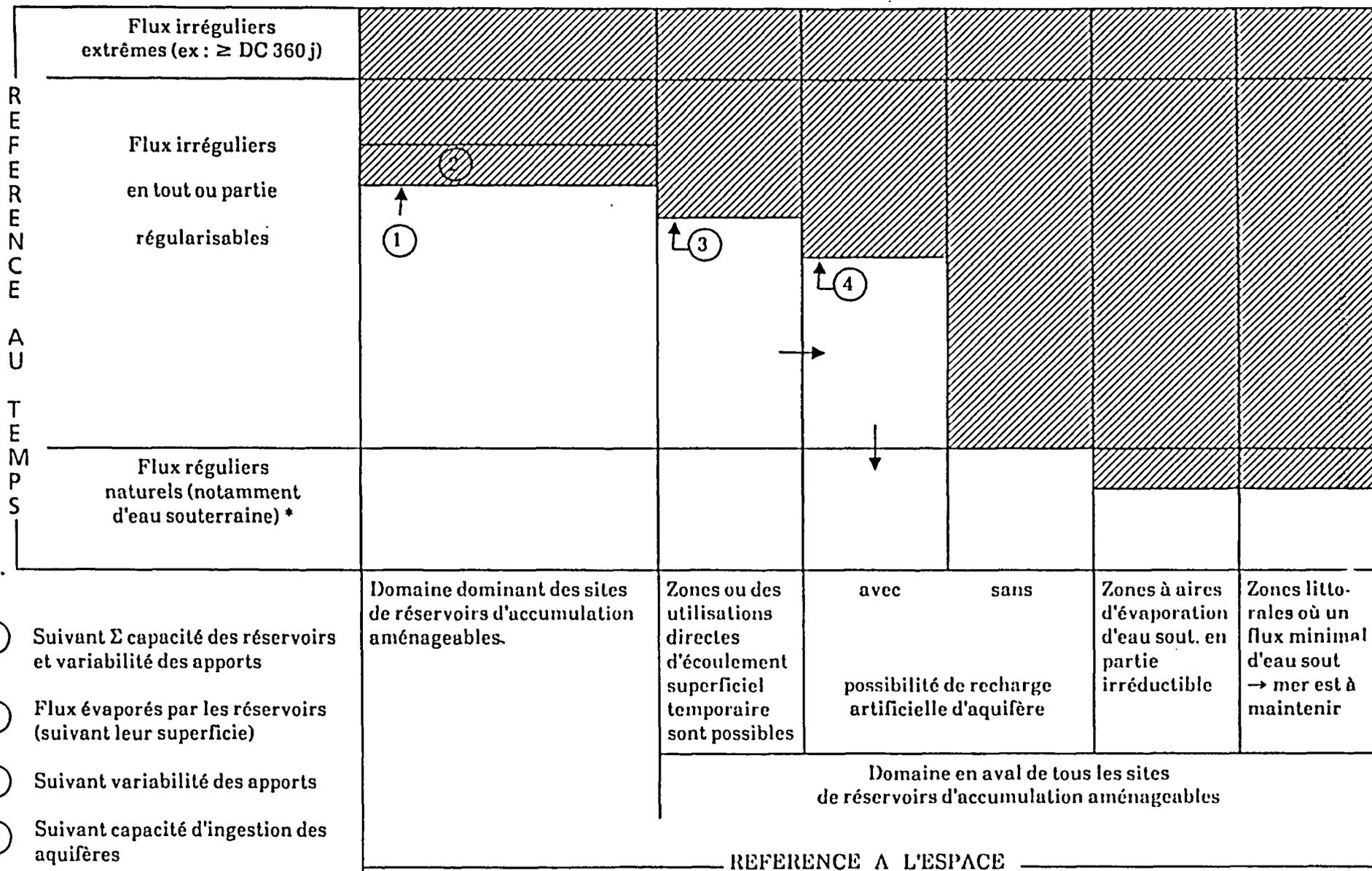
L'estimation de l'écoulement total rapporté à un territoire, par des méthodes d'extension et d'extrapolation en général hasardeuses et laborieuses, ne serait plus du même coup, un objectif d'étude aussi nécessaire.

Naturellement, en toute rigueur, la possibilité technique et la faisabilité économique, voire socio-économique, d'exploiter l'eau ne sont pas indépendantes. La distinction entre des ressources "techniquement mobilisables" et des ressources "économiquement utilisables" est artificielle. Les eaux ne peuvent être exploitables que suivant des critères à la fois techniques (outils et savoir-faire) et économiques, relatifs et évolutifs.

EAU : OCCURRENCES NATURELLES ET RESSOURCES "TECHNIQUEMENT" MOBILISABLES
(ressources en eau renouvelables seules)

 Part inexploitable ("unmanageable") = non-ressource

Fig. 13 - Eau : occurrences naturelles et ressources "techniquement" mobilisables (ressources en eau renouvelables seules)



- ① Suivant Σ capacité des réservoirs et variabilité des apports
- ② Flux évaporés par les réservoirs (suivant leur superficie)
- ③ Suivant variabilité des apports
- ④ Suivant capacité d'ingestion des aquifères

* NB : Flux à réserver non compris

Les ressources en eau : conception, évaluation, cartographie, comptabilité

L'approche structurale esquissée peut néanmoins constituer la première étape des analyses d'évaluation de ressource en eau et faciliter la confrontation de l'offre définie dans son unicité physique à la pluralité des demandes.

5.2. MODÉLISATION ET GESTION PRÉVISIONNELLE : INSTRUMENTS D'ÉVALUATION

Dès lors que l'évaluation des ressources exploitables doit résulter de la comparaison entre les potentialités naturelles offertes (sous diverses conditions et contraintes) et différents ensembles de demandes (ayant leurs propres critères de faisabilité), toutes les dimensions de la ressource et des demandes entrent en jeu : les quantités et leur variation, les localisations, les qualités des eaux, les coûts directs et externes (exprimables monétairement ou non) à comparer aux coûts supportables, etc. Il s'agit en somme de comparer un "modèle d'offre" et un "modèle de demande".

Si l'évaluation ne peut donc se réduire à la seule comparaison quantitative entre les ressources et les demandes, celle-ci n'en est pas moins primordiale et elle ne saurait être seulement globale : les structures propres et les répartitions spatio-temporelles des ressources et des demandes ainsi que leurs interactions sont à prendre en compte. Aussi la comparaison passe-t-elle par des **modélisations** couplées des systèmes de ressource et d'utilisation considérés. Ces modélisations doivent permettre de simuler des scénarios d'aménagement et de gestion prévisionnelle, pour apprécier si les objectifs et les contraintes respectifs sont compatibles suivant les cas.

Il ne peut donc plus exister, à ce stade, d'évaluation unique de ressource en eau exploitable, mais seulement des évaluations relativisées à des plans d'aménagement et d'exploitation des eaux définis, correspondant chacun à tel ou tel objectif de développement et de conservation voulu. Il convient néanmoins que ces plans prennent bien en compte l'ensemble des secteurs d'utilisation (y compris in situ) et des activités génératrices d'impact sur le régime et les qualités des eaux, et non pas seulement certains d'entre eux (par exemple : l'irrigation ou l'alimentation en eau potable). Des évaluations de ressource exploitable du point de vue d'un secteur particulier seraient nécessairement tronquées et occulteraient les éventuels conflits d'allocation. La répartition des ressources, qui tient évidemment compte des différentes facilités de mobilisation doit résulter d'un choix négocié ou arbitré de politique de l'eau (et d'aménagement du territoire) et non d'hypothèses a priori au stade de l'évaluation.

Les modèles de systèmes de ressource, soit de bassins fluviaux, soit de systèmes aquifères, soit mieux couplant les uns et les autres, doivent représenter :

- les structures conductrices (réseau hydrographique, aquifères transmissifs) et capacitives (réservoirs, emmagasinement des aquifères et des formations peu perméables capacitatives - "aquitards" -) ;
- les conditions aux limites et les régimes d'apport et de flux sortants ;
- la répartition interne des flux et des stocks et leur variation naturelle ;
- les contraintes éventuelles fixées (nature et situation) : flux ou niveaux minimaux à conserver, y compris aux limites.

Ces simulateurs doivent être capables de reproduire les réactions du milieu aux actions d'aménagement et d'exploitation : création de réservoirs artificiels, actions sur les flux (dérivations et prélèvements, lachures, retours d'eau, etc.) et sur les stocks (niveaux de lac, de nappe souterraine) aussi bien pour permettre d'estimer l'efficacité de ces actions par rapport à leurs objectifs que de prévoir leurs effets externes. Ils doivent aussi pouvoir reproduire les impacts d'autres activités humaines, indépendamment de l'utilisation d'eau, sur la ressource. Ils doivent enfin fournir les bases physiques de chiffrages prévisionnels de coût.

Les modèles de bassin non globaux, les modèles de simulation hydrodynamique de système aquifère et leurs couplages constituent l'infrastructure de modèles de gestion prévisionnelle servant à simuler des scénarios d'aménagement et d'exploitation déduits de plans de développement et à analyser leurs faisabilité (exemple : fig. 14). La modélisation hydrodynamique et quantitative classique peut maintenant être étendue aux transports et aux phénomènes hydrochimiques donc aux évolutions de paramètres de qualité.

Les techniques de modélisation et les modes d'emploi de ces modèles sont maintenant bien connus. Il sortirait de l'objet de cet essai de les exposer, aussi renvoie-t-on à ce sujet aux ouvrages et autres publications spécialisés (cf. références).

L'évaluation de ressources en eau exploitables suivant des critères explicites n'est cependant pas le but premier des opérations de modélisation et de gestion prévisionnelle réalisées dans le cadre des études de faisabilité de projet ou plus largement de plans directeurs ou de schémas de "planification des eaux". Elle en est un résultat dont la relativité ne doit pas être oubliée. Aussi les ressources exploitables déduites de ces procédures ne sont ni maximales ni optimales a priori. Elles ne sont donc pas conçues pour être sommées. L'agrégation de ressources exploitables évaluées pour différents systèmes de ressources dans un pays n'est pas nécessairement significative, car les critères ne sont pas homogènes d'un système à l'autre s'ils reflètent la variété des objectifs d'utilisation. En outre, ces évaluations ne sont pas immuables.

L'idée qu'une procédure d'évaluation uniforme des ressources en eau exploitables communes à tous les systèmes de ressource d'un territoire permettrait d'aboutir à des résultats homogènes, notamment comparables d'un pays à l'autre, est parfaitement irréaliste. Les ressources exploitables restent par essence sans évaluation unique ni stable possible. D'où, à défaut et dans l'attente d'une généralisation éventuelle d'une démarche partielle telle que celle proposée plus haut (5.1), l'opportunité de s'en tenir dans les tableaux et comptes comparatifs (cf. chap. 5) aux ressources naturelles, seules estimables avec unicité, et à leurs subdivisions sans équivoque (ressources intérieures/extérieures, régulières/irrégulières).

Sélection de références sur les modèles de gestion de ressources en eau :

BACHMAT Y., BREDEHOEFT J. *et al.* (1980) - Groundwater management: the use of numerical models. *Am. Geoph. Un. Wat. Res. Monogr.* 5, 127 p., Washington.

BONNET M. (1978) - Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie. *Thèse doct. ét.*, Université Nancy, BRGM, Doc. 34, publ. 1982, Orléans.

COLAS H., BOCQUILLON C., VALETTE F. (1992) - Modélisation de la gestion des ressources en eau dans les zones littorales méditerranéennes. Application au cas du bassin versant du Lez. *Soc. Hydrot. Fr.*, 22ème Journées de l'Hydraulique "L'avenir de l'eau", Paris, Sept., Question III, 10 p.

DREYFUS A., HUBERT P., RAMAIN P. (1975) - Prolo, modèle de prévision pour l'aménagement et la gestion intégrée d'un grand bassin hydrographique. *La Houille Blanche*, Grenoble, 1, pp. 27-36.

EMSELLEM Y. (1980) - Les modèles de ressource en eau. *Doc. ARLAB*, 49/80, 108 p., Sophia-Antipolis.

HORCHANI A. *et al.* (1988) - Un exemple d'analyse d'un grand système d'eau : le modèle des eaux du Nord de la Tunisie. Actes du 4ème symposium international sur l'analyse des systèmes appliquée à la gestion des ressources en eau, *Féd. intern. contrôle automat./Administr. Hydraulique*, Maroc, Rabat, Oct., 2 vol., 588 p., Rabat.

LEDOUX E. (1980) - Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. *Thèse doct. ing. ENSMP*, Univ. P. et M. Curie Paris, Déc., 235 p.

LOUCKS D.P., KINDLER J., FEDRA K., (1985) - Interactive water resources modelling and model use: an overview. *Water Resources Research*, Fév., vol. 21, n° 2, pp. 95-102.

DE MARSILY G., LEDOUX E., LEVASSOR A., POITRINAL D., SALEM A. (1978) - Modelling of large multilayered aquifer systems: theory and applications. *Journal of Hydrology*, 36, J-34, pp. 1-33. Comporte une étude de cas : modélisation de l'aquifère du Continental terminal du Sahara septentrional en Algérie.

MORABIT B. *et al.* (1988) - Modélisation et simulation de fonctionnement d'un grand système hydraulique au Maroc : le bassin de la Moulouya. Actes du 4ème symposium international sur l'analyse des systèmes appliquée à la gestion des ressources en eau, *Féd. intern. contrôle automat./Administr.*, Hydraulique Maroc, Rabat, Oct., 2 vol., 588 p., Rabat.

SCORY S. (1987) - Integrated modelling of renewable natural resources. The aquatic resources. *ECE/Dir. gen. Science, Research and Development. Forecasting and Assessment in Science and Technology (FAST)*, Occas. papers n° 173, march, 52 p. + annexes, Brussels.

ENCADRÉ 3

RESSOURCE EXPLOITABLE ET SUREXPLOITATION

- **Surexploitation** : exploitation en excédent sur la ressource renouvelable ?

Tout aquifère à réserve appréciable et à productivités favorables permet de prélever des volumes d'eau supérieurs au flux moyen d'apports pendant plus ou moins longtemps. Toute exploitation est normalement en régime de déséquilibre à court terme car les apports sont discontinus et irréguliers. C'est seulement à moyen et long terme que ce déséquilibre, s'il se prolonge, pose problème. Toutefois, ce déséquilibre ne résulte pas seulement de l'inéquation prélèvements > flux de ressource, mais il s'instaure dès que la somme des prélèvements et des flux sortants spontanés excède durablement les apports. La ressource exploitable équivaut alors au maximum de production moyenne annuelle possible sans rupture d'équilibre à long terme, compte tenu des autres contraintes éventuelles.

- **Surexploitation** : exploitation à impacts indésirables.

La surexploitation peut prendre aussi le sens moins quantitatif d'exploitation entraînant des conséquences préjudiciables, soit aux exploitants eux-mêmes (incidences sur la reproductibilité de la ressource en quantité ou en qualités), soit à des tiers (non respect de contraintes externes), indépendamment du caractère déséquilibré ou non du régime d'exploitation.

- Ne pas confondre la "surexploitation", à connotation négative :
 - avec l'exploitation temporaire de réserve d'un aquifère à ressource renouvelable, en utilisant à bon escient sa capacité régulatrice ;
 - ni avec l'exploitation "minière" des ressources non renouvelables, nécessairement en régime de déséquilibre à long terme (cf. infra 5.4).

5.3. RESSOURCES RENOUVELABLES EXPLOITABLES EN EAU SUPERFICIELLE ET EN EAU SOUTERRAINE

Dans l'optique précédente, une relativité particulière affecte les évaluations respectives et distinctes de ressources renouvelables exploitables en eau superficielle et en eau souterraine qui sont interdépendantes.

Aux critères d'exploitabilité internes, propres aux exploitants respectifs de chaque sous-système de ressource, s'ajoutent des contraintes externes réciproques :

- l'exploitabilité des eaux souterraines peut être limitée par la conservation d'écoulements de surface tributaires, y compris de sources, notamment de bas-débits (débits "réservés" ou "minimaux acceptables") ;
- l'exploitabilité des eaux superficielles notamment par régularisation peut être limitée dans les cas où une partie des écoulements irréguliers (crue) participe à l'alimentation de nappes souterraines subordonnées et exploitées que l'on veut conserver (ce cas n'est pas rare en zone semi-aride).

En somme : "l'exploitation d'une ressource peut en gêner une autre".

L'évaluation de la ressource en eau souterraine exploitable ne consiste pas seulement à exclure les flux "inexploitables" du point de vue des utilisateurs (difficultés d'accès et de productivité, coûts excessifs, défauts de qualité, etc.) ou du fait de contraintes externes (conservation de débits sortant ou de stabilité du sol en cas de risque de subsidence). Elle présente un aspect spécifique lié à la double fonction conductrice et capacitive des aquifères, qui offre la possibilité pratique de prélever plus ou moins temporairement des volumes d'eau supérieurs à ceux des apports naturels : cette capacité régulatrice naturelle des aquifères est d'ailleurs bien un avantage essentiel que l'évaluation doit prendre en compte puisqu'elle permet (sans aménagement ad hoc, à la différence de la mobilisation des eaux de surface irrégulières) une certaine liberté du régime d'exploitation ; mais, en contrepartie, elle rend les aquifères, surtout lorsque leurs productivités sont élevées, vulnérables au risque de "surexploitation", au sens de déséquilibre persistant (cf. encadré 3).

L'évaluation de la ressource exploitable en eau souterraine vise alors à fixer un plafond aux prélèvements moyens annuels supportables sans rupture d'équilibre, lorsque les autres contraintes internes ou externes ne suffisent pas à prévenir ce risque.

En dernière analyse, les ressources exploitables en eau superficielle et en eau souterraine ne peuvent être évaluées qu'ensemble, en fonction d'une répartition arbitrée (voire optimale) de la ressource en eau totale et plus particulièrement de la ressource régulière, entre une part dévolue aux prélèvements d'eau en aquifères et une part dévolue aux prises d'eau en surface. Cette répartition dépend largement de la structure des utilisations : des utilisations dispersées (alimentation rurale, irrigation individuelle, etc.) prédominantes faisant appel préférentiellement aux eaux souterraines, rendront les ressources en eau souterraine plus exploitables que si prédominent des utilisations concentrées (alimentation de grandes villes, irrigation collective, industries à forte demande) devant faire appel aux eaux fluviales (au fil de l'eau ou régularisées) et engendrant des contraintes de conservation des écoulements superficiels, parfois renforcées par des utilisations in situ.

Toutefois dans cette évaluation jumelée des ressources en eau superficielle et en eau souterraine exploitables dans un même système de ressource, il convient, comme on l'a déjà indiqué (chap. 1, 3), de tenir compte du fait que les retours d'eau après une première utilisation permettent des "remobilisations" pour de nouvelles utilisations, et que cela autorise des doubles-comptes partiels de flux d'eau souterraine et de flux d'eau superficielle a priori non additifs. Ainsi généralement les utilisations d'eau d'origine souterraine sont suivies de retour aux cours d'eau ; réciproquement, beaucoup d'utilisations d'eau mobilisées en surface conduisent à des retours aux aquifères (périmètres irrigués, pertes des réseaux de distribution urbain). C'est en somme la structure des utilisations qui rend une certaine additivité aux composantes superficielle et souterraine de la ressource en eau exploitable.

5.4. ÉVALUATION DES RESSOURCES NON RENOUVELABLES EXPLOITABLES

C'est dans le cas des ressources en eau non renouvelables que l'écart est le plus grand entre ressource théorique - réserve d'un aquifère à renouvellement minimale (cf. supra 4) - et ressource exploitable, c'est-à-dire la part "extractible" de la réserve.

L'exploitabilité de la réserve d'un aquifère suivant une stratégie minière, c'est-à-dire d'épuisement à terme, est à apprécier de deux points de vue :

- celui des exploitants bénéficiaires, similaires à des "opérateurs miniers", comparant les coûts aux bénéfices (rapportés à toute la durée d'exploitation), en sachant qu'ici le résultat n'est pas simplement une production d'eau, mais celui de l'activité utilisatrice de l'eau (les agents exploitants et usagers sont généralement confondus) ;
- celui des autorités responsables de la politique de l'eau (soucieuses des conséquences socio-économiques prévisibles au terme de la phase de développement non durable permis par cette exploitation, analogue aux conséquences de la fin d'une exploitation minière), et de la politique d'environnement (soucieuses d'éventuels impacts).

Les contraintes d'exploitabilité sont ici de plusieurs sortes :

- contraintes technico-économiques d'accessibilité et de production :
 - coûts d'investissement (forage et appareils de production) maximaux acceptables, fixant notamment une profondeur maximale du réservoir à atteindre ;
 - coûts de production maximaux acceptables fixant une profondeur maximale possible des niveaux de pompage (variable notamment suivant le coût de l'énergie) ;
- contrainte de localisation : restriction de possibilité d'accès et d'occupation du sol. Certaines zones peuvent être à exclure ;
- contraintes de conservation des qualités de l'eau pouvant limiter les abaissements de niveau (risque de déterminer des déplacements d'eau salée, etc.) ;

- contraintes externes de conservation de flux d'émergence (sources, captages gravitaires traditionnels) traduites par des limitations d'abaissement de niveau ;
- contraintes externes "géopolitiques" dans le cas (fréquent) où l'aquifère est partagé entre plusieurs pays : prévenir la propagation d'influence dans un pays limitrophe peut imposer de limiter les abaissements de niveau dans une zone frontalière plus ou moins étendue (y compris dans le cas où une concertation internationale règle une répartition équitable des influences transfrontières).

La profondeur maximale de pompage "possible" est la première contrainte qui détermine la réserve extractible et sa prise en compte est la première réduction à apporter au calcul de réserve théorique totale (supra 4). Elle s'applique à tous les corps constituant des systèmes aquifères : aux aquifères libres ou captifs comme aux "aquitards" (fig. 15). Ce faisant, la profondeur maximale des niveaux dynamiques praticable ne doit pas être généralisée à toute l'étendue des réservoirs ou des mailles de modèles, puisque les rabattements de niveau décroissent en fonction des distances des ouvrages de production. La réserve ainsi calculée est encore excessive, mais les volumes d'eau réellement extractibles dépendent des plans d'exploitation (nombre d'ouvrages, etc.) et du temps. En cas de modélisation (cf. infra b) des relations analytiques permettent de calculer les rabattements "moyens" par maille en fonction des rabattements maximaux dans les ouvrages de production.

L'évaluation des réserves exploitables, suivant ces différentes contraintes fait l'objet de deux démarches distinctes dans les pratiques d'études :

- a) Une approche volumétrique relativement exhaustive, mais statique, à l'instar de l'évaluation d'un "gisement" minier exploitable suivant la géométrie du corps minéralisé et la teneur ... Les contraintes d'accessibilité, de profondeur maximale de pompage (uniformisée), etc. sont prises en compte indépendamment de tout plan ou programme d'exploitation, donc sans référence à une durée. Exemple : l'estimation des réserves des principaux aquifères sédimentaires profonds d'Arabie Saoudite, opérée dans les années 1980 (ABDERRAHMAN *et al.*, NEULAND, 1988). En tablant sur des rabattements supplémentaires de 20 m par rapport aux niveaux actuels, sur toute l'étendue des zones à nappe libre des principaux aquifères des différentes "Agriculture Planning Units" du pays, les réserves d'eau souterraine exploitables par déstockage ont été estimées globalement à 553 milliards de m³ d'eau, suivant le mode de calcul suivant : $GW = \sum_{i=1}^n A_i \cdot h_i \cdot n_i$

où :

GW : volume d'eau souterraine extractible en 10⁹ m³

A_i : aire de chaque maille élémentaire _i en km²

h_i : hauteur aquifère moyenne dans la maille _i en état initial, en km

n_i : porosité effective moyenne de l'aquifère dans la maille _i

n : nombre de mailles ("elemental horizontal areas").

