

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DE LA RECHERCHE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 63.00.12

ANALYSE DES SYSTÈMES AQUIFÈRES ET ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

par

J. MARGAT



Département géologie de l'aménagement

Division hydrogéologie

B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 63.00.12

76 SGN 532 AME

Décembre 1976

RESUME

Mobiliser des ressources en eau souterraine revient à influencer un système aquifère, c'est-à-dire un système physique, dans des conditions techniquement possibles et économiquement acceptables : déterminer, donc prévoir, les réactions de ce système aux actions projetées, pour les confronter aux contraintes à respecter, est la base de toute évaluation des ressources exploitables.

La notion moderne de système aquifère tient donc une place essentielle dans l'évaluation des ressources en eau souterraine exploitables. Aussi, définir cette notion, puis rappeler comment s'analysent les systèmes aquifères, sont un préalable nécessaire à la description de la procédure d'évaluation de ces ressources.

Cet aide-mémoire, dérivé de plusieurs conférences exposées en 1976 et 1977,* est ainsi consacré :

1) à un résumé des bases de l'analyse des systèmes aquifères, illustré par plusieurs tableaux ou schémas synthétiques.

2) à une présentation abrégée de la procédure d'évaluation des ressources en eau souterraine exploitables, illustré par un organigramme général.

* Université de Nice, Laboratoire de Géologie (8.6.1976) ; Athènes, Colloque franco-hellénique sur les eaux souterraines (15.6.1976) Université de Varsovie, faculté de géologie, Institut d'hydrogéologie et de géologie de l'ingénieur (10.11.1976) ; Université de Neuchâtel (Suisse), Centre d'hydrogéologie (1.2.1977).

INTRODUCTION

Les hommes ont appris empiriquement à rechercher et capter les eaux souterraines depuis des millénaires. Pourtant la notion de ressources en eau souterraine est une idée moderne. Elle est née historiquement avec la constatation que des captages d'eau souterraine avaient parfois des rendements décroissants avec le temps, ou des effets préjudiciables : répercussions sur le régime naturel de sources ou de rivières, ou sur d'autres captages.

Mais ces effets souvent mal interprétés ont d'abord conduit à juger que les exploitations en cause étaient excessives ("surexploitation"). D'où le souci de connaître et d'évaluer la ressource, conçue comme un maximum à ne pas dépasser, ou encore comme un "revenu" au-dessus duquel des dépenses entameraient le "capital". D'où encore l'idée complémentaire de "safe yield", ramenée à l'échelle du puits.

*Jusqu'où peut-on
ne pas aller
trop loin ?*

La notion de ressources s'est ensuite développée en se reliant au souci de projeter et de planifier l'exploitation des eaux souterraines, comprises comme une ressource collective dont l'utilisation ne pouvait être soumise aux seules décisions individuelles sans engendrer des conflits nécessitant des arbitrages, et dont le caractère limité rendait souhaitable un emploi optimal dans l'intérêt général. D'où l'idée d'évaluer les ressources comme une offre à confronter à diverses demandes possibles ou projetables, et plus ou moins valorisantes.

*Ne pas exploiter
trop est bien
exploiter bien
est mieux*

Ce qui complique les choses, c'est que les ressources en eau souterraine s'apparentent à la fois :

- à des ressources renouvelables, comme les eaux de surface (dont elles ne sont d'ailleurs pas indépendantes, dans une grande mesure)

- à des ressources non renouvelables, comme d'autres ressources du sous-sol (minerais, pétrole...).

D'où des confusions nées du fait qu'il est en pratique impossible de capter (= détourner) une partie des premières, sans extraire une partie des secondes (au moins localement et temporairement).

*Gérer un flux et
gérer un stock*

Il s'agit cependant dans les deux cas de ressources finies : le souci de ne pas les gaspiller ni les épuiser, donc de les gérer se justifie pleinement ; mais cette gestion s'apparente à la fois à celle d'un flux et à celle d'un stock.

En pratique le besoin de définir des ressources en eau souterraine naît toujours de la proximité des ordres de grandeur de l'offre et de la demande. Tant que cette dernière reste très inférieure

à l'offre potentielle, il n'y a pas de problème et l'utilité d'évaluer l'offre avec précision n'est pas ressentie. La nécessité de cette évaluation apparaît surtout avec l'obligation d'ajuster la demande à l'offre. Mais on peut aussi concevoir que l'évaluation de l'offre devance l'expression des besoins (elle doit alors les projeter), les ressources en eau souterraine pouvant constituer un facteur attractif du développement et de l'aménagement du territoire, et non pas seulement un facteur limitant.

La demande peut être plus ou moins localisée ou extensive, mais l'offre n'a jamais de caractère local : les ressources -qu'il ne faut pas confondre avec les productivités ponctuelles des ouvrages d'exploitation- sont toujours une notion globale à des échelles certes variées (depuis celle d'un petit aquifère de quelques km² à celle d'un grand bassin sédimentaire de plus d'un million de km²...), mais non ponctuelle.

Aussi dans tous les cas est-il nécessaire de définir un cadre spatial logique pour définir les ressources : ce cadre est le système aquifère, c'est-à-dire le système physique, fini et défini, dans lequel les réactions aux actions projetées sont prévisibles et peuvent être évaluées..

Mobiliser des ressources en eau souterraine revient en effet à influencer ce système dans des conditions techniquement praticables et économiquement acceptables. Evaluer des ressources en eau souterraine exploitables consistera donc à rechercher comment on peut maximiser les quantités d'eau exploitées dans un système donné, en respectant toutes les contraintes fixées, actuelles et futures.

L'hydrogéologie appliquée, longtemps limitée aux objectifs de prospection et d'implantation de captages locaux -qui demeurent primordiaux- est aujourd'hui en mesure de traiter aussi ces problèmes à l'échelle des systèmes aquifères. En les définissant et en analysant leur comportement les hydrogéologues ont fait implicitement de l'"analyse de système". Cette dénomination moderne désigne moins des techniques spécifiques que l'application d'un langage commun - surtout mathématique - à la prise en compte et à l'expression des interactions entre divers phénomènes et problèmes, donc un souci d'unification et d'appréhension globale. Le langage de l'analyse des systèmes a surtout pour intérêt de décrire plus explicitement et de rendre plus rationnelle la procédure d'analyse des systèmes aquifères et des modélisations qui s'ensuivent.

L'analyse des systèmes fait aussi ressortir la nécessité de ne pas séparer l'évaluation des ressources en eau souterraine (exploitables) de celle des ressources en eau en général, donc l'obligation de tenir compte de toutes les relations d'interdépendance entre un système aquifère et les autres systèmes physiques auxquels il est lié (bassin versant), aussi bien qu'avec les systèmes économiques d'utilisation de l'eau, leur ensemble constituant un "système de ressources en eau".

1 - ANALYSE DES SYSTEMES AQUIFERES

*Ce qui est simple est toujours faux.
Ce qui ne l'est pas est inutilisable.*

Paul VALERY

1.1 - Définition

Qu'il s'agisse d'un bassin versant, d'une zone non saturée, ou d'un aquifère, tout système^{*} naturel d'écoulement des eaux peut se définir comme un ensemble de processus qui, dans un champ spatial défini, convertissent des entrées ou impulsions reçues (variables) en sorties ou réponses (variables). On entend par variable toute caractéristique du système qui est mesurable et peut prendre différentes valeurs en fonction du temps.

Un système aquifère, c'est-à-dire un système d'écoulement d'eau souterraine, correspond à tout le champ spatial continu dans lequel les effets de diverses impulsions naturelles ou artificielles (apports ou prélèvements d'eau, variations de niveau aux limites) peuvent se propager librement et influencer le fonctionnement hydraulique, à un terme défini dans le temps.

Il découle immédiatement de cette définition que la notion de système aquifère est relative aux actions envisagées, à leur ampleur, à l'étendue de leur emprise et à leur durée.