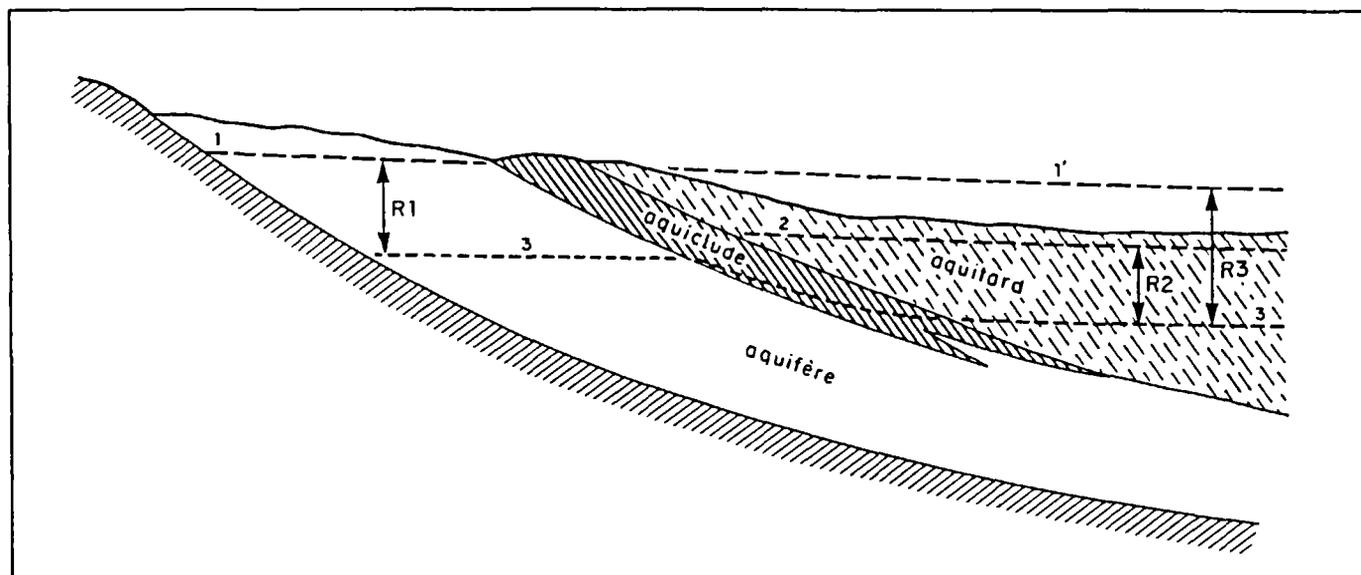


Fig. 15 - Réserves d'eau souterraine exploitables dans un bassin sédimentaire

R1	:	réserve exploitable par dénoyage d'aquifère à surface libre ($S \sim 10^{-2}$)
R2	:	réserve exploitable par dénoyage d'un "aquitard" drainé par dépression de l'aquifère captif contigu ($S \sim 10^{-3}$)
R3	:	réserve exploitable par dépression de l'aquifère captif ($S \sim 10^{-4}$)
1	:	surface piézométrique naturelle de l'aquifère libre
1'	:	surface piézométrique naturelle de l'aquifère captif
2	:	surface piézométrique naturelle de l'"aquitard"
3	:	surface piézométrique abaissée à la profondeur maximale estimée praticable

La réserve statique ainsi calculée est présentée comme une donnée globale préalable aux options du planificateur d'exploitation, notamment au choix de sa durée dont il peut déduire les débits de production à programmer, de la même manière qu'une production minière ou pétrolière. Ainsi, dans l'exemple précédent d'Arabie Saoudite, une relation a été formulée entre les débits de production totaux annuels et la durée de production possible pour chaque aquifère et globalement (fig. 16).

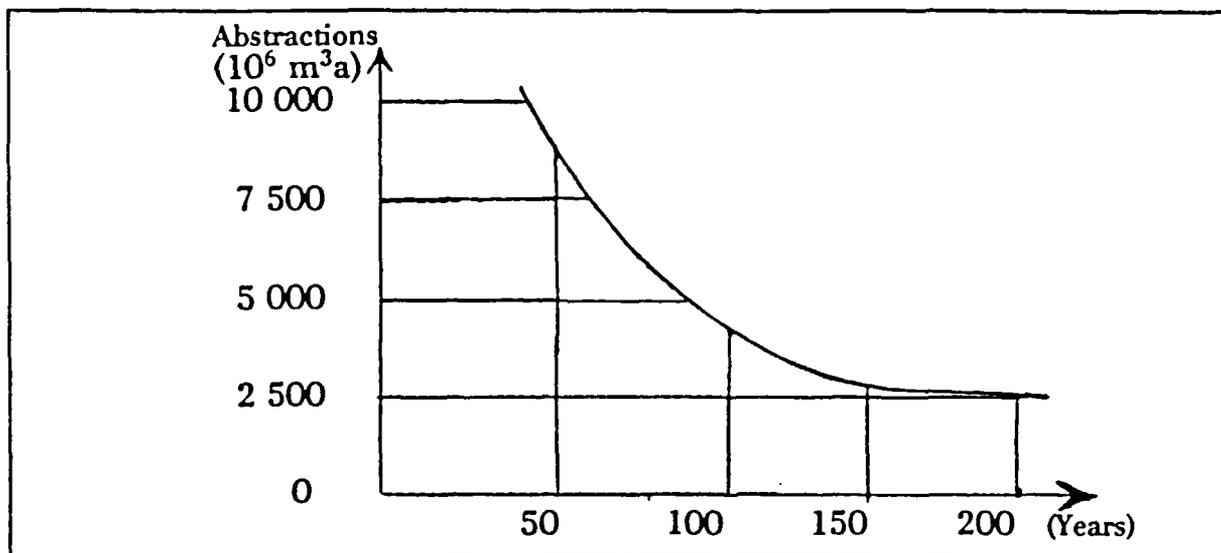


Fig. 16 - Relation entre les prélèvements totaux d'eau souterraine ("*abstractions*") et la durée de production possible ("*life-time of groundwater*") pour l'ensemble des réservoirs aquifères en Arabie Saoudite, d'après H. NEULAND, 1988

Cette approche maximisante tend cependant à estimer plutôt une réserve exploitable potentielle, donc à surestimer la ressource non renouvelable exploitable.

- b) Une approche hydrodynamique, appuyée sur un modèle de simulation du système aquifère (cf. supra 5.2), qui étudie les faisabilités comparées de différents programmes ou scénarios d'exploitation de durée fixée, déduits eux-mêmes de projections de "besoins" en eau impliqués par des plans de développement socio-économique. Cette approche par la demande et non plus par l'offre n'a donc pas pour objet direct d'évaluer des volumes exploitables qui doivent alors être déduits de la cumulation des prélèvements projetés, et qui sont donc relatifs aux horizons choisis. Cette approche, sans unité de résultat (suivant la multiplicité des scénarios projetés) tend ainsi à sous-estimer la ressource exploitable en la surbordonnant à une durée dépendant seulement de l'horizon de projection de la demande choisi.

D'une certaine manière la première démarche s'apparente à l'approche structurale d'évaluation des ressources exploitables renouvelables envisagée plus haut (5.1), tandis que la seconde correspond plutôt à l'approche par modélisation et gestion prévisionnelle décrite ensuite (5.2).

Néanmoins, ces deux approches ne sont pas exclusives et elles pourraient être complémentaires. Leur conjonction conciliant l'exhaustivité et l'approche par l'offre de la première (chiffrage de volumes absolus) et l'adaptation de la seconde à des plans d'exploitation faisables paraît possible et opportune. Elle pourrait consister à utiliser les modèles de simulation pour calculer les volumes maximaux extractibles en respectant les contraintes imposées.

En résumé, l'évaluation des ressources non renouvelables exploitables comprend les phases suivantes :

- choix des réservoirs aquifères à volume présumé assez considérable et à taux de renouvellement présumé assez minime ($\leq 0,01$), sur la base des conditions hydrogéologiques (cf. supra 4), pour offrir des ressources non renouvelables ;
- construction de modèle de simulation hydrodynamique en s'attachant particulièrement à la représentation des structures et des paramètres capacitifs (emmagasinement), et à la reproduction de régime transitoire à long terme ; vérification par le modèle de l'ordre de grandeur du taux de renouvellement global ;
- identification et expression des contraintes et des critères d'exploitabilité. Adaptation du modèle à leur prise en compte ;
- conception de scénarios d'exploitation contrastés, en durée et intensité de production, correspondant essentiellement à des projets (compatibles avec les potentialités agricoles, les hypothèses de croissance de demandes en eau, les capacités d'investissement, etc.), mais comprenant au moins un scénario maximisant les productions à très long terme ;
- simulation des différents scénarios par le modèle, pour éprouver leur faisabilité pratique (compatibilité avec les conditions physiques de l'aquifère) et identifier leurs impacts respectifs à comparer aux contraintes ;
- chiffrage des volumes d'eau exploitables suivant les scénarios respectant les contraintes, notamment en maximisant les productions.

Pas plus que les ressources en eau renouvelables exploitables, les ressources non renouvelables n'ont ainsi d'unicité d'évaluation. Toutefois, elles peuvent s'exprimer :

- soit par une fourchette de volumes d'eau productibles en référence à un horizon fixé, convertis en production moyenne annuelle au cours de la durée correspondante (ce qui n'exclut pas des modulations possibles),
- soit par une fourchette de volumes d'eau totaux extractibles en référence à un abaissement régional maximal admissible en stade final,

en se basant dans les deux cas sur des scénarios et des plans d'exploitation (dispositif de forage et de pompage entretenus) réalisables.

L'évaluation des ressources non renouvelables est donc, elle aussi, indissociable d'exercices de gestion prévisionnelle et du choix de stratégie d'exploitation.

5.5. RESSOURCES EN QUALITÉ

A la différence des jeux de caractéristiques physico-chimiques et biologiques des eaux qui les déterminent mais auxquels elles ne se réduisent pas, les **qualités** de l'eau sont relatives aux critères d'usage, plus ou moins formalisés par des normes. Ce sont des **potentiels fonctionnels** nécessairement diversifiés puisque les différents usages appliquent chacun des fonctions de l'eau spécifiques. Les qualités sont donc bien l'objet d'évaluation et non pas seulement de description

analytique. Cette évaluation résulte de l'appréciation de compatibilité entre les diverses caractéristiques offertes et celles demandées, avec différents degrés d'exigence, assortis éventuellement de risque de défaillance tolérable, par les différents usages, en général groupés par grand secteur d'utilisation : collectivités à forte composante domestique (demande en eau potable), irrigation, principales branches industrielles (l'ensemble des industries ne constitue pas un secteur de demande en qualité homogène du fait de la grande diversité des usages : refroidissement, lavage, transport, processus de fabrication, incorporation au produit, etc.).

Les qualités se définissant suivant des paramètres et des critères multiples, elles peuvent être évaluées :

- soit comme qualité particulière relative à un secteur d'utilisation défini, donc à ses seules exigences ou normes : par exemple la potabilité ou l'aptitude à l'irrigation (pour une culture et un sol donnés) ;
- soit comme qualité générale rapportée à l'ensemble des utilisations. En ce cas l'évaluation doit se référer soit à une échelle de qualité ordinale mettant en correspondance des gammes de paramètres et une hiérarchie d'utilisations plus ou moins détaillée, soit à une "grille de qualité" croisant deux gammes d'indicateurs de qualité multi-paramétriques dans laquelle se répartissent les principales utilisations, sans hiérarchie aussi simple.
Exemple : la grille de qualité générale de l'eau préconisée par la Commission des Communautés Européennes, qui croise une gamme d'indicateur de salinité et des classes dont les valeurs d'une vingtaine de paramètres physiques, chimiques, biologiques ou organoleptiques, définissent les limites (tabl. 3.3).

Dans les deux cas les classes de qualité sont "emboîtées" : l'eau d'une classe de qualité donnée satisfait tous les usages demandant une qualité égale ou inférieure, mais non ceux requérant une qualité supérieure. Cependant, les exigences ou normes des divers usages pour chaque paramètre de qualité ne varient pas toutes dans le même sens, ce qui ne permet pas une hiérarchisation simple et complique la construction d'une grille. Ainsi certaines normes d'usage industrielles peuvent être plus exigeantes que les normes de potabilité. Néanmoins, l'évaluation de qualité générale est à exprimer le plus commodément par l'appartenance à une classe de qualité définie dans une grille.

Naturellement on peut concevoir des classifications plus simples, mais moins pertinentes, basées sur un nombre réduit de paramètres, voire un seul tel que la salinité ... A l'extrême la distinction entre eau douce et eau salée - suivant un seuil conventionnel - est le degré le plus élémentaire d'une classification de qualité.

Une qualité qualifie l'eau d'un site défini à un moment donné. Les qualités ne se globalisent pas ni ne se prêtent à des "moyennes". Localement, sur la base d'analyse de variation naturelle de composition paramétrique assez ample pour modifier la classe de qualité attribuée, on peut seulement définir la qualité la plus fréquente et éventuellement l'amplitude de variation des paramètres les plus déterminants. A l'échelle régionale l'évaluation reposera sur les essais d'interpolation des classements d'eau locaux, exprimés par des cartes de qualités (cf. chap. 4), soit de qualités spécifiques, soit de qualité générale, traitant séparément en général des eaux superficielles ou des eaux souterraines (cf. encadré 4).

QUALITÉ GÉNÉRALE 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	2 S2 EAU INDUSTRIELLE eau potable (traitement poussé)	3 S2 Irrigation
	3	1A S3	1B S3 BAIGNADE LOISIRS POISSONS (vit et se reproduit normalement)	2 S3 Abreuvement des animaux	3 S3 AUTOEPURATION NAVIGATION REFROIDISSEMENT
	4	1A S4	1B S4	2 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)

	S0	S1	S2	S3	S4
1 Conductivité Siemens à 20°C	400	750	1 500	3 000	> 3 000
2 Dureté totale * française	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
5 Température	< 20°	20 à 22°	22 à 25°	25 à 30°
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 %	mieux aérée à maintient 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
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)				
13 Saprobies	oligosaprobe	β mesosaprobe	α mesosaprobe	Polysaprobe
14 Écart de l'indice botanique par rapport à l'indice normal (3)	1	2 ou 3	4 ou 5	6 ou 7
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 mvt)	30 à 70 (m dec < 1 mvt)
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 chloroforme 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 permise 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
25 Coliformes /100 ml		< 5 000		
26 Esch. coli /100 ml		< 2 000		
27 Strept. fec. /100 ml				
28 Radioactivité	catégorie I du SCPRI		catégorie II du SCPRI	

(1) C.A.S. = $\frac{Na \sqrt{T}}{\sqrt{Ca} + Mg}$ tenueurs en ml/l
(2) La teneur en O₂ dissous est impérative

(3) L'indice normal est supposé égal à 10 s'il n'a pas été déterminé
(4) La teneur en MES ne s'applique pas en période de hautes eaux

Tabl. 3.3 - Grille de qualité des eaux de la Commission des Communautés Européennes

Toutefois, ces évaluations s'appuient alors sur les grandeurs spatiales respectives (longueurs de cours d'eau, aires de nappe souterraine) supports de classement en qualité, sans être pondérées par les flux correspondants, ce qui n'est pas directement possible. Une quantification des ressources en qualité est cependant concevable mais sur la base d'unité spécifique, comme on le verra à propos de la comptabilité des ressources (chap. 5).

Enfin, l'évaluation régionale des qualités des eaux peut aussi procéder d'une comparaison entre un état réel actuel et un état de référence antérieur présumé soit naturel soit différemment transformé (pollué). Elle vise alors à apprécier soit un degré de dégradation (de "perte de qualité") imputable à des pollutions directes ou induites, exprimé par des déclassements de parties de cours d'eau ou de nappes souterraines identifiées, soit au contraire des améliorations résultant d'efforts de "lutte contre les pollutions" (dont l'efficacité est par là même mesurée), traduites par des reclassements.

En résumé, l'évaluation des qualités des eaux d'un territoire procède par les étapes suivantes :

- collecte des données analytiques sur les paramètres de qualité d'eau superficielle ou souterraine d'origine bien identifiée (situation et date). Critique éventuelle et homogénéisation ;
- extension de ces données sous forme de chroniques de variation dans le temps et d'interpolation spatiale (cartes paramétriques "hydrochimiques" de réseau hydrographique ou de nappe souterraine) ;
- construction ou adoption d'une échelle ou d'une grille de qualité appropriées ;
- classement des eaux (localisées ou de zones présumées assez homogènes) suivant leur qualité générale, en appliquant la grille.

ENCADRÉ 4

QUALITÉ DES EAUX SUPERFICIELLES ET DES EAUX SOUTERRAINES

Les qualités des eaux superficielles et des eaux souterraines ne sont généralement pas évaluées sur la base d'une classification commune, moins parce que les unes et les autres seraient dévolues a priori à des utilisations distinctes (l'eau superficielle plutôt à l'industrie ou à l'agriculture, l'eau souterraine plutôt aux collectivités), car ce n'est jamais aussi simple, que parce que les paramètres de qualité les plus déterminants diffèrent : les indicateurs synthétiques tels que DBO, DCO(*) ou matières en suspension (MES) ne touchent que l'eau superficielle, la dureté et les métaux (Fe, Mn et certains éléments-traces "micropolluants") comptent davantage pour l'eau souterraine. Néanmoins certains paramètres jouent dans les deux cas (salinité, polluants organiques, etc.).

Par ailleurs :

- les qualités des eaux superficielles sont plus variables dans le temps et nécessitent des références temporelles homogènes (généralement les périodes de basses eaux) mais sont plus faciles à interpoler dans le réseau hydrographique ;
- les qualités des eaux souterraines sont plus stables dans le temps mais plus difficiles à interpoler : les variations dans l'espace sont tantôt continues, tantôt discontinues, et souvent tridimensionnelles, ce qui limite l'expression cartographique.

(*) Demande biochimique et demande chimique en oxygène.

CHAPITRE 4 : CARTOGRAPHIE

En matière de ressource en eau la cartographie a deux fonctions :

- elle est d'abord un instrument d'évaluation, notamment pour les procédures d'extrapolation spatiale et de régionalisation (cf. chap. 3) ;
- elle est ensuite un mode d'expression d'information.

C'est cette seconde fonction que l'on considère ici.

Le premier objet de la cartographie appliquée aux ressources en eau est de permettre leur comparaison aux demandes en eau actuelles ou potentielles projetées, au plan spatial. Il s'agit de décrire une géographie des ressources sous une forme compatible avec celle des demandes, en sachant que ces dernières sont soit extensives (agriculture pluviale ou irriguée), soit localisées, d'implantation fixe ou plus ou moins flexible dans l'avenir.

La cartographie privilégie nécessairement la représentation des variables spatiales et régionalisables qui décrivent les ressources, notamment leurs quantités, et elle ne peut se référer qu'à des états moyens, fréquentiels définis ou momentanés des variables temporelles - sauf sous la forme de cartogrammes(*) spécifiques -.

Du fait de la variété des références spatiales des différentes informations utiles sur les ressources en eau - même en ne s'en tenant qu'aux informations quantitatives - et des échelles(**) auxquelles leur cartographie peut être significative, une "carte des ressources en eau" unique et synthétique n'est pas envisageable. Seules des cartes spécifiques sont possibles et visent chacune à répondre à un besoin d'information défini.

Néanmoins les performances des "Systèmes d'Information Géographiques" (SIG) modernes et des cartographies assistées par ordinateur qu'ils permettent, peuvent faciliter la comparaison multidimensionnelle et dynamique entre les ressources et les demandes en eau.

(*) Disposition sur une carte de graphiques représentant des variables temporelles ou des histogrammes de fréquence, par exemple les débits moyens mensuels d'un cours d'eau, en différents points (fig. 26).

(**) cf. encadré 5.

1. LES INFORMATIONS CARTOGRAPHIABLES SUR LES RESSOURCES EN EAU

De même que l'évaluation des ressources en eau se base sur le traitement de données hydrologiques, mais ne s'y réduit pas (cf. chap. 3), la cartographie thématique consacrée aux ressources en eau ne se confond pas avec les cartographies scientifiques hydroclimatologiques, hydrologiques ou hydrogéologiques, sur lesquelles elle s'appuie. Il s'agit d'une cartographie offrant des informations adaptées aux besoins des projeteurs ou des planificateurs de l'aménagement et de la gestion des eaux.

Du point de vue de leurs références spatiales et par conséquent des formes que peut prendre leur représentation cartographique, les informations sur les ressources en eau se répartissent en cinq groupes dont les "implantations"(*) diffèrent :

- descriptions structurales d'implantation généralement linéaire, parfois ponctuelle ;
- variables régionales continues (paramètres) d'implantation zonale ;
- variables discontinues (paramètres) caractérisant les réseaux hydrographiques, d'implantation linéaire, ou les aquifères, d'implantation zonale ;
- caractères typologiques ou classes ordinales, d'implantation zonale ou linéaire ;
- indicateurs caractéristiques globaux de systèmes de ressource, d'implantation zonale.

1.1. DESCRIPTION DES STRUCTURES

- Configuration et limites des systèmes et sous-systèmes de ressources qui constituent les unités d'évaluation pertinentes : bassins hydrographiques et sous-bassins, systèmes aquifères régionaux.
- Structures internes conductrices, accumulatrices ou dissipatrices des bassins versants et des aquifères, réseau hydrographique (cours d'eau permanents ou temporaires), lacs, deltas intérieurs et plans d'eau permanents ou temporaires de dépressions fermées, en zone aride ; lieux de connexion privilégiée entre eaux superficielles et eaux souterraines : sources majeures, pertes de rivière.

(*) Caractère dimensionnel : les implantations sont ponctuelles (0 dimension), linéaires (1 dimension) ou zonales (2 dimensions), cf. J. BERTIN, 1973.

- Localisation (et altitude) de sites favorables à l'aménagement de maîtrise des eaux (sites de barrage-réservoir, etc.).

Ces représentations sont significatives à toutes échelles, avec seulement des différences de précision.

1.2. VARIABLES RÉGIONALES CONTINUES, APPLICABLES A TOUT OU PARTIE D'UN TERRITOIRE

- Flux moyen (ou de fréquence annuelle spécifiée) de ressource pluviale par unité de surface.
- Flux moyen (ou de fréquence annuelle spécifiée) d'apport ou "écoulement potentiel" (\equiv précipitations efficaces) par unité de surface. La représentation de sa répartition spatiale sert surtout ici à visualiser l'origine de l'écoulement formé dans un bassin et à permettre d'interpoler l'écoulement d'un sous-bassin - sous réserve toutefois de sa relativité à des aires de référence d'une taille donnée, en zone aride et semi-aride surtout - mais non à décrire des "ressources spécifiques" locales attribuables à chaque unité de surface élémentaire.
- Flux moyen par unité de surface d'apport aux aquifères à nappe libre par infiltration d'une part des précipitations efficaces (en zone humide). La représentation de sa distribution spatiale, liée aux conditions géologiques et morphologiques, ainsi qu'au sol et à la végétation, visualise la genèse de l'écoulement régulier dans les bassins.

La cartographie de ces variables est significative surtout à assez petite échelle, à l'instar de la cartographie climatologique.

1.3. VARIABLES RÉGIONALES DISCONTINUES

- Paramètres descripteurs du réseau hydrographique :
 - classes d'écoulement moyen ou de fréquence spécifiée, notamment de débit d'étiage ou écoulement régulier ;
 - classes d'altitude.
- Paramètres descripteurs des aquifères :
 - classes de productivité probable (aquifères entiers ou par zone) ;
 - classes de profondeur d'accès ;
 - classes de profondeur de puisage.

Leur cartographie est significative à moyenne ou petite échelle.

1.4. CARACTÈRES SE RÉFÉRANT A DES TYPOLOGIES OU CLASSIFICATIONS ORDINALES

- Descripteurs du réseau hydrographique :
 - ordre de variabilité (intra-annuelle, pluriannuelle) de l'écoulement) ;
 - type de régime d'écoulement (saisonnier, pluriannuel) ;
 - degré d'activité ou de dégradation fonctionnelle (en zone aride ou semi-aride) ;
 - classe de qualité de l'eau (d'après une grille ad hoc).
- Descripteurs des aquifères :
 - type structural déterminant la probabilité de résultat positif des ouvrages de captage (milieu continu ou discontinu) ;
 - variabilité de profondeur des niveaux ;
 - type de régime de fluctuation déterminant le degré de sensibilité ou de "résistance" aux sécheresses ;
 - classe de qualité de l'eau (d'après une grille ad hoc).

La cartographie de ces caractères est significative à diverses échelles.

1.5. INDICATEURS CARACTÉRISTIQUES DE SYSTÈMES DE RESSOURCE (cf. chap. 6)

Cartographie à petite échelle.

ENCADRÉ 5

A PROPOS D'ÉCHELLES

Dans le langage courant les expressions "à grande" ou "à petite échelle" s'appliquent à l'ordre de grandeur de l'étendue ou de l'ampleur d'un phénomène, voire même de la durée - on parle de "grande échelle de temps" pour désigner la longue durée -.

Cela entraîne souvent les utilisateurs ou les projeteurs de carte, sinon les cartographes eux-mêmes, à un contresens dans la qualification des échelles des cartes, où "grand" et "petit" s'appliquent en toute rigueur au rapport d'échelle et non au dénominateur. C'est d'ailleurs bien là le sens initial du terme échelle qui ne doit pas être pris comme synonyme d'ordre de grandeur. Faut-il rappeler qu'un plan de ville est à grande échelle et qu'un planisphère est à petite échelle ? Que plus l'échelle est grande, plus le territoire représenté est petit, mais plus cette représentation peut être détaillée, tandis qu'au contraire les descriptions macroscopiques et globalisantes de phénomènes hydrologiques sont mieux représentables à petite échelle.

2. CARTES STRUCTURALES

2.1. CARTOGRAPHIE DES BASSINS ET RÉSEAUX HYDROGRAPHIQUES (STRUCTURES D'ÉCOULEMENT ET D'ACCUMULATION D'EAU SUPERFICIELLE)

Par rapport au tracé purement topographique des réseaux hydrographiques représenté par les cartes géographiques à toutes échelles, il s'agit de le compléter :

- par le tracé des limites des bassins et sous-bassins, qui constituent des champs d'estimation de ressource ;
- par des informations structurales sur le réseau hydrographique : altimétrie des principaux cours d'eau et plans d'eau, types morphologiques (encaissement), seuils (rapides, chutes), volumes des lacs, etc.

En fait, la représentation du réseau hydrographique est inséparable de sa classification quantitative ou typologique, traitée ci-après (§ 5).

La structure du réseau hydrographique peut aussi être schématisée par un **graphe** des liaisons entre les sous-bassins et bassins partiels qui composent un bassin fluvial, donc des connexions entre les cellules pouvant être les champs de "bilans" d'eau élémentaires et d'estimation partielle de ressource (cf. fig. 1 et 2 du chap. 2 et fig. 22).

2.2. CARTOGRAPHIE DES SYSTÈMES AQUIFÈRES

Les cartes hydrogéologiques dressées à des échelles variées sont sujettes à une nombreuse littérature qui dispense de s'étendre ici sur leur contenu et les méthodes de leur établissement^(*). Elles donnent une large place aux données structurales qui conditionnent la formation, la circulation et l'accumulation des eaux souterraines. Il est possible de traduire ces données en informations cartographiables directement utiles pour l'évaluation des ressources en eau souterraine exploitables :

- d'une part en zonalités continue ou discontinue de caractères qui conditionnent fortement l'exploitabilité des eaux souterraines :
 - types de comportement des différentes formations aquifères ou non aquifères individualisées (et affleurantes), basés plus ou moins sur des classes quantifiées de paramètres (perméabilité ou transmissivité, porosité ou emmagasinement) qui déterminent la conductivité et la capacité des aquifères et les productivités probables, ou distinguant seulement de manière plus qualitative des formations poreuses, fissurées ou karstiques ;

(*) cf. notamment les actes du Symposium international de Hannover "Hydrogeological maps as tools for economic and social development" (1989).

- conditions d'accès à l'eau souterraine : profondeur de forage et/ou de puisage, probabilité de "succès" des forages (par rapport à un objectif minimal fixé) estimée d'après les relations statistiques entre type de formation et résultats de forages.

Des cartographie spécifiques peuvent être basées sur des classifications élémentaires ou combinées de ces caractères (exemple : fig. 17) ;

- d'autre part en description plus explicite des systèmes aquifères qui constituent les champs naturels d'évaluation et de gestion de ressource : limites et "conditions aux limites" définies, connexions avec le réseau hydrographique (lieu d'échanges privilégiés dans les deux sens : émergences d'eau souterraine, pertes de cours d'eau). Les systèmes aquifères cartographiables - à une échelle donnée - sont seulement ceux dont l'étendue est supérieure à un minimum à convenir et ils ne couvrent généralement pas l'ensemble d'un territoire (exemple : fig. 18).

En particulier la cartographie doit faire ressortir les concordances ou les discordances entre les bassins fluviaux et les systèmes aquifères qui sont tantôt inclus entièrement dans un bassin, tantôt partagés entre deux ou plusieurs bassins.

3. CARTOGRAPHIE DES RESSOURCES PLUVIALES

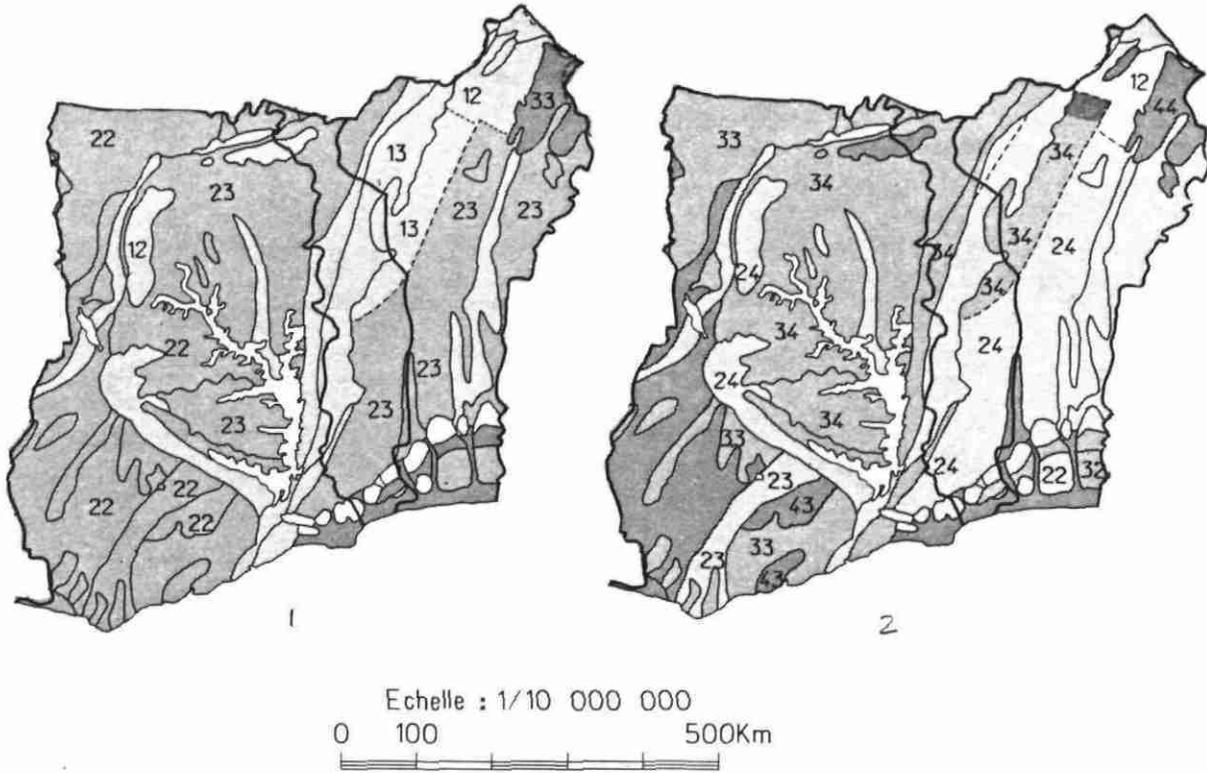
Les ressources pluviales étant à comparer à des "besoins" extensifs exprimables par unité de surface sur des grandes étendues, leur représentation sous forme de variable régionale continue, est ici parfaitement appropriée. Elle ne doit pas être confondue, faut-il le rappeler, avec la cartographie pluviométrique.

La ressource pluviale étant assimilée à l'évapotranspiration réelle (ETR) des sols cultivés (ou cultivables) ou à végétation utile, sa cartographie peut être basée :

- soit sur la régionalisation des déficits d'écoulement déduits de "bilans hydrologiques" locaux ;
- soit sur l'interprétation de cartes de données thermiques satellitaires, au moyen de "modèles hydroclimatiques" dont le résultat est directement cartographique (cf. chap. 3).

Cette cartographie peut s'exprimer soit par des zones délimitées par des lignes d'égale hauteur d'eau annuelle - moyenne, fréquentielle, etc. - (fig. 19), soit de manière discrète par des mailles affectées chacune d'une valeur propre ou de la valeur moyenne d'une classe d'ETR (notamment dans le cas où la carte dérive d'une imagerie satellitaire) pouvant faciliter la comparaison avec la répartition des terres arables, elles-mêmes classées. Exemples de cartes réalisées suivant cette démarche : cartes d'évaporation réelle annuelle de la France (1988, 1989, 1990), citées in ORSTOM 1992.

La prise en compte des hauteurs annuelles totales donne toutefois une image de la ressource pluviale maximale dont une partie seulement, variable suivant les types de sol et suivant les répartitions saisonnières et mensuelles des précipitations de chaque année, est utilisable par la végétation naturelle ou cultivée (cf. chap. 3).



	41	42	43	44
10	31	32	33	34
5	21	22	23	24
2	11	12	13	14

(0,7)

50 25 10
Profondeur d'extraction ou
de puisage(m/sol)

	41	42	43	44
80	31	32	33	34
65	21	22	23	24
50	11	12	13	14

Probabilité de succès(%)pour un
débit cible de 0.7m³/h

AQUIFERES DISCONTINUS
DISCONTINUOUS AQUIFERS 85 65 45
AQUIFERES GENERALISES
GENERALIZED AQUIFERS 250 100 50
Profondeur des ouvrages (m)

Fig. 17 - Exemples de cartes d'exploitabilité des eaux souterraines par combinaison de facteurs structuraux, dans trois pays africains : Ghana, Togo, Bénin.

1. classes de productivité et de profondeur de puisage, facteurs de coût d'exploitation
2. classes d'accessibilité : probabilité de succès et profondeur de forage, facteurs de coût d'équipement

Extrait de la "carte de potentialité des ressources en eau souterraine de l'Afrique occidentale et centrale" (CCE/CIEH, BRGM et Géohydraulique, 1986)

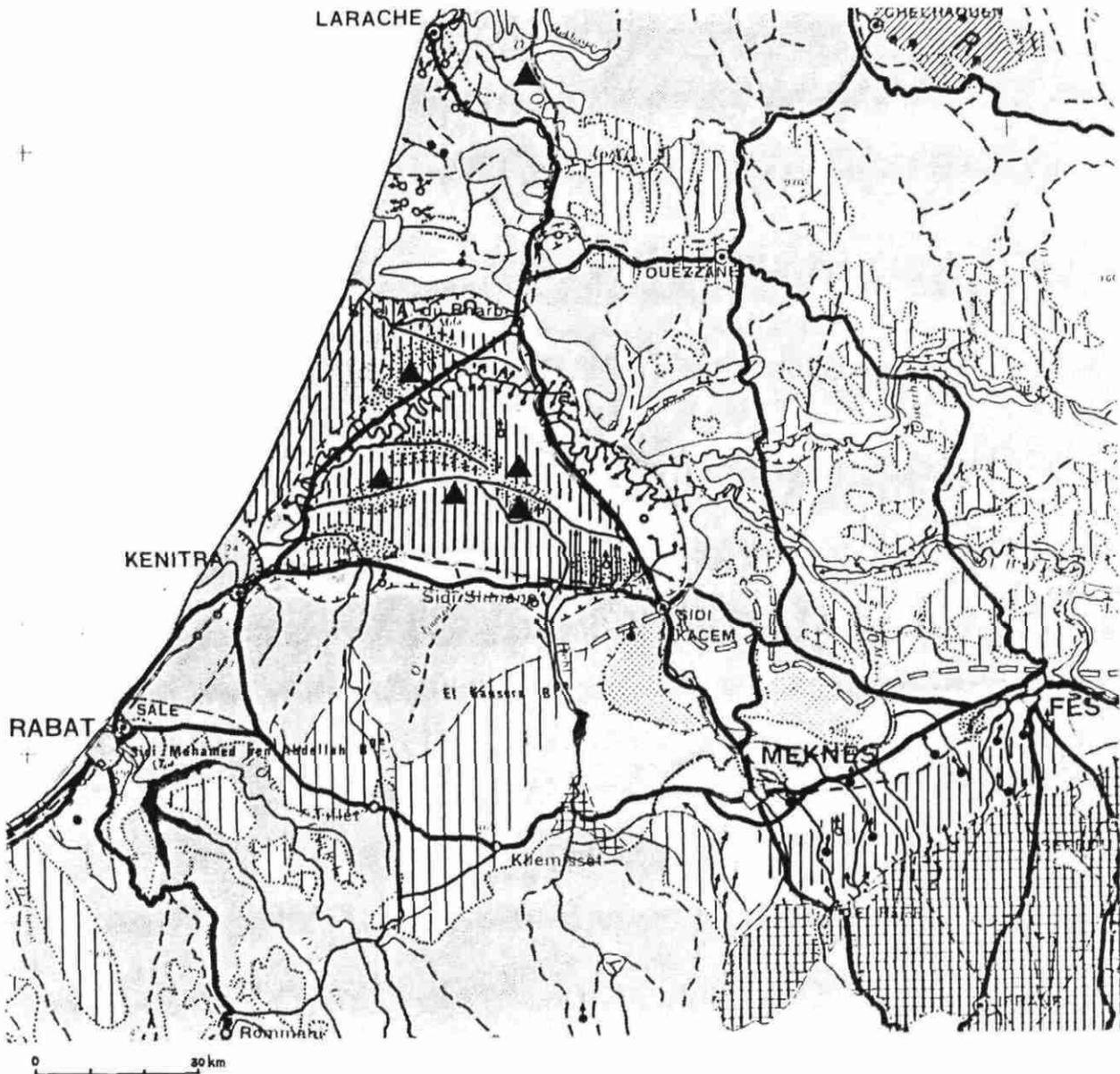


Fig. 18 - Exemple de cartographie des systèmes aquifères, à petite échelle : extrait de la carte des systèmes aquifères du Maroc à 1/1 000 000 (Minist. Trav. Pub., Dir. Hydraulique, M. COMBE, Rabat, 1976). Original en couleur

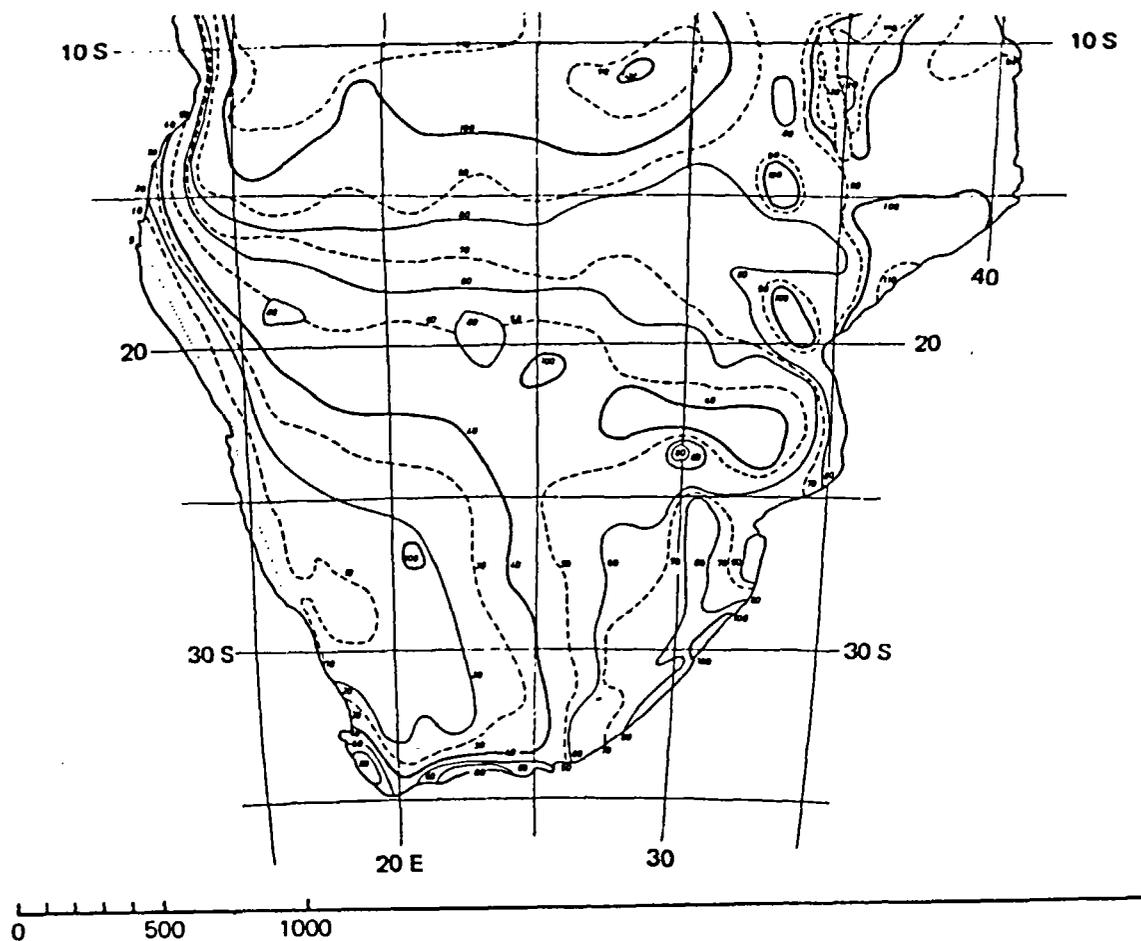


Fig. 19 - Carte de ressource pluviale potentielle de l'Afrique australe (évapotranspiration réelle moyenne annuelle régionale calculée par la formule de THORNTHWAITE, par point suivant un "grid network" (1 point par degré de latitude, 1 à 10 points par degré de longitude) et ajustée sur des déficits d'écoulement de bassins jaugés ("regional evaporation").

Hauteurs en cm/an = $100 \text{ m}^3/\text{an}$ par hectare (d'après A. BAUMGARTNER et E. REICHEL, 1975)

4. CARTOGRAPHIE DES APPORTS

4.1. ÉCOULEMENTS POTENTIELS LOCAUX OU "PRÉCIPITATIONS EFFICACES"

Conçue comme une variable régionale continue, la "production" d'eau naturelle par unité de surface (flux annuel moyen ou fréquentiel) est cartographiable par interpolation de valeurs locales calculées à partir de données climatiques de stations ou elles-mêmes interpolées suivant un réseau de points de référence ("*grid network*"). Les procédures de calcul (modèles précipitations/écoulements locaux, bilan précipitations-évapotranspiration réelle calculée) ont été indiquées au chap. 3. En aucun cas ces calculs ne doivent se borner à appliquer à chaque hauteur de précipitations moyenne annuelle locale - et encore moins à une carte d'isohyètes - un "coefficient d'écoulement" uniforme : la relation entre les précipitations et l'écoulement, quelle que soit l'échelle spatio-temporelle de l'analyse, n'est jamais linéaire.

Naturellement la validité du calcul des précipitations efficaces par différence entre les précipitations et l'évaporation réelle, elle-même calculée ($P - ETR$) est très sensible à celle des estimations de ces deux variables. Si la pluie est sous-estimée ou si ETR est surestimée du fait de calcul par pas de temps trop grand, les précipitations efficaces seront sous-estimées. Par ailleurs, comme on l'a indiqué au chap. 3, la relation entre les précipitations et l'écoulement ne peut être définie, en règle générale, indépendamment des aires des bassins de référence - tout particulièrement en zone aride et semi-aride, mais pas seulement -. Une cartographie continue, par des lignes d'égale hauteur de précipitations efficaces calculées, ou "isohyètes efficaces", (exemple : fig. 20), représente seulement la distribution des écoulements potentiels (ruissellement + infiltration) locaux ; elle n'a pas la signification d'une régionalisation des écoulements par unité de surface indépendante de l'échelle des bassins de référence.

L'intégration d'une carte de précipitations efficaces pourra aboutir aussi bien à une sous-estimation de l'écoulement naturel produit dans un bassin, si ETR est surévalué par son mode de calcul, qu'à une surestimation de l'écoulement dans des bassins non conservateurs, ce qui dépend beaucoup des conditions climatiques et morphologiques, comme de l'étendue des bassins considérés (cf. chap. 3, 3.3.2).

Une carte de précipitations efficaces qui traduit une approche de la distribution des écoulements par l'amont, ne doit donc pas être confondue avec une carte de régionalisation des écoulements connus qui traduit une approche par l'aval mais qui peut sous-estimer plus ou moins les écoulements locaux réels. Cependant, les précipitations efficaces cartographiées peuvent utilement servir d'index pour régionaliser l'écoulement d'un bassin, notamment dans les modèles de bassin matriciels.

Néanmoins, hors du cas des bassins à écoulement conservé (cf. chap. 1, 1.1.2), une représentation cartographique unique de l'écoulement régionalisé, non rapportée à un ordre de grandeur des bassins de référence de cet écoulement, ne peut avoir qu'une signification relative : en toute rigueur, elle n'est pas possible dans les bassins non conservateurs. De ce point de vue, une représentation discrète, par mailles régulières ou bassin élémentaire de taille définie affectés chacun de hauteur propre, pourrait être mieux appropriée.

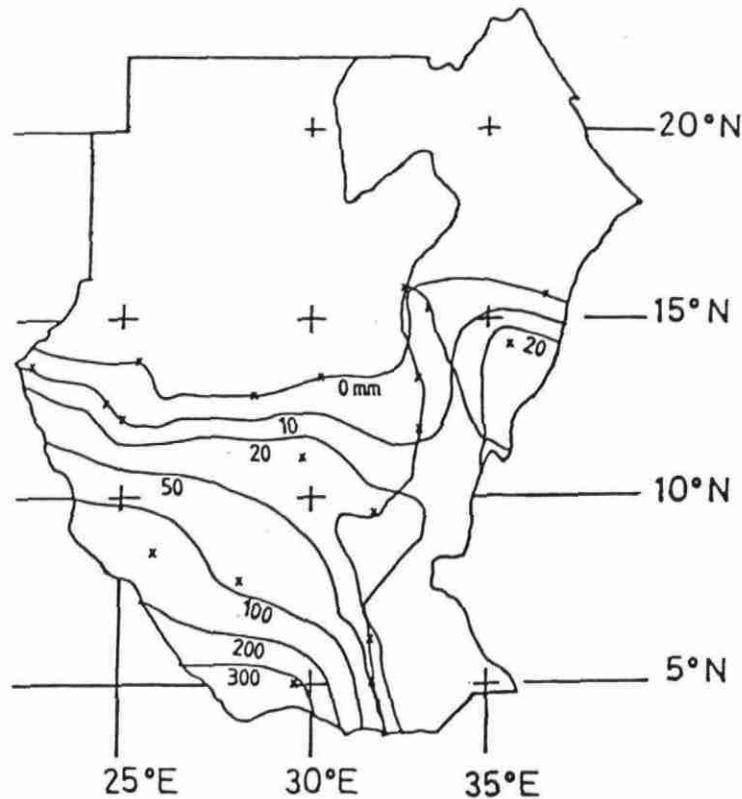
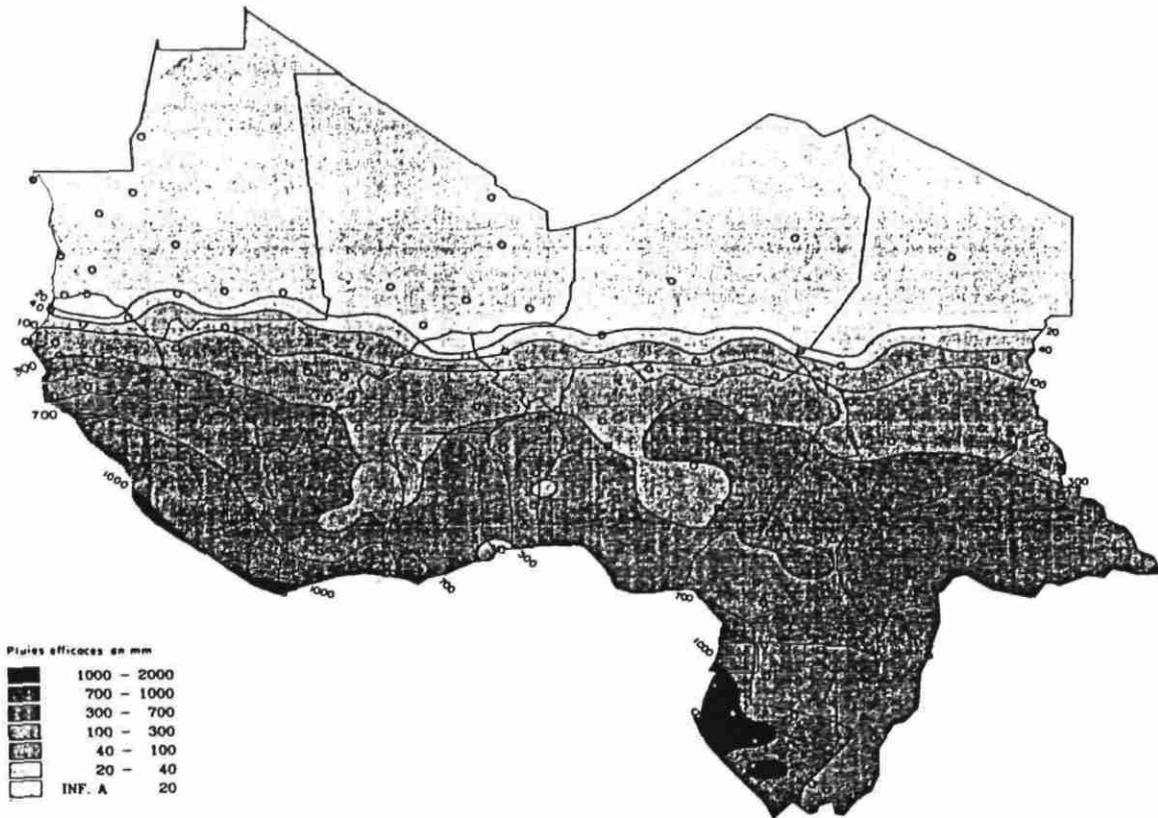


Fig. 20 - Exemples de cartes de précipitations efficaces moyennes annuelles ou écoulement potentiel par unité de surface.

haut : Afrique occidentale et centrale (source : B. MOUSSIÉ, CCE/CIEH, 1986).