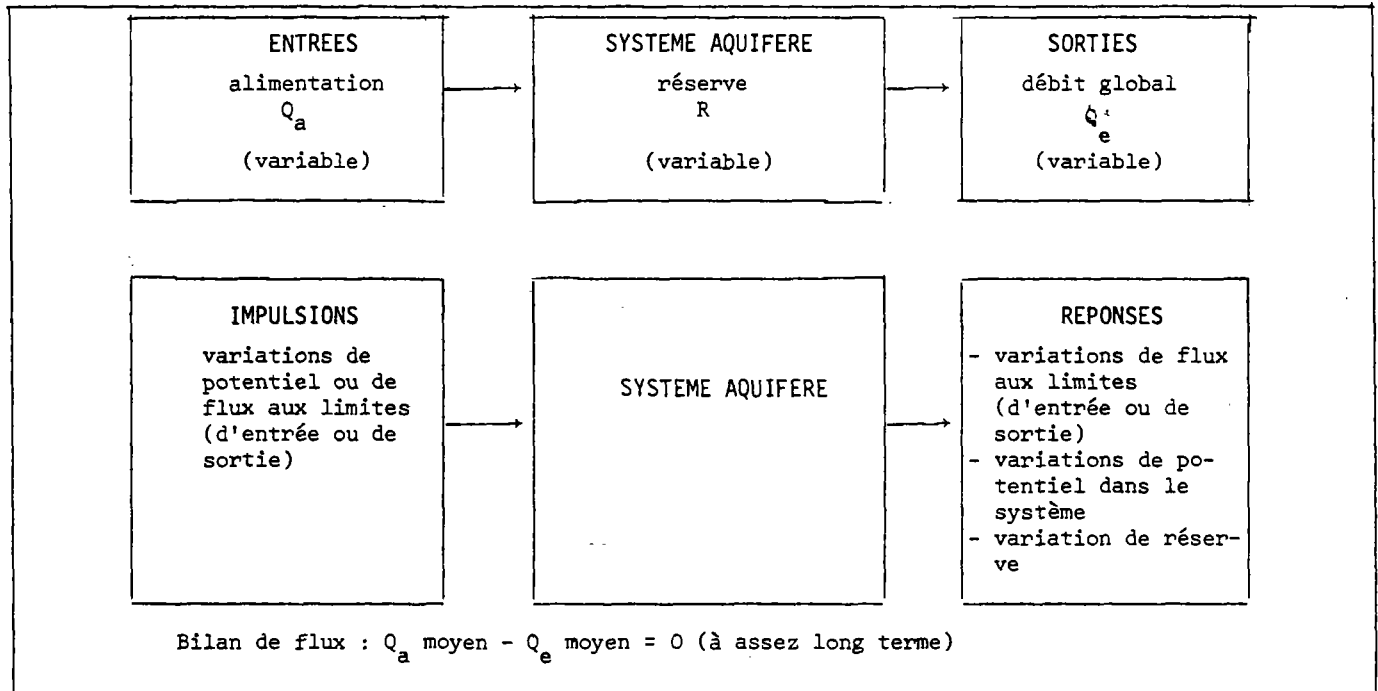
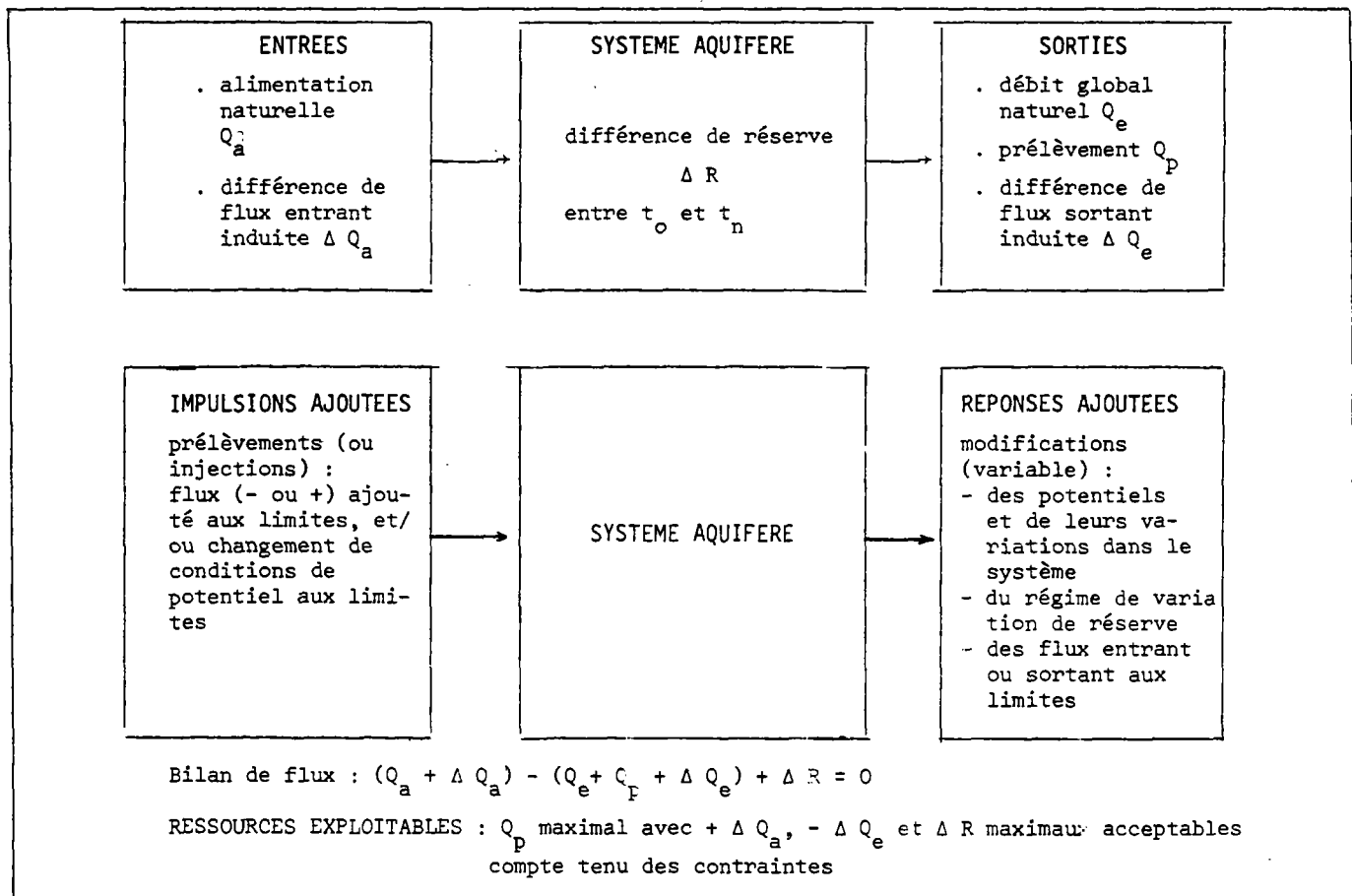
En pratique toutefois les structures hydrogéologiques sont assez hétérogènes et sont affectées de discontinuités assez contrastées pour comporter des "coupures" qui constituent des obstacles relativement fixes et stables aux propagations d'influence, pour des gammes assez étendues de phénomènes. Il est donc possible et il peut être utile de définir des systèmes aquifères naturels, sans perdre de vue néanmoins leur relativité à l'échelle spatiale et aux durées considérées.