Précipitations efficaces moyennes annuelles calculées par la formule de TURC

bas : Soudan, "Mean annual hydrological net precipitation" en mm. (Source : Internat. Conf. Wat. Res. & Environment, report of Sudan, Dublin, 1992)

Les écarts entre l'approche par l'amont (précipitations efficaces) et l'approche par l'aval (régionalisation de l'écoulement, pour "cartographier les apports", peuvent être illustrés par la comparaison entre les cartes mondiales respectives (et contemporaines) des précipitations efficaces calculées par la méthode de THORNTHWAITE ("*Discharge*" = P - ETR calculé), dressée par BAUMGARTNER et REICHEL (1975) et de l'écoulement ("*Runoff*" régionalisé) dressé par le Comité d'URSS de la DHI (1974) : fig. 21. On peut attribuer la représentation d'une ligne de hauteur nulle dans la première, à l'effet d'une sous-estimation par le pas de temps de calcul des "bilans" P - ETR.

4.2. INFILTRATIONS ET APPORTS AUX AQUIFÈRES

Les fractions de l'écoulement potentiel local, correspondant au ruissellement et à l'infiltration, c'est-à-dire aux productions respectives d'écoulement superficiel (irrégulier) et d'écoulement souterrain (régulier), peuvent-elles faire l'objet de cartographies distinctes utiles ? C'est surtout la cartographie des flux infiltrés par unité de surface qui est la plus tentée, en leur donnant à la fois la signification d'apports aux aquifères (alimentation des eaux souterraines) et de contribution à la composante relativement régulière et stable de l'écoulement ("écoulement souterrain" ou "*groundwater discharge*"), donc dans une optique hydrologique autant sinon plus qu'hydrogéologique. De ce second point de vue en effet, en restreignant l'alimentation des aquifères à la seule fraction infiltrée des précipitations, sa représentation comme une variable régionale continue néglige les autres sources d'alimentation (infiltrations d'eaux superficielles) et risque d'en donner une image tronquée.

Les flux d'infiltration, quelles que soient les échelles dans l'espace et dans le temps auxquelles on cherche à les estimer, ne sont pas liés par des relations simples et linéaires aux précipitations. Là encore toute estimation basée sur un "coefficient d'infiltration" appliqué aux hauteurs de précipitation est à proscrire on l'a vu (chap. 3), et on doit procéder par des modèles de divers types. L'approche la plus simple, mais qui exclut déjà une relation linéaire avec les précipitations, consiste à appliquer aux précipitations efficaces calculées des proportions infiltrées associées à chaque type de formation aquifère et de conditions de surface. De toute façon, plus encore que pour la cartographie de l'écoulement total, la régionalisation de l'écoulement souterrain doit être ajustée aux estimations globales de ce dernier pour des bassins ou des aquifères définis. Par ailleurs, cette régionalisation, même relativement exacte, n'a pas le sens d'une cartographie des "flux de ressource" en eau souterraine qui ne peuvent se définir, on l'a vu, par unité de surface mais par système aquifère et qui, de toute façon, ne peuvent être identifiés simplement à l'alimentation des aquifères.

En fait la signification d'une cartographie des apports aux aquifères et sa portée utile du point de vue de l'estimation des ressources en eau souterraine sont très dépendantes de la taille et du mode de fonctionnement hydraulique des systèmes aquifères : du degré de cloisonnement ou au contraire de continuité des formations aquifères et de l'importance relative des échanges d'eau verticaux entre nappe souterraine, sol et atmosphère (dans les deux sens) dans la dynamique des systèmes aquifères. Cette cartographie spécifique est significative et utile surtout dans les domaines cloisonnés, au surplus mal délimitables, tels que les formations de socle fracturé à aquifères discontinus ou les terrains sédimentaires hétérogènes et peu transmissifs, et d'autant plus en zone semi-aride où les échanges d'eau verticaux prédominent largement sur les écoulements souterrains latéraux et où d'ailleurs les cours d'eau de surface drainants et

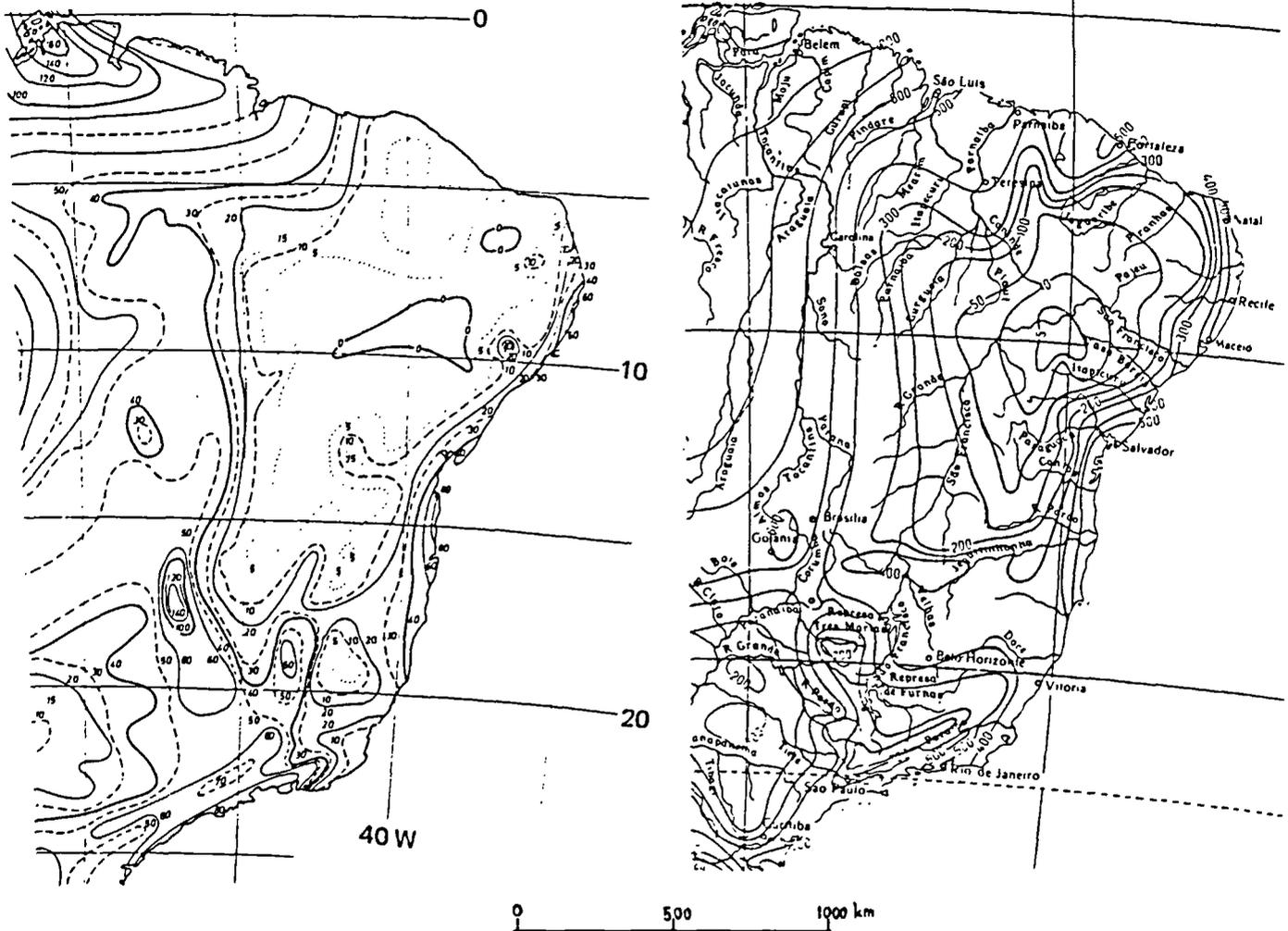


Fig. 21 - Comparaison de deux extraits de cartes mondiales de l'écoulement total par unité de surface à très petite échelle : Nordeste du Brésil.

à gauche : extrait de l'atlas de "The World Water Balance" de BAUMGARTNER & REICHEL (1975). Carte de "Discharge" moyen annuel D en cm, calculé par l'équation du bilan $D = \text{précipitations} - \text{évaporation réelle}$ calculée par la formule de THORNTHWAITE, assimilable à des "précipitations efficaces".

à droite : extrait de "Atlas of World Water Balance", Com. DHI/URSS 1974/UNESCO 1979, planche 43, "Mean annual River Runoff" en mm, estimé par régionalisation des écoulements connus

permanents sont quasi-absents. Dans ces conditions, la cartographie des apports indique les valeurs maximales de ressource en eau souterraine locale naturelle que l'on peut escompter (maximales car une fraction seulement des flux sortant par évaporation peut en pratique être prélevée).

Ailleurs, la cartographie de l'écoulement souterrain, tentée jusqu'ici à petite ou très petite échelle (cartes continentales, exemple fig. 22) a seulement pour objet :

- soit de permettre d'estimer les ordres de grandeur plausibles des apports moyens aux systèmes aquifères d'étendue définie, situés dans l'espace cartographié ;
- soit de montrer la répartition géographique des origines des composantes régulières des écoulements des bassins assez étendus pour que le réseau hydrographique collecte la plus grande partie de l'écoulement potentiel (du moins en zones humides).

4.3. CARTOGRAPHIE DISCRÈTE DES APPORTS

Qu'il s'agisse d'écoulement potentiel total ou souterrain (flux d'infiltration), les apports peuvent aussi être cartographiés non plus comme variable régionale continue ayant la dimension d'une hauteur d'eau annuelle, mais de manière discrète en flux d'eau à référence temporelle spécifiée (moyenne annuelle, fréquence définie) rapporté à des cadres spatiaux délimités : de préférence des bassins élémentaires déterminés par les structures d'écoulement (sous-bassins ou bassins partiels composant un grand bassin) ou des systèmes aquifères, mais non des mailles régulières ou de géométrie quelconque sans signification pour intégrer des apports et qui traduisent seulement sous une forme discrète et cumulative la représentation continue des apports.

En pratique, cette cartographie doit être basée sur des données hydrologiques (écoulements mesurés) et sur leur extrapolation assistée par l'analyse des relations précipitations/écoulement (à références spatio-temporelles significatives, cf. chap. 3), ou mieux par les cartes d'apport (précipitations efficaces mentionnées plus haut (4.1), ce qui rejoint les essais de régionalisation de l'écoulement d'un bassin connu globalement et en quelques parties, suivant une subdivision plus ou moins fine, en sachant que l'identité entre apports et écoulement (naturel) n'est valable qu'en zone humide, tempérée ou tropicale. Par exemple, la fig. 23 montre un essai de régionalisation à très petite échelle de l'écoulement moyen annuel d'un très grand bassin, celui de l'Amazonie.

Une variante pourrait consister à définir et représenter des bassins "unitaires" correspondant à des apports de même ordre de grandeur (par exemple $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ou $30 \text{ hm}^3/\text{an}$), dont les différences de superficie visualiseraient la géographie des apports.

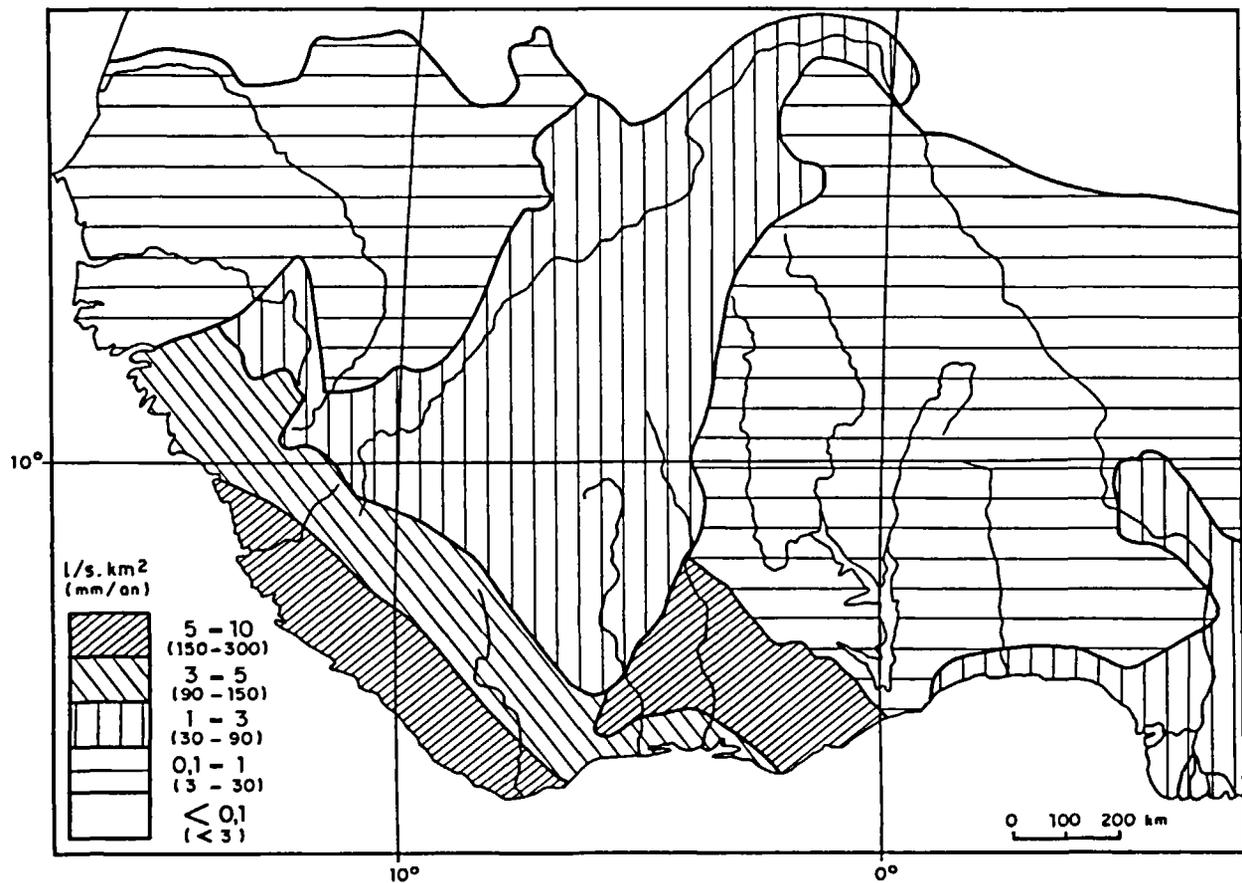


Fig. 22 - Exemple de carte d'écoulement souterrain potentiel : extrait d'une carte de l'Afrique des "Groundwater discharges values" (Afrique de l'Ouest), I.S. ZEKTSER & R.G. DZHAMALOV, UNESCO/IHP, 1993

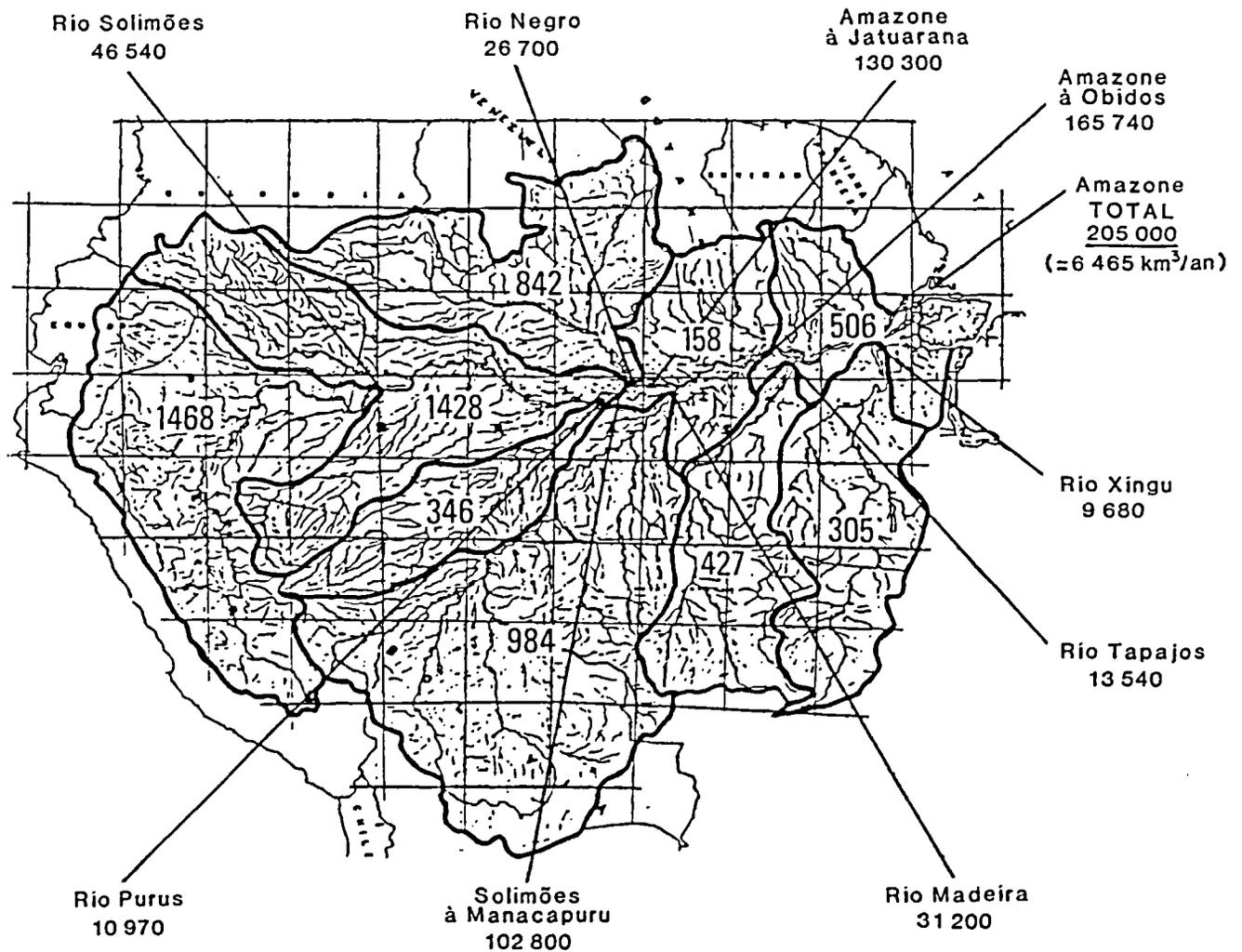


Fig. 23 - Exemple de régionalisation des apports dans un grand bassin fluvial subdivisé : le bassin de l'Amazone. Répartition des apports moyens "interannuels" propres aux principaux sous-bassins ou bassins partiels (chiffres inscrits sur la carte, en km³/an), déduits des écoulements mesurés ou calculés en divers points du réseau hydrographique (mentionnés en marge, en m³/s). D'après M. MOLINIER, ORSTOM, VIIIème Journ. Hydrol., Montpellier, 1992

5. CARTOGRAPHIE DES ÉCOULEMENTS DE SURFACE

Il s'agit de cartographier non plus la production potentielle d'écoulement de chaque unité de surface du territoire mais l'écoulement constitué dans la structure qui le collecte et où il peut être aménagé et prélevé, donc où il est offert comme ressource. Cela consiste à représenter le réseau hydrographique classé dans toutes ses sections suivant les grandeurs de l'écoulement (moyen ou de fréquence définie, notamment en étiage) ou les caractères de son régime (variabilité saisonnière, pluriannuelle ; mois à débit maximal ou minimal les plus fréquents, etc.), ou encore d'autres variables caractéristiques (débit solide, qualités de l'eau, etc.).

Le classement le plus élémentaire est la distinction entre les cours d'eau permanents et temporaires, voire épisodiques, qui est généralement traduite dans les fonds hydrographiques des cartes géographiques d'échelles variées (par des lignes continues ou discontinues) mais dont la validité demande souvent à être vérifiée sur des bases hydrologiques.

La représentation quantitative synthétique la plus "visible" consiste à traduire graphiquement l'ordre de grandeur du débit des cours d'eau par la largeur de trait (relation non linéaire naturellement), ce qui rend directement perceptible la différence entre les cours d'eau à débit croissant ou à débit décroissant en zone aride (exemple : fig. 24).

L'écoulement représenté peut être soit le débit moyen annuel, soit un débit d'étiage moyen défini conventionnellement (par exemple : débit mensuel moyen le plus bas), c'est-à-dire la ressource "régulière" qui peut être plus utilement comparable à certaines demandes (exemple : fig. 25). Dans tous les cas les références temporelles des calculs de moyennes doivent être identiques pour que la carte soit homogène.

Pour construire ces cartes on procède par interpolation ou extrapolation des données de stations de mesure, en tenant compte de la structure du réseau (sommations aux confluences) et en s'appuyant le cas échéant sur les cartes d'apport citées plus haut (4). Les cartographies des précipitations efficaces et des cours d'eau classés suivant l'écoulement - se référant aux mêmes périodes - doivent en principe être cohérentes (fig. 26).

Sur des cartes plus analytiques, destinées à la lecture plutôt qu'à une vision globale, on ajoute simplement au tracé classique du réseau l'inscription de données hydrologiques sur l'écoulement près des stations de mesure (débit moyen ou d'étiage, nombre d'années de mesure, superficie du bassin dominant, etc.), éventuellement complétées par des graphiques descripteurs du régime moyen annuel (histogramme des débits moyens mensuels, par exemple, cf. fig. 27) ; de tels "cartogrammes" sont cependant à l'opposé des représentations synthétiques de la répartition spatiale des écoulements qui forme l'objet essentiel de la cartographie.

Des cartes de réseau hydrographique classé par qualité de l'eau - notamment en état de basses eaux - peuvent aussi être établies par interpolation entre les points d'échantillonnage et en se référant à une grille de qualité appropriée (chap. 3).

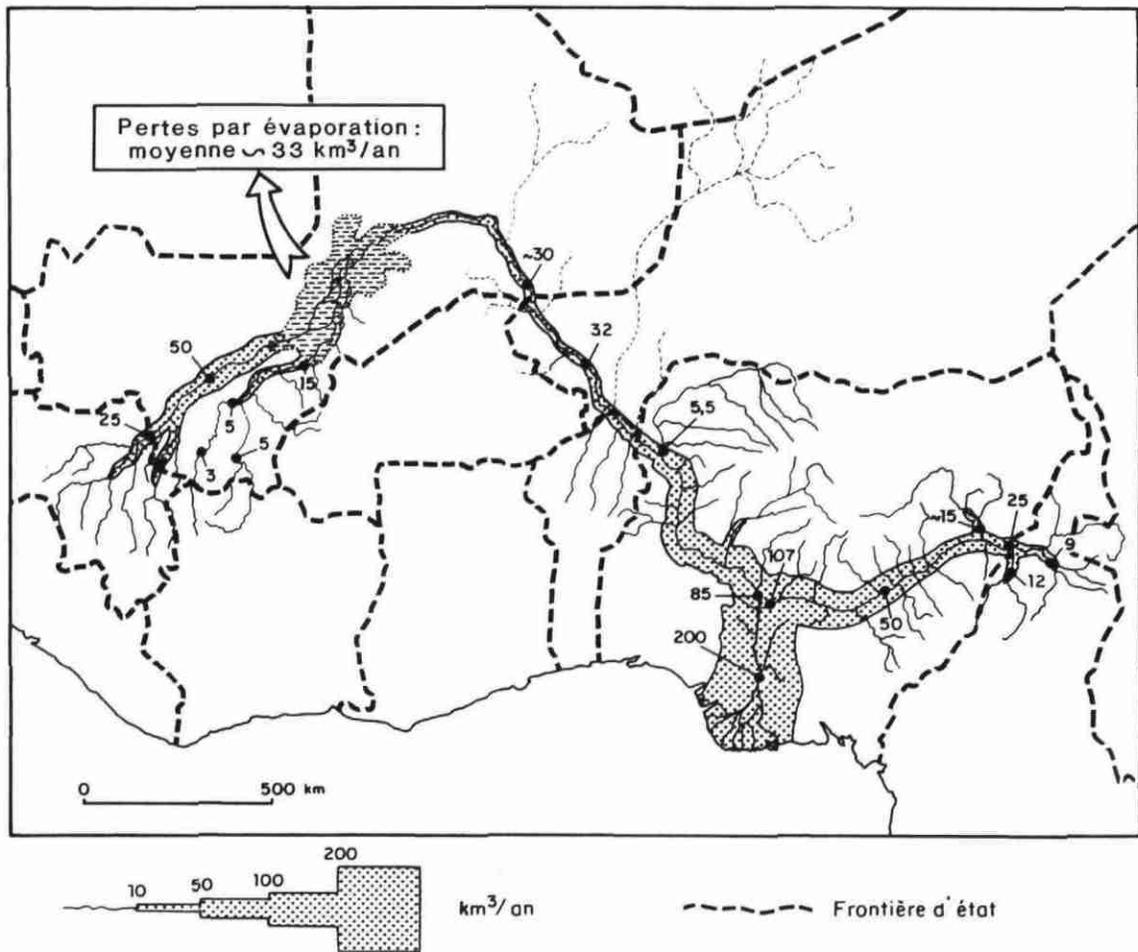


Fig. 24 - Exemple de carte de réseau hydrographique classé par débit moyen annuel. Bassin du Niger (Afrique de l'Ouest)

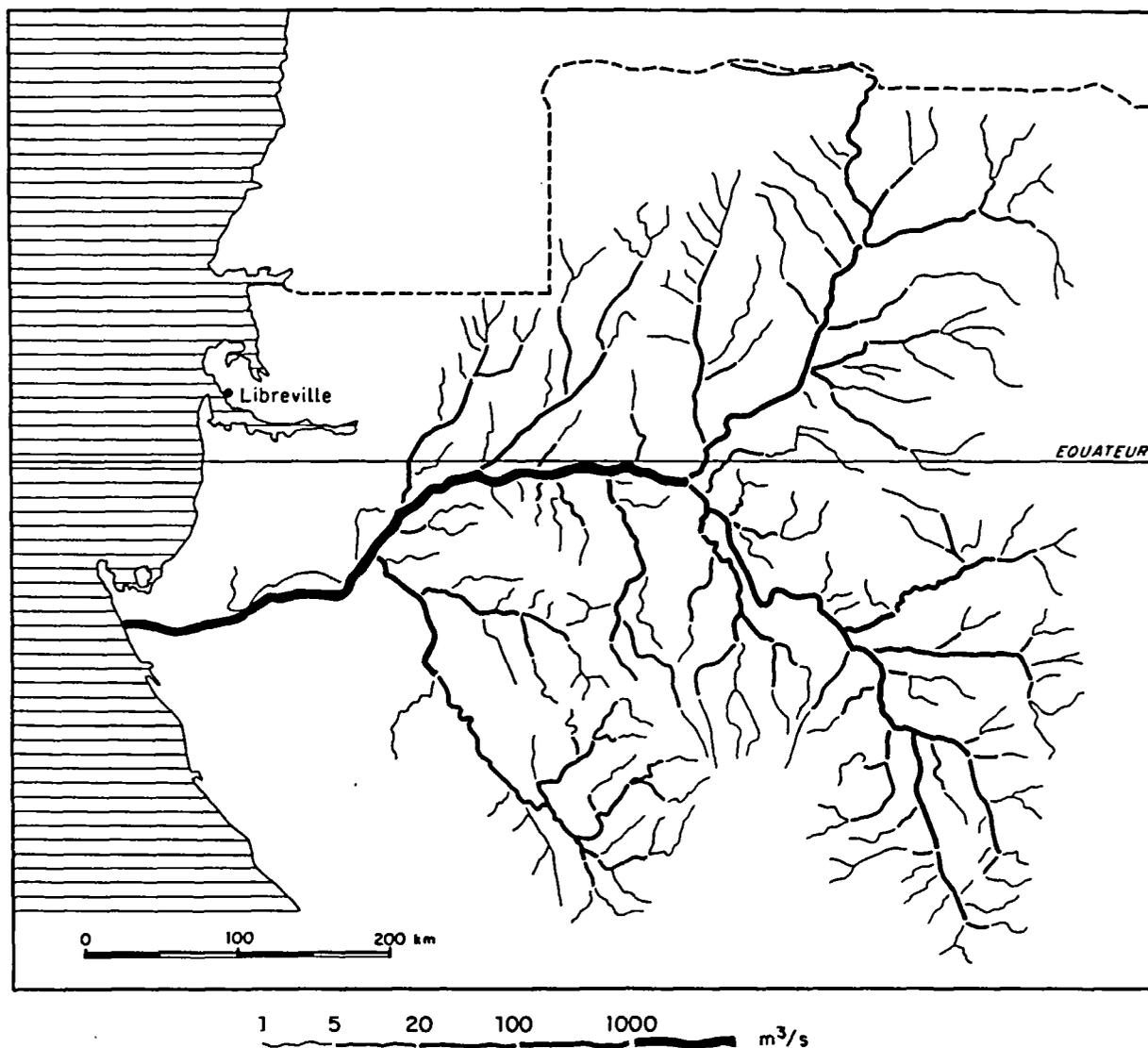


Fig. 25 - Exemple de carte de réseau hydrographique classé par débit d'étiage moyen, en m^3/s . Bassin de l'Ogooué (Gabon). Source : CIEH/BRGM, "Carte de planification des ressources en eau", à 1/1 000 000. Gabon, d'après des données de l'ORSTOM (1982)

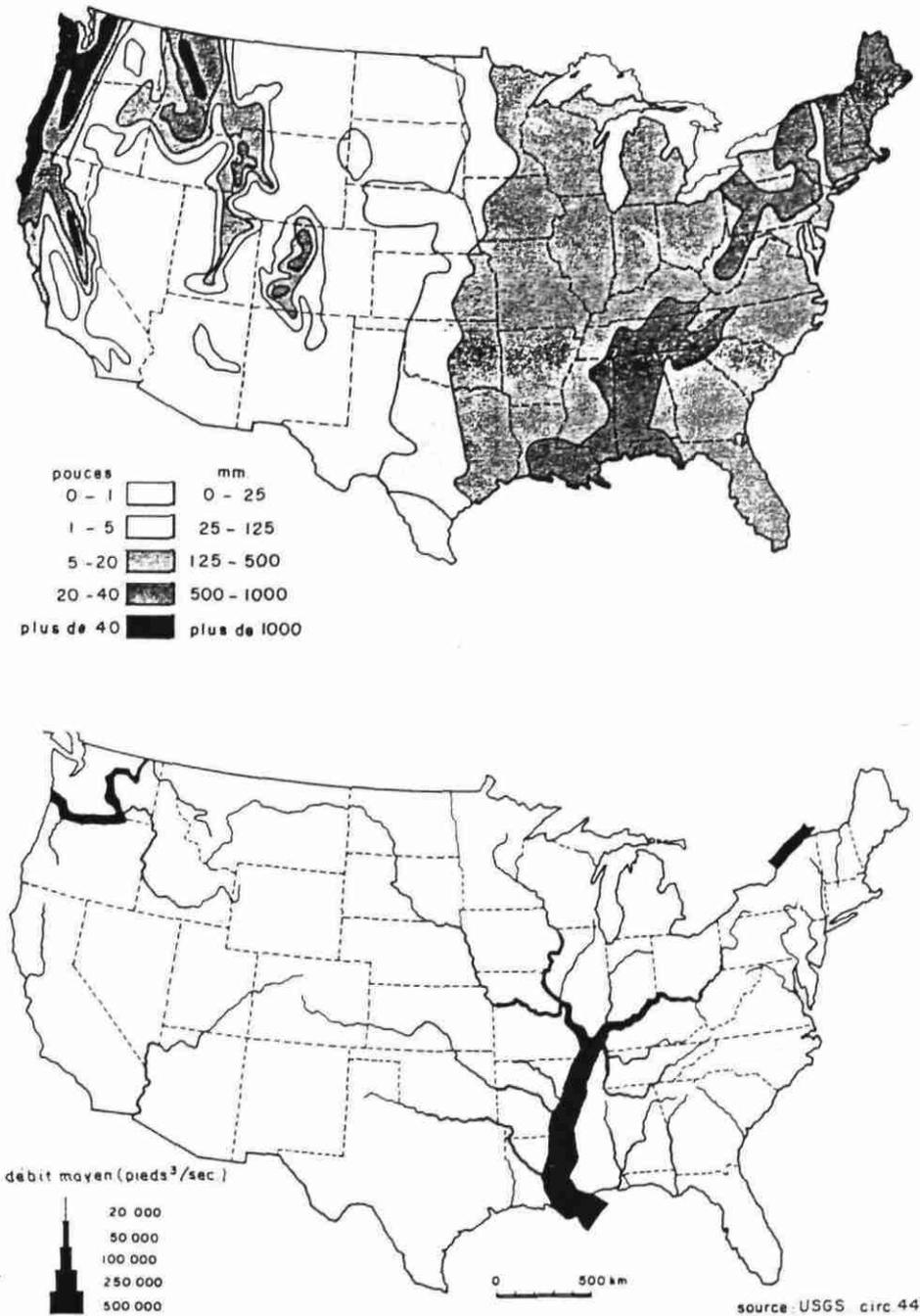


Fig. 26 - Les deux modes de cartographie de l'écoulement d'un pays. Exemple des Etats-Unis, à très petite échelle.

en haut : régionalisation continue de l'écoulement (hauteurs d'eau écoulée moyennes annuelles). Source : "The Nation's Water Resources", USWRC, 1968

en bas : représentation du réseau hydrographique classé suivant le débit moyen. 1000 pieds cubes/s = 28,3 m³/s = 0,89 km³/an. Source : Water Atlas of the United States, 1973

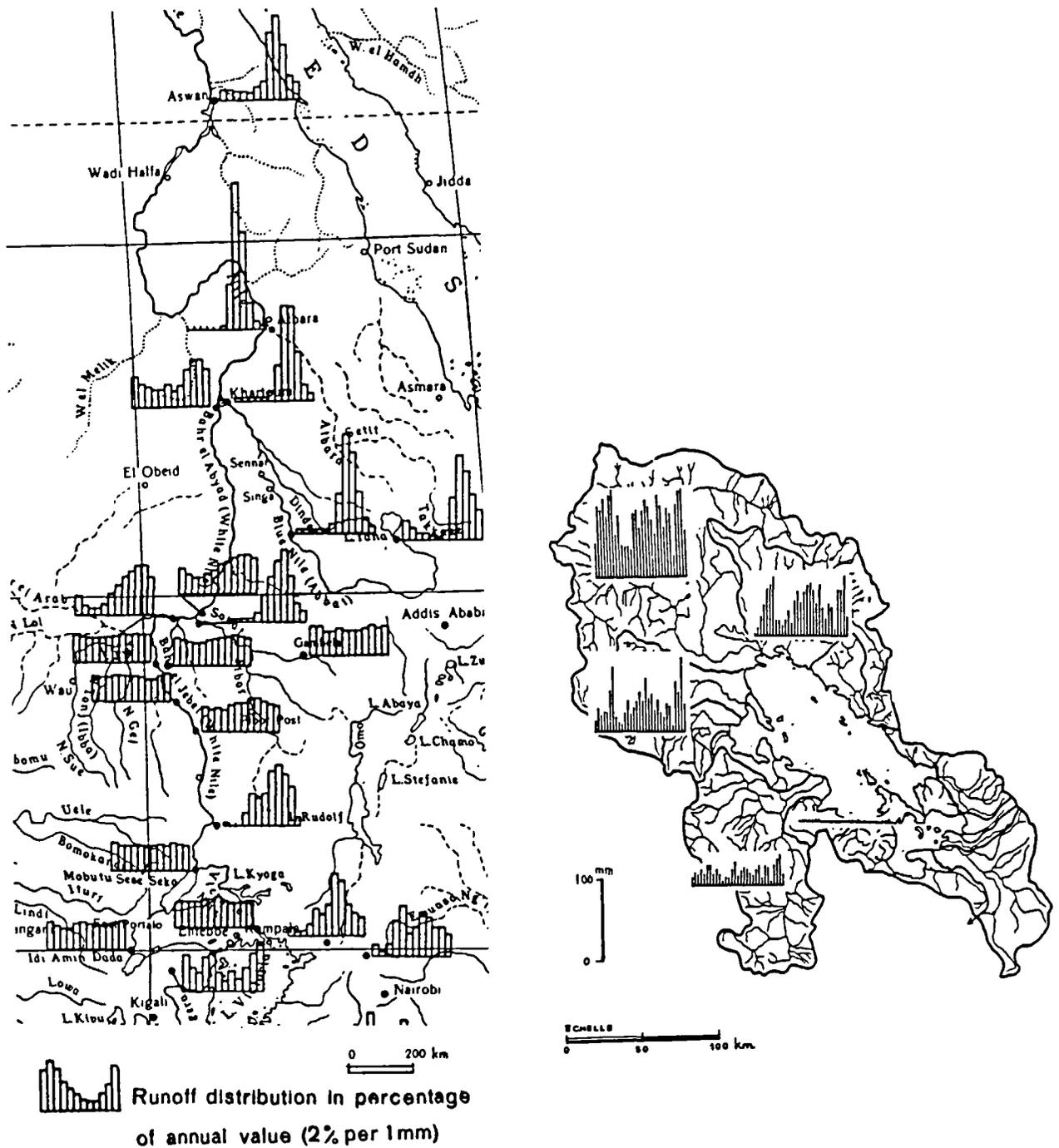


Fig. 27 - Exemples de cartogrammes hydrologiques.

à gauche : débits moyens mensuels relatifs (en pourcentage du débit moyen annuel) dans le bassin du Nil (extrait de "Atlas of World Water Balance", USSR Com. IHD/UNESCO, 1977, Pl. 28)

à droite : chroniques des hauteurs écoulées annuelles (modules) des tributaires du lac Titicaca, au Pérou (1957-1987) (extrait de M.A. ROCHE, ORSTOM, VIII^{ème} Journ. Hydrol., 1992)

6. CARTOGRAPHIE DE RÉSULTATS COMPTABLES OU D'INDICATEURS

Les tableaux comparatifs de valeurs numériques sur les ressources en eau (chap. 3), les résultats comptables (chap. 5) ou les indicateurs (chap. 6) se référant à différents cadres spatiaux (bassins, régions, pays, etc.), sont utilement complétés par des cartes visualisant la géographie de ces résultats et de leur comparaison. Il s'agit de cartes, à petite échelle, représentant les situations et les limites de ces cadres territoriaux (avec inscription des données numériques) ou de "mosaïques" classant ces domaines suivant une gamme de valeurs appropriée. Exemple : fig. 28.



En conclusion : pour être comparables aux demandes, les informations sur les ressources en eau ne peuvent être représentées suivant n'importe quel maillage d'un territoire (à l'exception du cas où la ressource et la demande sont des variables régionales continues : ressource et agriculture pluviales), mais suivant des unités spatiales appropriées.

En particulier, décrire ou supputer la répartition régionale des flux de ressource en eau naturelle, ce n'est pas seulement régionaliser des données hydrologiques mesurées à partir d'une plus ou moins grande densité de stations (jamais assez fine) "contrôlant" une partie plus ou moins grande d'un territoire (toujours inférieure à 100 %) ; c'est extrapoler ou interpoler l'écoulement aux sites d'utilisation projetés ou projetables, avec une fiabilité nécessaire et suffisante.

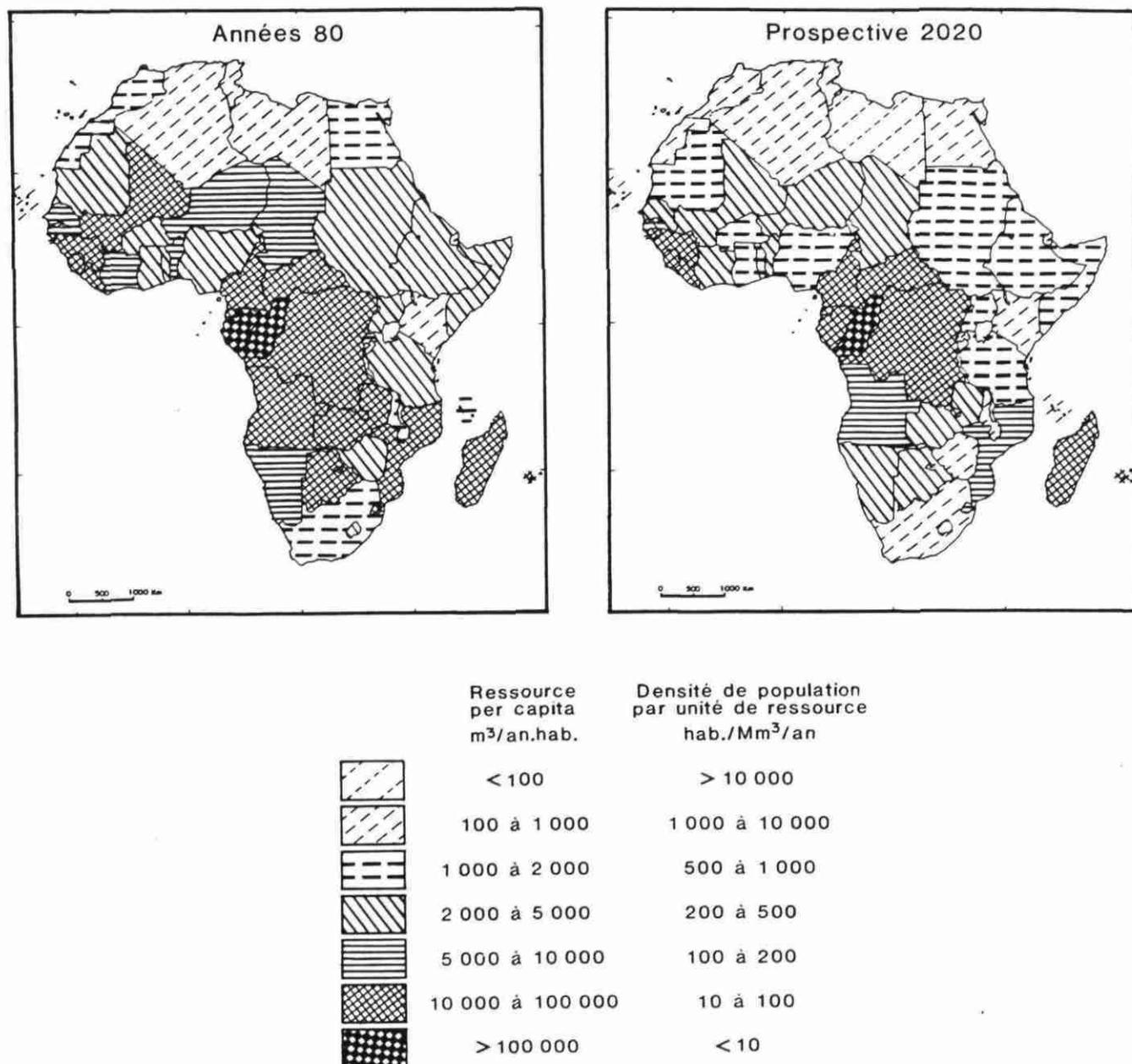


Fig. 28 - Ressources en eau naturelles des pays d'Afrique rapportées aux populations. Etat actuel (1985) et prospective 2020 (d'après la projection démographique moyenne des Nations Unies)

CHAPITRE 5 : COMPTABILITÉ DES RESSOURCES ET DES UTILISATIONS D'EAU

La présentation comptable des données quantitatives sur les ressources et les utilisations d'eau, rapportées à des champs et à des durées de référence définies, a pour objets de faciliter l'analyse et de vérifier la cohérence de ces données, et de permettre des comparaisons soit entre les ressources en eau d'un même territoire en différentes situations, ou entre les ressources de différents territoires, soit entre les utilisations d'eau dans un territoire à différents stades passés ou en prévision ou entre les utilisations en différents territoires, soit enfin entre les ressources et les besoins en eau dans un territoire et une situation donnés. La comptabilité n'opère par définition que sur des quantités d'eau ce qui n'exclut pas la prise en compte de données sur les qualités lorsque celles-ci peuvent être quantifiées.

Accessoirement la présentation comptable peut être aussi un instrument d'estimation de quantités inconnues à partir de données mieux connues lorsque des calculs par différence sont jugés acceptables.

1. PRINCIPES ET RÈGLES GÉNÉRALES DE LA COMPTABILITÉ PHYSIQUE

Les données quantitatives inscrites dans un compte d'eau doivent toutes être :

- globales : elle se rapportent toutes à l'ensemble du système considéré ;
- additives (tout risque de double-compte est à proscrire) ;
- homogènes, se référant bien au même territoire et à la même durée, notamment lorsqu'il s'agit de moyennes annuelles ;
- en principe indépendantes : leurs chiffrages doivent résulter de démarches séparées, à l'exception toutefois du "poste" le plus incertain estimé par différence comme "solde comptable" ;
- à chiffrage unique : les données numériques sont certes affectées de diverses approximations qu'il peut être utile de signaler, mais leur expression par des fourchettes d'incertitude (valeurs maxi/mini) ne peut être introduite dans un tableau comptable qui n'admet qu'une seule valeur pour chaque donnée, même si un compte peut être composé de nombres de différents ordres de grandeur, notamment de petits nombres d'ordre inférieur à la marge d'incertitude d'autres nombres beaucoup plus grands, ce qui conduit à des sommes pouvant comporter des chiffres non significatifs ;

- exprimées en une même unité(*) : unités de volume ou de flux (hm^3 ou km^3/an , etc.) de préférence à des hauteurs d'eau moyennes (surfaciques) rapportées au champ de référence (mm/an), pratique courante en hydrologie mais peu significative pour la prise en compte des flux échangés aux limites ou des quantités d'eau utilisées.

2. UNITÉS DE COMPTE SPATIO-TEMPORELLES PERTINENTES

2.1. CHAMP DE RÉFÉRENCE TERRITORIAL

Du point de vue de la comptabilité physique et analytique des ressources en eau, les champs de référence sont les domaines les plus appropriés pour l'évaluation (cf. chap. 3), c'est-à-dire les champs des "systèmes d'eau" : bassins fluviaux et, dans certains cas, systèmes aquifères.