Un système aquifère réel se définira alors comme un domaine continu circonscrit par des limites faisant obstacle à des propagations d'influence à l'extérieur, et dans lequel toute impulsion, locale ou régionale, brève ou durable, peut influencer l'ensemble - à des degrés et au bout de temps différents - en déterminant ainsi une "réponse" du système.

^{*} système : "toute structure, dispositif ou procédé réel ou abstrait qui relie, avec un pas de temps donné, une entrée, une cause ou une impulsion (de matière, d'énergie ou d'information) à une sortie, un effet ou une réponse (de matière, d'énergie ou d'information)" (J. JACQUET 1971).

TABLEAU 1

BILAN D'EAU D'UN SYSTEME ET RELATIONS IMPULSIONS/REPONSES

1. En régime naturel2. En régime d'exploitation

Sur le plan physique, un système aquifère est un espace tridimensionnel délimité géométriquement définissable, caractérisable par des conditions aux limites et des conditions initiales et par des paramètres structuraux qui régissent ses fonctions conductrices et capacitatives. Ce système est le siège d'un flux (écoulement) entre des entrées et des sorties d'eau, et de variations de stock, qui peuvent se décrire par un bilan de masse (bilan d'eau). Il se caractérise en outre par son comportement hydrodynamique qui convertit les impulsions reçues (variations de conditions aux limites) en réponses (cf. tableau 1).

NB : pour éviter toute confusion de langage il est recommandé de réserver les termes entrée et sortie aux flux (instantanés ou moyens), aux quantités d'eau entrant et sortant du système, et de traduire input et output des auteurs de langue anglaise par impulsion et réponse.