Du point de vue de la comparaison entre les ressources et les utilisations d'eau, par contre, il convient de rechercher le maximum de compatibilité entre champs de ces "systèmes de ressources" et espaces socio-économiques qui forment les champs de systèmes d'utilisation, de manière à minimiser les échanges d'eau aux limites, soit naturels (si le compte ne se réfère pas à un bassin entier), soit artificiels si des importations ou exportations d'eau sont à prendre en compte. Des compromis peuvent donc être utiles, voire nécessaires, entre les champs physiques et les espaces socio-économiques ; notamment en procédant à des agrégats de bassins peu étendus ou au contraire à des divisions de bassins, tout particulièrement s'il s'agit du compte d'une région administrative ou d'un pays.

Enfin, il va de soi que le champ de référence territorial d'un compte doit être invariant, notamment s'il s'agit d'analyser une évolution entre deux états.

2.2. DURÉE DE RÉFÉRENCE

Un compte de ressources "naturelles" budgétaire se réfère en principe à une année moyenne d'une série pluriannuelle assez longue pour être stable : deux à trois décennies de préférence ; et les diverses données chiffrées doivent autant que possible se référer à la même période. Un compte de ressource annexe peut en outre se référer utilement à une ou plusieurs années de fréquence d'occurrence définie tout particulièrement à des "années sèches" décennale ou vingtennale, afin de décrire les apports minimaux "garantis" statistiquement 9 années sur 10 ou 19 années sur 20, et de permettre de les comparer à des besoins éventuellement accentués dans ces situations de défaillance.

-
- (*) En principe cohérente avec le système métrique et le système international d'unités (SI), ce qui implique la conversion d'unités encore en usage dans certains pays, telles que :

Billion gallons (US)/per day (Bg.d)	= 1,3815 km^3/an
Billion gallons (US) per year	= 3,785 hm^3/an
Acre-foot per year	= 1 233,5 m^3/an

Par contre, des comptes de ressources saisonniers, qui permettraient des comparaisons avec des demandes de pointe saisonnière ne paraissent utiles que dans le cas de systèmes d'eau dépourvus de capacités régulatrices naturelles, donc à régime très variable et irrégulier.

Les comptes d'utilisation également budgétaires doivent se référer normalement à des années réelles (communes à toutes les données comptabilisées), à l'instar de "comptes d'exploitation". Des comptes annuels séquentiels (tous les ans) sont généralement peu significatifs car les évolutions sont trop lentes et les écarts interannuels sont rarement supérieurs à la marge d'incertitude qui pèse sur les estimations. En outre certaines demandes (notamment agricole dans le cas de l'irrigation de complément) sont sujettes à de fortes variations conjoncturelles interannuelles du fait des aléas climatiques. Des comptes d'utilisation annuels réalisés tous les cinq ans permettent une analyse suffisante des évolutions, tout en pouvant aussi prendre la forme de comptes quinquennaux cumulant les statistiques annuelles lorsque celles-ci sont disponibles.

Les comptes de ressource et d'utilisation conjugués - toujours budgétaires - intègrent en principe des données moyennes annuelles sur les ressources et des données annuelles spécifiées sur les utilisations. Cela pourrait paraître un défaut de cohérence, mais se justifie du fait que les variations des ressources sont conjoncturelles et que leur moyenne est stable à long terme, alors que l'évolution des utilisations est tendancielle à long terme, donc que leur moyenne sur une longue durée n'aurait pas de signification : le but de la comparaison comptable est précisément d'analyser l'adéquation ressource/demande et l'évolution des pressions des utilisations sur les ressources

3. STRUCTURES COMPTABLES APPROPRIÉES COMPTES DE FLUX OU COMPTES DE STOCK ? BUDGET ET BILAN

Tout système d'eau naturel et/ou utilisé comporte des flux et des stocks, également comptabilisables. Selon que l'on prend en compte les uns et/ou les autres, deux types de structure comptable sont applicables et suivant deux degrés de complexité et d'aptitude analytique.

1. Le **budget** met en regard des entrées et des sorties (c'est-à-dire des recettes et des dépenses) exprimées en volumes d'eau rapportés à la période de référence, donc en flux moyens. Dans la forme la plus simple le système, assimilé à une "boite noire" est comptabilisé globalement : les lignes budgétaires des entrées et des sorties traduisent respectivement la typologie des échanges de flux aux limites du système sans nécessairement se correspondre ; seule l'égalité de leurs sommes doit vérifier l'équilibre général du compte.

Entrées		Sorties	
E1	-	S1	-
E2	-	S2	-
E3	-		
Total		Total	

Dans une forme plus complexe et plus analytique, la structure interne du système peut être prise en compte, mais en distinguant des composants toujours généraux (par exemple : eaux superficielles et eaux souterraines dans le système de ressource, divers secteurs économiques dans le système d'utilisation). Les lignes budgétaires traduisent alors ces différents composants et se correspondent tandis que les entrées et les sorties sont comptabilisées en colonnes, ainsi que des éventuelles opérations de transfert entre les composants.

	Entrées				Transferts internes			Sorties				
	E1	E2	E3..	Σ	T1	T2..	Solde	S1	S2	S3..	Σ	
Composants :												
a					-							
b					↓	↑						
c					+	-						
etc.												
Total					0	0	0					

Dans l'éventualité où, bien que seuls des flux moyens soient comptabilisés, des mouvements de stock propre au système seraient à prendre en compte, ils seraient à inscrire en entrée s'il s'agit d'"emprunt" (déstockage) ou en sortie s'il s'agit d'"épargne" (stockage), de sorte que l'équilibre comptable soit conservé.

2. Le Bilan(*) décrit et analyse le passage d'un stock initial à un stock final, par des opérations portant sur des flux ; il inclut donc un budget qui explique ce passage et les différences de stock, et qui n'est donc plus obligatoirement équilibré. Le bilan, lui aussi, peut prendre :

(*) au sens financier, à bien distinguer d'un budget, malgré l'emploi répandu de ce terme en hydrologie dans le sens budgétaire ("bilans d'eau").

- soit une forme simple globalisant le système :

Stock initial	Entrées		Sorties		Stock final
	E1		S1		
	E2		S2		
	E3				
.....	Total		Total		.....

- soit une forme plus analytique traduisant la composition du système et comptabilisant les transferts internes :

	Stock Initial	Entrées			Transferts internes			Sorties			Stock final
		E1	E2 ..	Σ	T1	T2..	Solde	S1	S2..	Σ	
Composants :											
a											
b											
etc.											
Total					0	0	0				

Les comptes de ressource et d'utilisation d'eau peuvent le plus souvent prendre seulement la forme budgétaire, plus ou moins analytique.

Des comptes structurés en bilans peuvent par contre être mieux adaptés dans certains cas particuliers où il s'agit plutôt d'une comptabilité de gestion :

- comptabilité à long terme des ressources non renouvelables et de leur exploitation, où les variations de stock sont primordiales ;
- compte d'exploitation à court terme (annuel ou infra-annuel) de réservoir.

4. COMPTABILITÉ DES RESSOURCES

4.1. CHOIX DU SYSTÈME ET DE LA DURÉE DE RÉFÉRENCE

C'est un préalable à tout exercice comptable (cf. chap. 3 et supra 2).

4.2. ÉLABORATION DES DONNÉES COMPTABLES

La présentation comptable des résultats de chiffrage des différentes composantes des ressources (cf. chap. 3) implique diverses opérations d'unification et d'homogénéisation :

- extensions de données dans l'espace et dans le temps pour unifier les références spatio-temporelles ;
- expressions en unités communes ;
- contrôle d'additivité.

Un classement doit être fait entre les données jugées les plus fiables et celles plus incertaines, les plus sujettes à incertitude et à ajustement pour réaliser l'équilibre comptable, voire à déduire de l'équation générale du compte.

4.3. PRÉSENTATION COMPTABLE

La structure la plus généralement appropriée d'un compte de ressources en eau naturelles et renouvelables est de type budgétaire et s'apparente à la présentation classique des budgets hydrologiques, avec quelques adaptations du fait que le champ de référence peut être plus complexe qu'un bassin (agrégat de bassins entiers ou partiels) et qu'il faut permettre un minimum d'analyse du système de ressource. Le tableau comptable type est proposé ci-après (tabl. 5.1).

Compte de ressource en eau naturelle renouvelable					
Champ :			Unité :		
Période de référence :					
Entrées		Sorties			
Ressources pluviales ⁽¹⁾		Evapotranspiration réelle des terres arables			
Total 1	.....	Total 1			.....
Ressources intérieures ⁽¹⁾		Flux sortants	régulier	irrégulier	Total
- Apports productifs d'écoulement :		- Ecoulement à la mer :			
. ruissellement	.....	. superficiel	.....	.....	.....
. infiltration	.....	. souterrain occulte	.....	.....	.....
Total	.....	Total	.....	.....	.....
Ressources extérieures		- Emission par évaporation (en zone aride) ⁽²⁾
- Affluents de pays voisins	.....	- Ecoulement → pays voisins ⁽³⁾ (superficiel + souterrain)	.....	.....	.....
Total 2	.....	Total 2	.....	.....	.....
- Déstockage de réservoir naturel ⁽⁴⁾		- Stockage en réservoir naturel ⁽⁴⁾			
Total 3	.....	Total 3			.....
Grand total 1 + 2 + 3	.....	Grand total 1 + 2 + 3			.....

Tabl. 5.1 - Compte de ressource en eau naturelle renouvelable

Notes :

- (1) En principe la somme des ressources pluviales et des ressources intérieures est égale aux précipitations totales, ou un peu inférieure dans la mesure où une partie de l'évaporation peut être inutile pour la végétation.
- (2) Notamment dans les bassins endoréiques, et y compris l'évaporation des lacs et plans d'eau naturels en toutes zones climatiques.
Ce flux est le plus sujet à estimation approximative et à être calculé par différence, au risque d'accumuler les erreurs des autres.
- (3) Y compris les écoulements affluant à un fleuve frontière ou à un lac partagé.
- (4) Seulement dans le cas où le compte serait établi non pour une année moyenne d'une période assez longue mais pour une année réelle ou une séquence pluriannuelle courte (par exemple : année(s) sèche(s)).

Cette présentation comptable budgétaire offre plusieurs avantages :

- elle permet d'analyser la composition des ressources naturelles à la fois du point de vue de leur origine et du point de vue de leur répartition ;
- elle empêche la dichotomie trop fréquente en ressources "en eau superficielle" et "en eau souterraine" estimées par des approches indépendantes et non cohérentes, donc non additives ;
- elle introduit la distinction entre ressources régulières et irrégulières suivant des critères certes conventionnels -, finalement plus utile du point de vue de l'évaluation d'exploitabilité que la distinction entre ressources en eau superficielles et souterraines (écoulements souterrains et écoulements superficiels réguliers sont en grande partie confondus) ;
- elle incite à ne pas négliger les ressources pluviales ;
- elle est facilement convertible en expressions en pourcentages pour faciliter l'analyse et les comparaisons.

Une présentation plus analytique prenant en compte des transferts entre composants du système de ressource est possible mais n'est à appliquer que dans les cas où elle paraît utile. Les composants à distinguer seraient alors essentiellement :

- le sol (récepteur et "utilisateur" de la ressource pluviale),
- le réseau fluvial (écoulements superficiels),
- les lacs et autres réservoirs superficiels,
- les aquifères (écoulements souterrains),

entre lesquels des échanges réciproques sont en effet effectifs et peuvent être comptabilisés (cf. tabl. 5.2).

Par contre, la prise en compte des différences de qualité des eaux n'est pas possible dans ce cadre. Elle requiert, si elle est jugée utile, une approche spécifique (cf. encadré 6).

Composantes du système de ressource	Entrées					Transferts			Sorties							
	Ressources pluviales	Ruissellement	Infiltration	Affluences de l'extérieur	Déstockage	Total	Echanges rivières/nappe sout. (1)	Echanges rivières/lacs (2)	Solde	ETR	Écoulement superf. → mer	Écoulement sout. → mer	Écoulement → pays voisins	Stockage	Évaporation d'eau superf. ou sout.	Total
Sol	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Cours d'eau superficiels	/	/	/	- + ↑	- + ↑	/	/	/
Lacs et réservoirs superficiels	/	/	+ - ↓	+ - ↓	/	/	/	/	/
Aquifères	/	/	+ - ↓	/	/	/
Total	0	0	0	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Tabl. 5.2 - Compte analytique de ressource en eau naturelle renouvelable

Notes :

- (1) Ces échanges comprennent : des transferts aquifères → rivières (sources, drainage par les cours d'eau) et des transferts rivières → aquifères (infiltrations, notamment en cas d'inondation, pertes) ; leur solde est généralement positif pour les cours d'eau, sauf dans des conditions spéciales (karst, zone aride).
- (2) Ces échanges comprennent : des transferts rivières → lacs (affluences) et des transferts lacs → rivières (émissaires) ; leur solde est généralement nul à moyen terme.

ENCADRÉ 6

COMMENT COMPTABILISER LES RESSOURCES EN EAU SUIVANT LES QUALITÉS ?

Pour l'évaluateur de ressource les différences de **qualités** des eaux comptent autant que les différences de régime (variabilité) ou d'accessibilité. Aussi est-il demandeur d'une répartition des quantités d'eau totales offertes dans un système de ressource suivant les qualités de l'eau, définissables généralement en se référant à une "grille de qualités multi-usages" (cf. chap. 3). Cependant, s'il est possible de décrire des qualités de l'eau, définies ainsi, localement et à un moment donné, voire en moyenne, puis d'interpoler ces données ponctuelles en classant les cours d'eau d'un bassin avec plus ou moins de validité - donc de cartographier les qualités - il ne l'est pas de fractionner le flux global d'un bassin en parts de diverses qualités. Une même quantité d'eau unitaire en écoulement peut en effet changer de qualité en cours de route : les flux locaux auxquels pourraient être attribués différentes qualités ne sont généralement pas additifs mais emboîtés. Une comptabilité des qualités en termes de flux est donc impraticable.

Il a parfois été tenté de quantifier les qualités sur la base des longueurs de cours d'eau classés par qualités, en exploitant une carte ad hoc. Mais ce faisant, on donne le même poids aux kilomètres de fleuve et à ceux de ruisseau

D'où l'idée de pondérer ces longueurs (qui sont bien, elles, additives) par les débits locaux des cours d'eau, en définissant une "unité de mesure d'eau courante" (UMEC) exprimée en $\text{km} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (donc de dimension $L^4 T^{-1}$). Tout réseau hydrographique classé par débit moyen (cf. chap. 4, 5) peut être analysé et quantifié suivant cette approche par une méthode graphique (fig. 29) inspirée de l'évaluation du "potentiel sauvage" hydroélectrique (produits dénivelées x débits), puis faire l'objet d'une répartition de ses UMEC en classes de qualité à partir d'une carte des qualités. Il s'agit alors bien d'une comptabilité qui permet des comparaisons entre des états successifs, mais indépendante du compte en quantités.

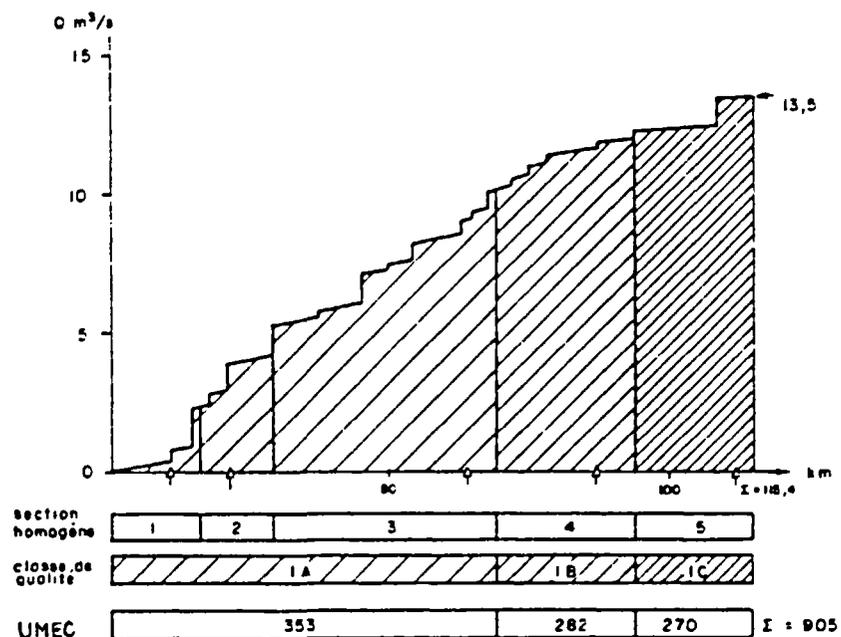
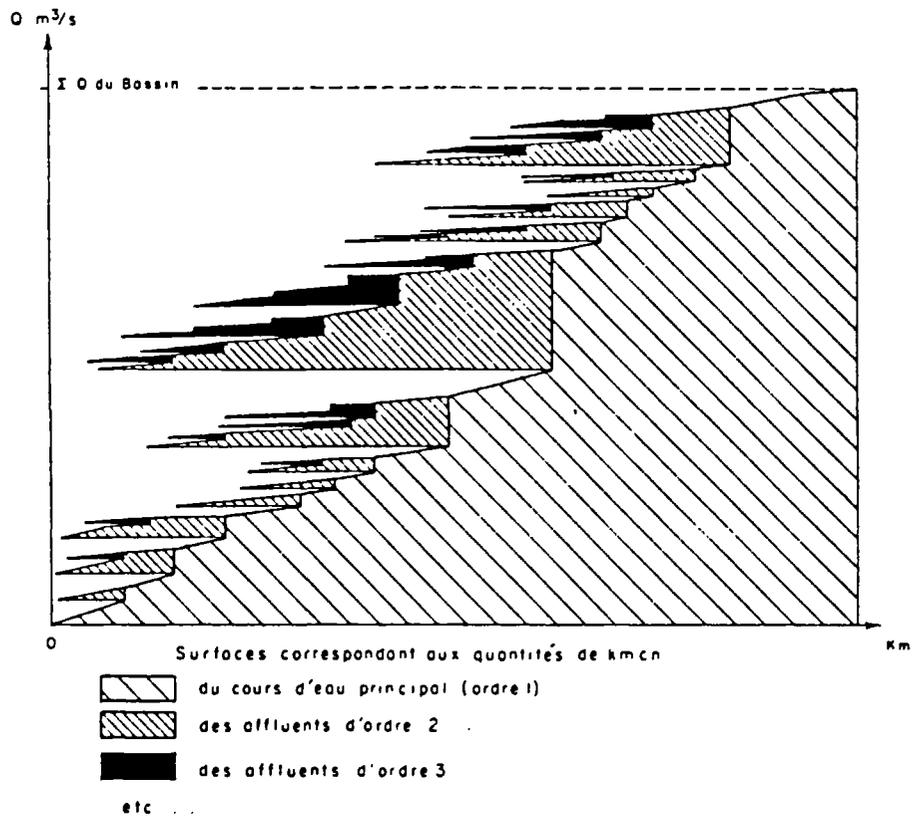


Fig. 29 - Evaluation et répartition des "quantités d'eau courante" par classe de qualité.
 en haut : analyse d'un réseau hydrographique (fictif) et calcul graphique en "unités de mesure d'eau courante" (UMEC)
 en bas : quantification d'un cours d'eau en UMEC (km.m³/s) et répartition par classes de qualités : classe A 39 %, classe B 31 %, classe C 30 %

4.4. PROBLÈMES PARTICULIERS

- Cas des cours d'eau transfrontières entrant : l'apport à comptabiliser doit être un débit réel tenant compte des consommations nettes dans le bassin amont compris dans un pays émetteur. S'agissant d'une moyenne pluriannuelle, il faut donc estimer la tendance d'évolution de cette consommation au cours de la période de référence.

Ce débit est à compter en entier, sauf dans le cas où un partage avec le pays amont a fait l'objet d'une convention (exemple : le Nil entre Egypte et Soudan). Seule la part allouée au pays receveur est alors à compter, cette part ne s'appliquant pas seulement à l'écoulement moyen annuel, mais pouvant aussi prendre la forme d'un débit minimal garanti assorti d'une fréquence fixée.

Cela implique toutefois le risque de doubles-comptes si l'on procède à des agrégats "régionaux", ce qu'il faut alors corriger.

- Cas des cours d'eau frontières : la règle générale est de ne pas les prendre en compte s'ils ne pénètrent aucunement dans le territoire considéré, plutôt que de répartir arbitrairement leur débit entre les pays riverains, en définissant ce débit comme entrée à la section la plus en amont de la frontière formée, et comme sortie à la section la plus en aval (qui peut être l'embouchure à la mer ou une entrée dans l'un des deux pays lorsque le cours d'eau frontière devient transfrontière). Un cours d'eau frontière offre en fait un potentiel d'importation - sauf cas d'espèce de partage convenu, notamment si le fleuve frontière va jusqu'à la mer (exemple : fleuve Sénégal entre Mauritanie et Sénégal) -. Lorsque ce potentiel est en partie utilisé, le flux dérivé correspondant est à comptabiliser comme importation dans les entrées d'un compte de ressource et d'utilisation (cf. infra 6). De même, réciproquement, un fleuve frontière peut être récepteur de rejets d'eau usée, à comptabiliser comme émission à l'extérieur, comme les exportations.

4.5. COMPTABILITÉ DES RESSOURCES NON RENOUVELABLES

C'est cette fois la forme du bilan qui est la seule appropriée, mais en règle générale, en régime naturel, les systèmes de ressource considérés (réservoirs aquifères) sont en état d'équilibre et cette présentation comptable n'est pas significative. Une comptabilité de stock n'a de sens et n'est utile que dans le cas d'un réservoir aquifère exploité, en constituant un compte d'exploitation donc un compte conjoint de ressource et d'utilisation (cf. infra 6).

Toutefois, dans certains cas, la présentation d'un bilan comptable, incluant un budget de flux moyens, entrants et sortants, se référant à une très longue durée (pluri-décennale à séculaire) peut expliciter le renouvellement du système, mettre en évidence les poids relatifs des types d'émissions plus ou moins sensibles aux impacts d'un déstockage (émergences, évaporation), ou même prendre en compte l'hypothèse d'un léger déséquilibre contemporain - donc d'un tarissement naturel - parfois avancée pour certains grands aquifères en zone aride. Exemple : tableau 5.3.

Stock initial km ³	Entrée Alimentation flux moyen en hm ³ /an		Sortie Emissions flux moyen en hm ³ /an		Stock final km ³
~20 000(*)	Limite N	164	Emergences :		~ 20 000(*)
	Limite W et NW	200	- en Algérie (O.Rhir)	90	
	Limite E	210	- en Tunisie	175	
	Grand erg oriental	6	Percolation verticale et évaporation (chotts)	315	
	Total	580	Total	580	

Tabl. 5.3 - Compte (bilan) de l'aquifère du Continental intercalaire du Sahara septentrional (Algérie et Tunisie, aire : 350 000 km²) en état naturel ancien (début du 19ème siècle)

Taux de renouvellement moyen annuel calculé : $\sim 3.10^{-5}$

(*) Réserve totale théorique très supérieure au volume extractible en pratique.
Source : Projet UNESCO "ERESS", 1972.

5. COMPTABILITÉ DES UTILISATIONS BESOINS ET DEMANDES EN EAU

La comptabilité des utilisations d'eau vise d'abord à quantifier avec cohérence la circulation des eaux dans un système d'utilisation et à permettre l'analyse de ce système de manière comparative avec celle d'autres systèmes ou d'autres états du même système, puis elle doit faciliter la jonction avec la comptabilité des ressources. Aussi doit-elle être particulièrement analytique.

On entend par système d'utilisation l'ensemble des structures technico-économiques et des actions de prélèvement, échanges internes, stockages, usages et retours d'eau opérées par un ensemble d'agents déterminé et inscrites dans un espace socio-économique défini. Un compte d'utilisation doit donc se référer à un système bien défini, comme un compte de ressource, mais en outre à une durée définie, en général une année spécifiée, et non plus à une année moyenne. Il porte sur des quantités d'eau qui peuvent être différenciées ou non en qualités.

5.1. SUJETS COMPTABLES

L'analyse comptable d'un système d'utilisation en vue de sa comparaison avec les ressources fait appel à différents concepts essentiels qui se rapportent aux échanges entre utilisations et ressources, et aux mouvements d'eau internes dans le circuit d'utilisation. Aussi convient-il de rappeler quelques définitions.

- **Distinguer besoins et demandes en eau.**

Le besoin en eau est un concept théorique déterminé par les objectifs de l'activité qui l'engendre, donc exprimé le plus souvent de manière "unitaire" (par habitant, par hectare irrigué, par unité de produit, etc.), à caractère normatif (normes d'efficacité, en quantité et en qualités) et prévisionnel. Il est donc utile surtout en programmation, voire comme substitut statistique aux demandes à défaut de recensement ("prévision du présent"), et enfin comme référence "normale" pour évaluer la demande. Il est indépendant de l'offre.

La demande en eau est un fait observable déterminé non seulement par les nécessités de l'activité utilisatrice, mais par l'influence de l'offre : tant de l'offre de la nature - la ressource - que de l'offre d'un secteur de production-distribution intermédiaire. Elle peut de ce fait être supérieure ou inférieure au besoin, en quantité comme en qualités.

En somme, la demande est la transposition et l'expression du besoin dans le réel.

- **Distinguer deux niveaux de demande.**

Du fait de la structure du système d'utilisation d'eau composé à la fois d'agents usagers, exploitants directs ou non, et d'agents intermédiaires exploitants (producteurs-distributeur) non usagers, entre lesquels les échanges peuvent être organisés en marché, les demandes sont à définir et à comptabiliser à deux niveaux : celui des actions sur le milieu naturel, donc sur la ressource qu'il offre, et celui des actions sur le marché, sur l'offre des producteurs. Cette distinction est essentielle du point de vue de l'analyse des relations avec le système de ressource.

En particulier, l'existence d'exploitants-producteurs d'eau desservant plusieurs catégories d'usagers complique la répartition comptable des demandes qui agissent sur la ressource entre les différents secteurs d'utilisation.

- **Etapes du circuit d'utilisation : prélèvements, consommations nettes, retours d'eau.**

L'analyse comptable du système d'utilisation ne doit pas se limiter aux demandes de prise en vue de les comparer aux ressources offertes, mais elle doit couvrir l'ensemble du circuit d'utilisation ; les phases en amont comme en aval des usages, notamment les retours d'eau au milieu naturel qui constituent eux-aussi des demandes agissent sur le même système de ressource : demande de "reprise" d'eau usée à régénérer (auto-épuration).

En somme l'utilisation d'eau sollicite (exploite) la ressource par les deux bouts de son circuit.

Il convient donc de comptabiliser :

- les **prélèvements** : toutes quantités d'eau prises, détournées du milieu naturel (système de ressource) ;
- les **retours d'eau** : toutes les quantités d'eau restituées au milieu soit par les pertes et fuites des circuits de transport et d'usage, soit après usage ;
- les **consommations^(*) nettes** : les quantités d'eau non restituées au milieu, soit évapo-transpirées par les usages, soit incorporées à des produits, soit encore rejetées hors du système de ressource (notamment en mer ...). Ces consommations correspondent en règle générale à la différence entre les prélèvements et les retours, et elles sont estimées le plus souvent comme solde comptable.

Toutefois, la comptabilité du système d'utilisation peut être compliquée par des échanges avec d'autres systèmes de ressource ou d'utilisation connexes, à prendre en compte, mentionnés ci-après.

– **Importations et exportations.**

Un système d'utilisation d'eau peut ne pas être connecté exclusivement à un seul système de ressource. Des échanges "externes" peuvent être alors à prendre en compte :

- **importations** : quantités d'eau provenant de l'exploitation d'autres systèmes de ressource, notamment par transfert entre bassins, éventuellement cédées "en gros" par un agent producteur extérieur ;
- **exportations** : quantités d'eau produites et fournies à d'autres systèmes d'utilisation.

5.2. SECTEURS ÉCONOMIQUES D'UTILISATION

Les agents usagers d'eau se groupent au plan macro-économique en secteurs d'utilisation dont les demandes unitaires et les demandes en qualités, les taux de consommation et de restitution, les structures spécifiques (parts relatives des exploitations directes et des dessertes par des agents intermédiaires) diffèrent largement. Aussi, ces secteurs doivent-ils être comptabilisés séparément, leur globalisation ne permettant qu'une comparaison trop simplificatrice avec les ressources.

Du point de vue de la comparaison analytique avec les ressources, qui doit prendre en compte les exploitations directes du système de ressource par les utilisations, c'est-à-dire les prélèvements et les retours d'eau, cinq secteurs sont à distinguer en priorité :

(*) Les consommations dans ce sens sont définies par rapport au milieu naturel exploité (quantité d'eau prélevée et non restituée), à bien distinguer du sens courant, opposé aux "productions", de quantité d'eau fournie aux usagers "consommateurs", équivalant par conséquent à leur demande.

- **Collectivités**, correspondant à des demandes en eau potable et à des rejets d'eau urbaine. Secteur desservi pour l'essentiel par des intermédiaires producteurs-distributeurs ou assainisseurs-épurateurs, seuls exploitants directs de la ressource, et non homogène au plan des utilisations : il rassemble des usagers domestiques, des entreprises industrielles ou tertiaires et des services publics, qu'il faudrait distinguer dans une comptabilité plus analytique du système d'utilisation.
- **Industries (et entreprises du secteur tertiaire) non desservies**, donc exploitant "en libre-service" la ressource. Ce secteur réunit des usages et des demandes unitaires très variés, en quantité comme en qualités, avec des taux de consommation divers mais généralement faibles ; aussi peut-il être utile, quand les statistiques le permettent, de le décomposer en branches industrielles principales, notamment suivant les usages d'eau dominants. La subdivision la plus significative étant entre les usages comme eau de refroidissement, pour le lavage ou dans des processus.
- **Agriculture (irrigation)**, rassemblant en proportions très variées, des usagers directement exploitants (notamment d'eau souterraine), ou desservis par des organismes exploitants - y compris en aval par le drainage - publics ou collectifs, généralement non marchands. L'alimentation en eau pastorale est le plus souvent agrégée à ce secteur, dont les demandes ont une forte saisonnalité et la gamme des demandes unitaires (par unité de surface irriguée) est fort large, et dont le taux de consommation est le plus élevé.
- **Centrales thermoélectriques (refroidissement)**, secteur très concentré, entièrement exploitant direct, à demande unitaire (en fonction de la production d'électricité) parfaitement identifiée, à taux de consommation finale très faible.
- Enfin, il convient de comptabiliser à part l'évaporation des réservoirs d'accumulation, souvent omise, qui correspond à la fois à un prélèvement et à une consommation finale, mais ne peut généralement pas être imputée à un secteur d'utilisation unique car ces réservoirs sont pour la plupart à but multiple (irrigation, navigation, hydroélectricité, prévention des inondations, etc.) et leurs pertes par évaporation représentent une "dépense commune" du système d'utilisation. Lorsque ce n'est pas le cas, ces pertes peuvent être comptabilisées dans le secteur d'utilisation correspondant.

Dans certains cas des secteurs d'utilisation complémentaires peuvent être utilement ajoutés et comptabilisés, lorsque les quantités d'eau en jeu ne sont pas négligeables :

- les usagers domestiques non desservis (ruraux, essentiellement), directement exploitants, s'ils ne sont pas agrégés aux collectivités ;
- les mines dont l'exhaure, pour dénoyer le sous-sol, équivaut à des prélèvements d'eau souterraine, restitués à peu près intégralement aux cours d'eau (ou exceptionnellement à la mer) ;
- les voies navigables artificielles, entretenues par des dérivations d'eau de surface et consommatrices par évaporation (comme les retenues), avec des retours d'eau ou des exportations dues aux éclusées ;

- les transformations de la couverture végétale lorsqu'elles induisent une réduction d'écoulement, ce qui équivaut à un transfert d'une partie de la ressource en eau à la ressource pluviale (cf. chap. 1) donc à un prélèvement, doublé d'une consommation finale. Certains pays où des opérations de reboisement sont amples comptabilisent ainsi une "demande forestière" (exemple : Afrique du Sud). ;
- les opérations de régénération ou "bonification" de terres salées par épandage d'eau et lessivage.

C'est seulement du point de vue d'une analyse plus affinée du système d'utilisation qu'il conviendrait de désagréger des secteurs non homogènes, tel que celui des collectivités, en prenant en compte séparément les deux niveaux de demande, donc en distinguant les exploitants non usagers et les usagers non exploitants, ce qui conduirait à comptabiliser les transferts entre ceux-ci et ceux-là.

5.3. SOURCES ET ÉLABORATION DES DONNÉES COMPTABLES SUR LES UTILISATIONS D'EAU

Les procédures de collecte des données sur les utilisations varient beaucoup suivant les secteurs et suivant les étapes. Les données sur les prélèvements et sur les demandes des usagers procèdent soit de recensements (comptages) plus ou moins complets, soit d'enquêtes ("sondages"), soit d'estimations indirectes basées sur la connaissance des facteurs de demande. C'est là, qu'à défaut de données d'inventaire direct, on procède à des estimations basées sur des besoins unitaires supputés (eau potable per capita, eau d'irrigation par hectare, etc.) et sur les nombres d'unités connus (population, superficie irriguée, etc.). Ces données sont les plus précises lorsqu'il s'agit d'eau marchande (eau potable surtout) ; elle sont les plus floues dans le secteur agricole. En particulier lorsqu'il s'agit principalement d'irrigation de complément aux ressources pluviales, très variable suivant les aléas climatiques, il est préférable d'estimer et de comptabiliser la demande moyenne annuelle d'une séquence pluriannuelle (de l'ordre de 5 ans par exemple), plutôt que de prendre en compte celle d'une année spécifique.

Les chiffrages des consommations et des retours procèdent essentiellement de calculs basés sur des coefficients "statistiques" dont la validité est pour le moins inégale ...

Taux moyens de consommation nette par les usages des quantités d'eau utilisées, les plus généralement appliqués :

- collectivités urbaines	5 à	15 %
- collectivités rurales	10 à	50 %
- industries		5 %
- irrigation	60 à	90 %
- élevage	75 à	90 %
- refroidissement des centrales thermiques :		
· en circuit ouvert	0,7 à	1,5 %
· en circuit fermé	10 à	70 %

ENCADRÉ 7

PROSPECTIVES DES UTILISATIONS

L'évolution des utilisations d'eau à moyen ou long terme est fortement dépendante de l'évolution démographique et du développement socio-économique. L'art de les prévoir à un horizon voulu ne peut être traité dans le cadre du présent essai : rappelons seulement quelques idées directrices à ce sujet :

- La prospective des besoins en eau, déduite des projections de population, de modes de vie (urbanisation), de productions (industrielle, agricole, énergétique, etc.) et des normes d'usages, est à distinguer de la prospective des demandes qui dépend en outre des conditions de l'offre (de l'état des ressources et des conditions de production d'eau) et de niveau de développement socio-économique qui permet de les satisfaire. La prospective des demandes procédera opportunément par scénarios.
- Les prévisions des demandes en eau par extrapolation des tendances antérieures observées ou par application de taux de croissance aux états présents sont également à déconseiller. Dans le passé ces approches ont généralement abouti à des surestimations par rapport aux évolutions réelles survenues. Il est préférable de procéder à partir de variables exogènes, dont l'évolution est prévisible, dont la validité explicatrice doit être ajustée sur les situations prises comme état initial. Par exemple, pour la demande en eau potable des collectivités : la population, le taux de desserte, la demande per capita, le rendement de distribution, etc.
- Les demandes en eau futures ne sont pas seulement sujettes à prévision, mais à programmation et à aménagement planifié, par divers instruments de "gestion des demandes" (tarification, éducation, aides aux économies d'eau, etc.)

N.B : Ces taux s'appliquent bien seulement aux quantités d'eau entrées en usage et non aux prélèvements initiaux, souvent plus grands du fait des pertes de transport ou de distribution. Par ailleurs, une partie des rejets donc des quantités non consommées par les usages peut être déversée hors du système de ressource (effluents en mer, etc.) donc être consommée par rapport à ce système. Ce que la comptabilité fera apparaître.

Comme dans le cas des ressources un effort d'homogénéisation et de synchronisation des données est un préalable à leur introduction dans des tableaux comptables. Il convient en particulier de les ramener à une même année de référence, alors que leurs dates de valeur originales sont souvent discordantes.

Prise en compte des variabilités interannuelles : en comptabilisant seulement des volumes d'eau annuels, on occulte des variations interannuelles parfois amples, notamment dans les secteurs d'utilisation à forte saisonnalité des demandes (irrigation, certaines agro-industries, industrie touristique, etc.). Cela atténue la signification des comparaisons avec la ressource, dont le régime de variation saisonnière peut être déphasé de manière contraire, ce qui accentuerait les risques de tension saisonnière. La prise en compte de ces variations, notamment des demandes de pointe, est possible soit par des comptes annexes saisonniers moyens, soit en introduisant une subdivision de certaines demandes annuelles en une fraction régulière et une fraction irrégulière, à l'instar de la division des écoulements dans le compte de ressources.

Enfin, un compte d'utilisation prévisionnel fera appel à des données projetées suivant diverses procédures (cf. encadré 7).

5.4. PRÉSENTATION COMPTABLE

Ici encore la structure budgétaire est la plus appropriée mais doit être assez analytique, en se basant à la fois sur la typologie des échanges (flux entrés et sortis) qui définissent les colonnes et sur la distinction des composants du système des secteurs d'utilisation, individualisés par les lignes budgétaires du tableau comptable préconisé (tabl. 5.4).

Les éventuels mouvements de stocks internes étant comptabilisés comme entrées (déstockage) ou sorties (stockage), le budget doit être nécessairement en équilibre (aux approximations près de certains chiffres).

Cette présentation permet d'analyser, globalement et par secteur, les parts relatives des différentes origines des quantités d'eau utilisées et leur répartition après usages ; elle rend explicite les parts prises par les ressources naturelles parmi les sources d'approvisionnement et les taux de consommation des eaux utilisées.

Une présentation plus analytique, dans l'optique évoquée plus haut, nécessiterait d'ajouter des lignes budgétaires, notamment pour le secteur de production-distribution non usager ou pour le secteur de l'assainissement, et des colonnes centrales comptabilisant les transferts intérieurs entre agents. Toutefois ce perfectionnement n'est pas indispensable pour analyser les relations entre ressources et utilisations. Cette présentation serait du type du tableau 5.5.

année :

unité :

Secteurs d'utilisation	Entrées						Sorties						
	Prélèvements sur système de ressource	(1) Imports	Déstockage de réservoir	Productions d'eau non conventionnelles			Total	(2) Consommation par les usages (évapotransp.)	Exportations	(4) Emission d'eau usée hors du système de ressource (→ mer,	Retour d'eau au système de ressource	Stockage en réservoir (dans le système d'utilisation)	Total
				Dessalement	Réutilisation	Total							
Collectivités (alimentation en eau potable)													
Agriculture (irrigation, alimentation pastorale)													
Industries non desservies													
Energie (refroidissement)													
Réservoirs (pertes par évaporation) ⁽³⁾													
Autres													
Total													

Tabl. 5.4 - Compte d'utilisation

Notes :

- (1) y compris prélèvements dans un fleuve frontière.
- (2) ou incorporation aux produits.
- (3) lorsque ces pertes ne sont pas imputables à un secteur d'utilisation défini. La même quantité est à inscrire en prélèvement et en consommation.
- (4) y compris à un fleuve ou à un lac frontière.

Enfin, une structure de bilan ne présente un intérêt en pratique que dans le cas particulier où les mouvements de stock seraient prédominants dans le système d'utilisation, par exemple si la principale source d'approvisionnement est constituée par les lachures d'un réservoir d'accumulation. Il s'agit alors plutôt d'une comptabilité de gestion et les bilans seront dressés pour des périodes courtes et séquentielles, ce serait le cas, par exemple, pour des comptes annuels du système constitué par le réservoir d'Assouan et la vallée du Nil en Egypte.

Agents du système d'utilisation	Entrées				Transferts Internes			Sorties					
	cf. tableau 3				Total	Distribution	Collecte	Solde	cf. tableau 3				
Agents exploitants (usagers ou non) :													
- producteurs-distributeurs	↓
- industries non desservies						↓							
- agriculteurs non desservis						↓							
- énergie (refroidissement)						↓							
- services assainissement, drainage	↓	↑
- autres						↓							
Agents usagers non exploitants :													
- industries desservies						↑	↓						
- ménages desservis						↑	↓						
- agriculteurs desservis						↑	↓						
- services publics desservis						↑	↓						
- autres						↑	↓						
Total						0	0	0					

Tabl. 5.5 - Compte d'utilisation

6. COMPTABILITÉ CONJOINTE DES RESSOURCES ET DES UTILISATIONS

La connexion des comptes de ressources et d'utilisation vise à comptabiliser et expliquer les résultats des actions d'utilisation sur les ressources et à estimer les disponibilités, tant au présent que dans des situations projetées. Elle nécessite deux comptes de liaison préalables pour relier les structures respectives du système de ressource (notamment ses composants superficiels et souterrains, ou irréguliers et réguliers) et du système d'utilisation (secteurs macro-économiques exploitants), afin de permettre les reports comptables voulus. Cela permet en outre d'analyser ces correspondances entre composants des ressources et agents utilisateurs : analyse des sources d'approvisionnement et des "allocations" de ressource d'une part, analyse de la répartition des retours d'eau et de l'imputation des impacts engendrés d'autre part (cf. tabl. 5.6 et 5.7 qui constituent des matrices d'échanges, en se tenant aux cinq secteurs d'utilisation majeurs définis plus haut, sans limitation toutefois). On notera que le compte de liaison II (tabl. 6) ne comporte en lignes que les ressources régulières, seules en pratiques réceptrices des retours d'eau, eux-mêmes relativement réguliers.

Dans chaque compte de liaison les sommes des colonnes doivent être cohérentes avec celles des lignes des comptes d'utilisation (tabl. 5.4 ou 5.5). Ces sommes seront à leur tour reportées dans les lignes du compte conjoint présenté ci-après (tabl. 5.8).

Ces comptes de liaison s'appliquent aussi bien à des situations présentes qu'à des situations projetées.

Le **Compte conjoint de ressource et d'utilisation** présenté par le tabl. 5.8 réunit les comptes séparés de ressource et d'utilisation décrits précédemment. Ce compte conserve une structure budgétaire entrée/sortie, en limitant au minimum les subdivisions des systèmes qui définissent les lignes (les secteurs d'utilisation exploitants peuvent être distingués ou confondus), en ramenant à trois les composantes d'entrée et de sortie respectives qui définissent les colonnes, et en comptabilisant les échanges entre les systèmes de ressource et d'utilisation sous forme de transferts en colonne.

La somme des sorties de la ligne "total des ressources" définit des disponibilités théoriques, au sens de solde ressources-utilisations en quantité (mais une partie de ce solde comptable global est faite d'eau déjà utilisée), sous réserve de contraintes éventuelles (flux inexploitable ou flux à réserver ou à conserver).

Cette présentation peut être convertie en pourcentage (base 100 = somme des entrées ou des sorties ...) pour faciliter l'analyse et les comparaisons, et elle permet le calcul de certains indicateurs (cf. chap. 6).

Une structure de bilan peut être plus appropriée dans le cas particulier où il s'agit de comptabiliser l'exploitation de ressource non renouvelable en majeure partie. Un tel compte doit se référer de préférence à une longue durée (décennale ou pluri-décennale) et il peut utilement se diviser en comptes successifs, à estimations de stock intercalaires. Exemple : compte du système aquifère exploité du Continental terminal du Sahara septentrional (Algérie, Tunisie) déjà cité - (tabl. 5.9).

Date ou horizon de référence :
 indique les objets de chiffrage

Unité : hm³/an ou km³/an

Utilisations (secteurs exploitants) Ressources	Collectivités	Agriculture (irrigation)	Industries non desservies	Energie (centrales therm.)	Réservoirs (évapor.)	Total
Ressources régulières :						
- eau de surface exploitée par prise au fil de l'eau
- eau souterraine exploitée par captage ou pompage
Total 1(*)
Ressources irrégulières : Eau de surface :						
- mobilisée par maîtrise du ruissellement
- mobilisée par régularisation (retenues)
- mobilisée par régulation souterraine (recharge artificielle)
Total 2
Total 1+2(*)
Ressources extérieures(**) ou non conventionnelles
Grand Total

Tabl. 5.6 - Compte de liaison ressource/utilisation. I. Répartition des prélèvements

(*) totaux à reporter dans le tableau 7.

(**) à l'origine d'importations, y compris des fleuves frontières où des prélèvements sont opérés.

N.B. : des colonnes peuvent être ajoutées dans l'éventualité où d'autres secteurs d'utilisation seraient à prendre en compte.

Date ou horizon de référence :
 indique les objets de chiffrage

Unité : hm³/an ou km³/an

Utilisations (secteurs exploitants) Ressources	Collecti- vités	Agricul- ture (irriga- tion)	Industries non desservies	Energie (centrales therm.)	Réservoirs (évapor.)	Total
Ressources régulières :						
- eau de surface(*)
- eau souterraine(*)
Total 1(*)
Ressources extérieures ou milieu non exploité comme ressource(**)
Grand total

Tabl. 5.7 - Compte de liaison ressource/utilisation. II. Répartition des retours d'eau (pertes, fuites, restitutions d'eau usée)

(*) totaux à reporter dans le tableau 7.

(**) y compris des fleuves frontières où des retours d'eau sont opérés.

N.B. : des colonnes peuvent être ajoutées dans l'éventualité où d'autres secteurs d'utilisation seraient à prendre en compte.

Unité : hm³/an ou km³/an

Système de ressource (année moyenne)	Entrées				Transferts			Sorties			
	Apports internes	Apports externes (affluences)	Dé-stockage	Total	Prélèvements (1)	Retours d'eau au système de ressource (2)	Solde	Pertes par évaporation	Ecoulement sortant réel	Stockage	Total
					-	+				
					-				
					-	+				(3)
Système d'utilisation (année définie)	Productions artific.	importations	déstockage	Total	/	/	/	consommations par les usages + incorporations	exportations + émissions externes	stockage	Total
					+	-	(4)			
Ensemble Total					0	0	0				

Tabl. 5.8 - Compte conjoint de ressource et d'utilisations

Notes :

(1) reports du compte de liaison I (tabl. 5.6)

(3) cette somme a le sens de disponibilités théoriques

(2) reports du compte de liaison II (tabl. 5.7)

(4) y compris l'évaporation des réservoirs.

Système	Stock initial km ³	Budget ~ 1850- 1950 km ³			Stock 1950 km ³	Budget 1951 - 1990 km ³			Stock final 1990 km ³
		Entrées (2)	Transferts prélèv.	Sorties		Entrées	Transferts prélèv.	Sorties	
Res-source	Réserve extractible ~2000 ⁽¹⁾	~ 60	- 14	~ 47	Réserve extractible - 1	~ 23	- 20	~ 8 ⁽³⁾	Réserve extractible - 5
Utilisation	-	0	+ 14	Consom. 14	-	0	+ 20	Consom. 20	-
Total	~ 2000	~ 60	0	61	- 1	~ 23	0	28	- 5

Tabl. 5.9 - Compte du système aquifère exploité du Continental terminal du Sahara septentrional (Algérie, Tunisie)

Notes :

- (1) de l'ordre de 1/10 de la réserve totale théorique
- (2) flux entrant total : 580 km³/an
- (3) sources presque entièrement taries à partir de la décennie 1980.

Remarques :

- Plus que les valeurs absolues des stocks, estimées très approximativement (même restreintes aux parts extractibles), ce sont les différences qui sont significatives.
- Cette représentation comptable permet surtout d'estimer la part des volumes prélevés imputable à un déstockage de réserve : ici négligeable avant 1950, elle devient appréciable en 1951-1990 (~ 25 %).

Entre 1951 et 1990, les prélèvements excèdent de 5 km³ la réduction des sorties induites par l'exploitation, d'où une diminution d'autant du stock, et elle atteint 40 % en 1990. Cela permet de détecter une éventuelle "surexploitation" de ressources renouvelables bien avant que les prélèvements n'excèdent les apports.

CHAPITRE 6 : INDICATEURS

Différents indicateurs peuvent servir utilement à apprécier et à comparer les ressources en eau de divers territoires, ainsi que l'état des pressions des demandes sur ces ressources, au présent ou au futur projeté.

1. INDICATEUR D'ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LES RESSOURCES EN EAU

Indice de validité des bases hydrologiques d'estimation des ressources en eau naturelles.

En considérant que l'estimation de l'écoulement global formé sur un territoire - identifié à la ressource en eau intérieure - serait complète si les bassins qui le composent étaient jaugés en totalité pendant une période de durée normée, on peut apprécier l'état des connaissances par un indice simple intégrant les proportions respectives de la superficie du territoire et de la durée normée auxquelles se rapportent les données hydrologiques disponibles :

$$\frac{\Sigma \text{aires des bassins intérieurs jaugés}}{\text{Aire totale du territoire}} \times \frac{\text{n années de mesures}}{\text{N années durée d'observation normée}}$$

Produit de deux pourcentages, cet indice est sans dimension et sa valeur peut varier de 0 à 1.

Les différents bassins jaugés dans un territoire n'ayant pas des durées d'observation égales, les parts de territoire de chaque bassin sont à pondérer suivant les parts de durée normée d'observation respectives.

Exemple : Territoire contrôlé par 10 stations hydrométriques dont les bassins couvrent 70 % de l'aire totale. Durée normée : 25 ans.

Bassin (n° de station)	% de l'aire totale (1)	n années d'observation (2)	% de la durée normée (3)	Indice de validité produit (1) x (3)
1	30	25	100	0,3
2	15	10	40	0,06
3	8	20	80	0,064
4	6	5	20	0,012
5	4	15	60	0,024
6	2	8	32	0,0064
7	2	10	40	0,008
8	1	8	32	0,0032
9	1	8	32	0,0032
10	1	5	20	0,002
Total	70	-	-	0,48

Naturellement cet indice ne prend en compte aucune appréciation sur les qualités des observations, qui sont présumées uniformes.

Cet indice exprime en somme la part du chiffrage de l'écoulement global formé sur le territoire considéré qui ne résulte pas d'extrapolations dans l'espace et dans le temps.

2. INDICATEURS CARACTÉRISTIQUES DE LA RESSOURCE EN EAU NATURELLE D'UN TERRITOIRE

Cinq indicateurs intrinsèques principaux peuvent caractériser la magnitude et la structure spatio-temporelle de la ressource en eau naturelle rapportée à un territoire et faciliter la comparaison de différents territoires, notamment de pays.

1. Densité de ressource intérieure :

$$\text{ratio} = \frac{\text{flux moyen de ressource intérieure}}{\text{aire du territoire}}$$

Il s'exprime en unité d'écoulement par unité de surface, par exemple en $10^3 \text{ m}^3/\text{an}$ par km^2 , ou en hauteur d'eau moyenne annuelle équivalente (mm/an). Cet indice permet de comparer les ressources intérieures de territoires de superficies différentes. Il est d'autant plus significatif que l'indice d'indépendance du territoire considéré (infra 4) est élevé.

2. Indice de concentration :

$$\text{ratio} \frac{\text{flux moyen du système (bassin fluvial) le plus abondant}}{\text{flux moyen de ressource totale}} \times 100$$

Cet indice, en donnant le poids relatif du principal "système d'eau" (fleuve) d'un territoire mesure la possibilité de maîtrise des eaux par des aménagements majeurs ou au contraire par un nombre plus élevé de petits aménagements.

3. Indice de régularité :

$$\text{ratio} \frac{\text{flux moyen de ressource régulière}}{\text{flux moyen de ressource totale}} \times 100$$

Cet indice mesure la possibilité de maîtrise des eaux sans aménagement de régularisation, donc l'accessibilité de la ressource de ce point de vue. Sa comparabilité d'un territoire à un autre implique une définition homogène de la ressource régulière.

4. Indice d'indépendance :

$$\text{ratio} \frac{\text{flux moyen de ressource intérieure}}{\text{flux moyen de ressource totale}} \times 100$$

Cet indice mesure le degré d'autonomie d'un territoire par rapport aux territoires limitrophes au plan des ressources en eau. Le ratio complémentaire serait un "indice de dépendance", mesurant la sensibilité des ressources en eau aux utilisations dans les territoires en amont, donc de relative subordination ou insécurité sur ce plan.

5. Indice de liberté d'action :

$$\text{ratio} \frac{\text{écoulement naturel sortant non affluent à des territoires limitrophes(*)}}{\text{flux moyen de ressource totale}} \times 100$$

(*) c'est-à-dire sortant en mer ou affluent à des eaux continentales saumâtres ou salées non comptabilisées comme ressource, ou encore évaporé.

Ce ratio peut s'appliquer aux flux moyens annuels ou aux seuls écoulements réguliers, pour lesquels il peut être plus significatif. Il mesure le degré de liberté d'action sur les ressources en eau d'un territoire sans contrainte de réservation ou risque de conflit avec les utilisateurs dans le ou les territoire(s) en aval.

Le ratio complémentaire exprime la solidarité de fait entre un territoire et des territoires tributaires en aval, en indiquant le poids relatif des ressources à partager pour le territoire émetteur.

Un sixième indicateur relativise les ressources au principal facteur de demande en eau : la population.

6. Ressources en eau per capita :

$$\text{ratio} \frac{\text{flux moyen de ressource totale}}{\text{nombre d'habitants}}$$

Il s'exprime en m³/an par habitant et doit se référer obligatoirement à la date d'estimation de la population. Il peut avoir un sens prévisionnel en se rapportant à une population projetée à un horizon donné.

Le ratio inverse :

$$\frac{\text{nombre d'habitants}}{\text{flux moyen global de ressource}}$$

exprimé en nombre d'habitant par unité de flux de ressource, en pratique par hm³/an, a la signification d'une **densité de population par unité de ressource**, toujours en référence à une date spécifiée.

Les ratios plus spécifiques :

ressources régulières per capita :

$$\frac{\text{flux moyen global de ressources régulières}}{\text{nombre d'habitants}}$$

et ressources intérieures per capita :

$$\frac{\text{flux moyen global de ressources intérieures}}{\text{nombre d'habitants}}$$

sont également caractéristiques pour comparer des territoires différents à la fois par la population et la structure des ressources.

Les expressions de la ressource rapportées aux populations traduisent mieux la "richesse" ou la "pauvreté" en eau d'un territoire que la seule "densité de ressource intérieure".

3. INDICATEURS DE PRESSION HUMAINE SUR LES RESSOURCES EN EAU EN QUANTITÉ

Face à la pluralité des utilisations de l'eau dans tous les secteurs économiques de production et de consommation, la ressource est une dans le milieu naturel. Aussi est-il fondé de mesurer par des indicateurs globaux, "macro-économiques", l'intensité de cette utilisation, donc de la pression

quantitative sur la ressource d'un territoire. Deux indicateurs pertinents sont : l'indice d'exploitation(*) et l'indice de consommation(**).

– **Indice d'exploitation :**

$$\text{ratio} \frac{\text{somme des prélèvements en eau (pour toutes utilisations)}}{\text{flux moyen de ressources naturelles (renouvelables) totales}} \times 100$$

Les deux termes doivent être exprimés en unités homogènes (10^6 ou 10^9 m³/an selon les cas) et bien se référer au même territoire. Le numérateur (prélèvements) et par conséquent l'indice calculé se réfèrent à une année spécifiée.

Les prélèvements sont à définir comme au chap. 5 : ensemble des quantités d'eau souterraine ou superficielle prises dans le milieu naturel.

En principe seuls sont pris en compte les prélèvements d'eau douce. Des prélèvements d'eau continentale saumâtre - non négligeables dans certains pays, pour utilisation directe ou comme composante de mélange, ou encore comme matière première de production d'eau douce par dessalement - ne seraient à compter que si de telles eaux étaient comprises aussi dans l'estimation des ressources. Les quantités d'eau évaporée à partir de plans d'eau artificiels (réservoirs d'accumulation) sont en principe à assimiler à des prélèvements et à prendre en compte, puisqu'elles sont induites par les aménagements.

– **Indice de consommation :**

$$\text{ratio} \frac{\text{somme des consommations finales (par toutes les utilisations)}}{\text{flux moyen de ressources naturelles (renouvelables) totales}} \times 100$$

Comme pour l'indice précédent les deux termes doivent être exprimés en unités homogènes et se référer au même territoire, les consommations devant se référer également à une date de valeur.

Ces consommations finales sont bien définies comme le solde de la soustraction :

prélèvements totaux - restitutions aux eaux continentales du territoire (y compris la part restituée d'eau importée).

Comme on les a définies au chap. 5, elles correspondent aux quantités d'eau :

- soit évapotranspirées par les usages (y compris l'évaporation des plans d'eau artificiels) ou incorporées aux produits ;
- soit exportées ;
- soit, après usages, déversées en mer ou dans des eaux saumâtres, superficielles ou souterraines, non comptabilisées comme ressources.

(*) dénommé aussi par l'OCDE "indicateur d'intensité d'exploitation" (*indicator of water use intensity*)

(**) *indicator of intensity of consumption*, pour l'OCDE.

Les deux indices peuvent aussi se rapporter aux seules ressources régulières ou aux seules ressources intérieures, pour compléter l'analyse de situation qu'ils permettent.

Ces indicateurs macroscopiques synthétisent les résultats de la comparaison comptable analytique des ressources et des utilisations d'eau exposée au chapitre précédent. Leur signification est toutefois sensible à l'échelle spatiale. L'indice d'exploitation traduit bien la pression quantitative de l'utilisation sur la ressource localement. Mais cette pression est mieux indiquée à l'échelle régionale des systèmes de ressource et des territoires étendus par l'indice de consommation. Par contre, l'indice d'exploitation est indirectement révélateur de la pression sur les qualités de l'eau, qui sera plus explicitement exprimée par l'indice d'usure proposé ci-après, puisque la part des eaux du milieu composée d'eau retournée après usage croît en fonction des prélèvements.

Ces deux indices concourent à révéler l'acuité des problèmes de l'économie de l'eau dans une région ou un pays : présomption plus ou moins forte de situations critiques (pénuries) conjoncturelles ou chroniques, poids relatif des charges économiques entraînées par la maîtrise des eaux, les approvisionnements et les assainissements.

4. INDICATEURS DE PRESSION HUMAINE SUR LES RESSOURCES EN EAU EN QUALITÉS

- **Indice d'usure des disponibilités en eau :**

$$\text{ratio} \frac{\text{somme des restitutions}}{\text{flux moyen de ressources naturelles} - \text{consommations finales}} \times 100$$

Comme les indices d'exploitation et de consommation précédents, cet indicateur doit s'exprimer en unités homogènes, pour un même territoire et à une date donnée. L'indice d'usure indique la proportion des disponibilités en eau réelles, formée d'eaux usées retournées, à une date donnée, donc la présomption "statistique" du degré de dégradation des qualités des eaux disponibles, toutefois sans quantification de cette dégradation.

- **Indice d'assainissement et d'épuration des eaux usées de collectivités :**

Cet indicateur composite est le produit de deux ratios :

- le taux de raccordement des populations agglomérées à des réseaux d'assainissement :

$$\frac{\text{population raccordée}}{\text{population totale}} \times 100$$

- le taux d'épuration des eaux usées collectées :

$$\frac{\text{flux de matière retiré par l'épuration}}{\text{flux de matière associé aux eaux usées collectées}} \times 100$$

Ces flux de matières peuvent être calculés à partir d'une "production" unitaire par habitant, telle que l'"équivalent-habitant" (eh) usité en Europe :

90 grammes/jour de matières en suspension (MES)
+ 57 grammes/jour de matières oxydables (MO)

$$\text{avec MO} = \frac{\text{DCO} + 2 \text{ DBO}_5}{3}$$

Ainsi 19 eh = 1 tonne/an.

Ce taux correspond au rendement connu ou présumé des stations d'épuration.

L'indicateur composé de ces deux taux mesure en somme l'effort réalisé pour réduire globalement l'impact des rejets d'eau usée sur les ressources dans un territoire.

C'est donc le ratio complémentaire qui indique indirectement la pression exercée par les rejets de matières sur la qualité des eaux réceptrices, et permet de la quantifier globalement en s'appliquant au flux de matière totale théoriquement produit par la population (nombre d'habitant agglomérés x eh).

On ne peut cependant déduire du flux de matières rejeté calculable sur ces bases un indicateur d'impact "moyen" significatif, en le rapportant au flux global des eaux réceptrices (flux moyen de ressources naturelles - consommations finales = disponibilités), car ces rejets sont trop inégalement répartis et les impacts réels sont trop localisés, compte tenu aussi des capacités "auto-épuratrices" très différentes et variables des milieux récepteurs.

ENCADRÉ 8

INDICATEURS

RÉCAPITULATION		Dimension
Densité de ressource intérieure	\bar{Q}_{ri} / A	L. T ⁻¹
Indice de concentration	$\bar{Q}_{r1} / \bar{Q} R$	%
Indice de régularité	$\bar{Q}_{r \text{ min}} / \bar{Q} R$	%
Indice d'indépendance	$\bar{Q}_{ri} / \bar{Q} R$	%
Indice de liberté d'action	$\bar{Q}_{rs} / \bar{Q} R$	%
Ressource en eau per capita	$\bar{Q} R / N$	L ³ . T ⁻¹
Indice d'exploitation	$P / \bar{Q} R$	%
Indice de consommation	$C / \bar{Q} R$	%
Indice d'usure des disponibilités	$R / (\bar{Q} R - C)$	%
avec :		
A	aire du territoire	L ²
$\bar{Q} R$	flux moyen de ressources naturelles totales	L ³ . T ⁻¹
\bar{Q}_{ri}	flux moyen de ressource intérieure	L ³ . T ⁻¹
\bar{Q}_{re}	flux moyen de ressource extérieure	L ³ . T ⁻¹
\bar{Q}_{r1}	flux moyen du système de ressource le plus abondant	L ³ . T ⁻¹
$\bar{Q}_{r \text{ min}}$	flux moyen de ressource régulière	L ³ . T ⁻¹
\bar{Q}_{rs}	flux moyen d'écoulement sortant, non affluent à des territoires limitrophes	L ³ . T ⁻¹
N	nombre d'habitant(*)	-
P	somme des prélèvements(*)	L ³ . T ⁻¹
C	somme des consommations finales(*) (y compris exportations)	L ³ . T ⁻¹
R	somme des restitutions(*) (R = P - C, ou en cas d'importations notables I, R = P + I - C)	L ³ . T ⁻¹
(*) date de valeur à spécifier		

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABDERRAHMAN W.A., *et al.* (1988) - Evaluation of ground water resources in the aquifer systems of three regions in Saudi Arabia. *I.W.R.A./A.I.R.E., 6e Congrès*, Ottawa, mai-juin, vol. II, pp. 350-360.

AKMANOGLU N.O. (1970) - Données d'observation minimales pour la détermination des modules interannuels, pluviométriques et hydrométriques en Afrique occidentale et équatoriale. *Cahiers ORSTOM, Sér. Hydrologie*, vol. VII, n° 2, pp. 3-84, Paris.

BAUMGARTNER A., REICHEL E. (1975) - The world water balance. *Elsevier*, 179 p., Amsterdam, Oxford, New-York.

BERTIN J. (1973) - Sémiologie graphique. *Gauthier-Villars*, Paris, Mouton, Paris & La Haye, 2ème éd., 431 p.

BERTIN J. (1980) - Voir ou lire, in "Cartes et figures de la Terre. *Ed. Centre Georges Pompidou*, pp. 2-8, Paris.

BURKE J.J., GRIFFITHS P.S., HILL L.M. (1989) - The use of a geographic information system toolkit (GIST) in the preparation of hydrogeological maps and associated water resource assessments. *Mem. Internat. Sympos., Hydrogeological maps as tools for Economic and social development*, Hannover, may-june, Heise edit., pp. 576-586.

COLLIN J.J., MARGAT J., MOUSSIE B. (1989) - La cartographie hydrogéologique assistée par ordinateur. *Mem. Internat. Sympos., Hydrogeological maps as tools for economic and social development*, Hannover, may-june, Heise edit., pp. 548-558.

COURAULT D., CLASTRE P., GUINOT J.P., SEGUIN B. (1992) - Utilisation d'images thermiques NOAA pour estimer l'évapotranspiration à large échelle. *VIII^e Journées hydrologiques de l'ORSTOM*, 22-23 sept., Montpellier, pp. 27-37.

ERHARD-CASSEGRAIN A., MARGAT J. (1982) - Introduction à l'économie générale de l'eau. *Masson*, 361 p., Paris.

FALKENMARK M. (1986) - Macro-scale water supply/demand comparison on the global scene. *Beiträge zur Hydrologie 6*, pp. 15-40, Stockholm.

FILIPPI C., MILVILLE F., THIERY D. (1990) - Evaluation de la recharge naturelle des aquifères en climat soudano-sahélien par modélisation hydrologique globale : application à dix sites au Burkina-Faso. *Hydrological Sciences, Journal des Sciences Hydrologiques*, 35, 1, 2.

JOIGNEREZ A., OLIVRY J.C., GUIGUEN N. (1992) - Evaluation des ressources en eaux non prérennes au Mali : méthode de régionalisation de résultats observés. *ORSTOM, VII^e Journées Hydrol.*, 22-23 sept., Montpellier.

MARGAT J., ROCHE M. (1978) - Les aspects techniques et la gestion des données. *O.M.M./CEFIGRE*, Sémin. administ. gest. données utiles à la politique de l'eau, Cannes, Mém. du CEFIGRE S-04, pp. 25-68, 1979, Sophia-Antipolis.

MARGAT J. (1979) - Aridité et ressources en eau. *CIEH/CEFIGRE*, Sémin. internat. politique de l'eau pour l'agriculture en zones arides et semi-arides, Niamey, fév., doc. BRGM 79 SGN 255 HYD, 27 p., Orléans.

MARGAT J., ROGOVSKAYA N. (1979) - Cartographie des ressources en eau souterraine. *Assoc. intern. hydrogéol.*, Sympos. Vilnius, URSS, juillet 1979. Rapport général thème VIII, publ. Mém. AIH, T. XV-2, Moscou 1980, repris en partie dans le document BRGM 79 SGN 783 HYD, J.M., 1979, Orléans.

MARGAT J. (1982) - Evaluation des ressources en eau pour la planification. *CEFIGRE*, conférence au cours international sur la "Planification des eaux en zones arides et semi-arides", Sphia-Antipolis, sept. Conf. II-1, 64 p.

MARGAT J. (1982) - Aires de référence appropriées à l'évaluation des ressources en eau de surface en zone aride et semi-aride. *ACSAD*, coll. sur l'hydrologie des eaux de surface, 11-17 sept. 1982, Damas, 12 p., Publ. 1983.

MARGAT J. (1983) - Typologie des structures hydrographiques et hydrogéologiques appropriées à l'évaluation des ressources en eau superficielle et souterraine en zone aride et semi-aride. Colloque "Ressources en eau et utilisation : méthodes et étude du cas algérien", Univ. Constantine, 10-13 avril 1983. Publ. in "*Rhumel*", revue de l'Institut des Sciences de la Terre, Constantine, 9 p.

MARGAT J.(1984) - Définition de la ressource en eau. *CEFIGRE*, cours "Evaluation des ressources en eau. Aménagement des eaux", Sophia-Antipolis, avr.-mai, 22 p.

MARGAT J. (1985) - Hydrologie et ressources en eau des zones arides. *Mém. Soc. Géol. Fr.*, Journées "la géologie au service des hommes", mai, Paris.

MARGAT J. (1986) - Le compte des eaux continentales. Chap. 5 de l'ouvrage collectif "Les comptes du patrimoine naturel", pp. 281-414. Ed. *INSEE*, les collections de l'INSEE n° 535-536, Sér. D n° 137-138, 552 p., Paris.

MARGAT J. (1987) - Carte des ressources en eau souterraine de l'Afrique, à 1/20 000 000. Publ. in "Les eaux souterraines de l'Afrique septentrionale et occidentale". *UN/Ressources nat.*, Série Eau n° 18, New-York.

MARGAT J. (1987) - La ressource en eau souterraine revisitée. De sa définition à son évaluation et à sa gestion. *Doc. BRGM 87 SGN 524 EAU*, 32 p., Orléans.

MARGAT J. (1988) - L'évaluation des ressources en eau exploitables : une approche structurale. 4e Sympos. intern. sur l'application de l'analyse des systèmes à la gestion des ressources en eau, Rabat, oct., *IFAC/Administr. Hydraulique Maroc*, vol. 1, pp. 15-23.

MARGAT J. (1989) - Les ressources en eau. *CEFIGRE*, Sess. Form. internat. "Planification des ressources en eau", Sophia-Antipolis, mai, 27 p.

MARGAT J. (1992) - Suggestions pour une cartographie des ressources en eau du continent africain à petite échelle. *Hydrogéologie*, 1992, n°1-2, pp. 119-122, Orléans.

MARGAT J. (1992) - L'eau dans le bassin méditerranéen. Situation et prospective. *Economica*, les Fascicules du Plan Bleu, 6, 196 p., Paris.

MARGAT J., ZEBIDI H. (1991) - Evaluation des ressources en eau. Pour des statistiques internationales fiables et cohérentes. VIIe Congrès mondial des ressources en eau, *Assoc. intern. Ress. Eau*, Rabat, 13-18 mai, 7 p.

MOUSSIE B. *et al.*, BRGM (1986) - Carte de potentialité des ressources en eau souterraine de l'Afrique occidentale et centrale à 1/5 000 000. *CCE - Com. inter-africain d'études hydrauliques*, BRGM & Géohydraulique, carte et notice explicative, 78 p., Orléans.

NEULAND H. (1988) - Foodstuff production target in arid zones: issues and prospects from the Arabian Peninsula. *I.W.R.A./A.I.R.E.*, 6e Congrès, Ottawa, mai-juin, vol. III, pp. 115-126.

RODIER J.A. (1977) - Exemple d'estimation systématique des ressources en eau superficielle au Sud du Sahara. *U.N.I.T.A.R.*, Conf. différ. stratégies de mise en valeur et de la gestion des déserts, Sacramento, Californie, USA.

RODIER J.A. (1979) - Evaluation des ressources en eau de surface dans les régions tropicales arides. *CIEH/CEFIGRE*, Sémin. intern. politique de l'eau pour l'agriculture et l'élevage en zones arides et semi-arides. Niamey, fév. doc. BE 5, 15 p.

SZESZTAY K. (1979) - The hydrosphere and the human environment. *A.I.S.H.-UNESCO*, Sympos. Represent. and Experim. Basins. Wellington, New-Zealand.

COLLECTIF (1973) - Design water resources projects with inadequate data. *Sympos. UNESCO/WMO/IAHS*, Madrid, juin, 2vol.

COLLECTIF, KORZOUN V.J. ed. (1974-1978) - World water balance and water resources of the earth. Original en russe, *USSR Commit. for IHD*, publ. en anglais UNESCO, Stud. & report in Hydrology, 25, 1978, 663 p., Paris.

COLLECTIF (1977) - Hydrological maps. *UNESCO-WMO*, Stud. and reports in hydrology n° 20, Genève-Paris.

COLLECTIF (1989) - Hydrogeological maps as tools for economic and social development. *Mem. internat.*, Symposium, Hannover, may-june, Heise edit., 598 p.

COLLECTIF (1992) - Régionalisation en hydrologie. Application au développement. *ORSTOM*, VIIe Journées hydrologiques, 22-23 sept. Montpellier, Communication, 391 p.

ANONYME (1974) - Manuel pour l'établissement des bilans des ressources et des besoins en eau. *NU/CEE, ECE/WATER/5*, New-York.

ANONYME/AQUATER, BRGM (1986) - La recharge naturelle des aquifères de socle sous climats sahélien et soudanien. Etude au Burkina-Faso. *CCE, FAC et Minist. ital. degli Affari esteri*, BRGM-AQUATER, Rapp. 860 BFA 177 EAU, Orléans.

ANONYME/FAO (1987) - Irrigation and water resources potential for Africa. *FAO*, doc. AGL/MICS/II/87, 127 p., Rome.

ANONYME, UNESCO/WMO (1988) - Water resource assessment activities. Handbook for national evaluation. *UNESCO/WMO*, 116 p., Genève, Paris.

ANONYME/PNUD (1990) - Synthèse hydrogéologique du Mali (Rép. du Mali/PNUD-DTCD, *Rapport du projet MLI/84/005*, sept.

ANONYME/OCDE (1991) - Environmental indicators. A preliminary set. Indicateurs d'environnement. Une étude pilote. *OCDE*, 77 p., Paris.

ANONYME, WMO/UNESCO (1991) - Report on water resources assesment. *WMO/UNESCO*, 64 p., Genève, Paris.

RÉALISATION BRGM

impression et façonnage :
SERVICE REPROGRAPHIE