1.2 - Analyse et modélisation

Un modèle est un assemblage logique de relations et d'informations.

Analyser un système aquifère réel consiste à recueillir et formuler les informations qui permettront de le modéliser, c'est-à-dire d'élaborer un modèle, une représentation conceptuelle logique schématisant la réalité ; ce dernier sera matérialisable ensuite par un simulateur -ou "modèle de simulation"- analogique ou numérique, sur lequel il sera possible de superposer les impulsions calculées ou simulées dont on cherche à apprécier les effets.

On distinguera clairement les concepts de système, de modèle et de simulateur, dont les relations se présentent comme suit :

système aquifère : réalité physique (décrite par des données d'observation)

↓

modèle : représentation simplifiée (lois, structure, paramètres, relation(s) impulsion/réponse)

↓

simulateur : instrument de vérification de représentativité du modèle vis-à-vis du système, et de simulation de changements de conditions ("modèle analogique", "modèle numérique").

On dispose aujourd'hui en hydrogéologie d'une gamme variée de modèles, qui diffèrent par la nature des fonctions (déterministes ou statistiques) reliant les impulsions aux réponses, par leur caractère statique ou dynamique, global ou distributif ("matriciel") (cf. tableau 2).

Tableau 2 MODELES DE SYSTEMES AQUIFERES

	Modèles déterministes (modèles statiques ou dynamiques)	Modèles stockastiques (modèles dynamiques)	Modèles probabilistes (statistiques) (modèles statiques)
	relation causale déterminée entre impulsion et réponse	fonction de transfert non indépendante du temps entre impulsion variable aléatoire (affectée d'une probabilité) et réponse	relation entre probabilité d'impulsion et probabilité de réponse
<u>Modèles conceptuels</u> basés sur l'analyse des processus physiques réels qui déterminent les relations entre impulsion et réponse	Modèles hydrauliques (ou hydrodynamiques) - globaux (relation analytique) ou - distributifs (ou matriciels) prenant en compte des variables régionalisées Ex : modèles de relation entre poten- tiels et/ou flux (conditions imposées et réponses) aux limites ou à l'intérieur du système, en régime permanent ou transitoire	Modèles globaux "précipitations/écoulement à un ou plusieurs réservoirs" (assimilables à des modèles de système aquifère lorsque le ruissellement est nul ou négligeable : domaine karstique)	
<u>Modèles empiriques</u> relation directe non analy- tique entre impulsion et réponse modèles <u>globaux</u> en général ("boîtes noires")	Ex : - hydrogramme unitaire (pluie/débit de source) - modèles globaux "précipitations efficaces"/infil- tration - relation entre profondeur de niveau de nappe et flux prélevé par évapotranspiration	Ex : - modèles de relation précipita- tions/apport à une nappe ("infil- tration efficace") ou - précipitations/écoulement souter- rain (débit de source) (fonction de convolution identi- fiée par déconvolution)	Ex : - relation entre fréquence de préci- tation et fréquence de niveau de nappe ou de débit de source (crues, étiages,...) - relation entre fréquence de niveau de rivière et fréquence de niveau de nappe riveraine - corrélations

Du point de vue de l'évaluation et de la gestion des ressources en eau souterraine, il importe surtout de distinguer :

- (1) Les modèles globaux -déterministes ou non- assimilables à des "boîtes noires", opérateurs ou fonctions de transfert qui transforment des impulsions en réponses : en général les formes respectives des entrées et des sorties aux limites du système.

Ces modèles essentiellement explicatifs ne peuvent représenter que des variations globales des conditions aux limites, donc ne simuler que des changements également globaux de ces conditions. Aussi leur utilité pratique est-elle limitée aux cas où le caractère global d'une "fonction d'entrée" (par exemple des précipitations efficaces infiltrées uniformes dans l'espace) ou d'une "fonction de sortie" (par exemple le débit d'un exutoire unique du système est effectif ou jugé acceptable.

Ces modèles peuvent donc concourir à la représentation de la dynamique d'un système, notamment à préciser la connaissance d'une variable d'entrée calée globalement sur une variable de sortie, ou à schématiser des systèmes annexes (cf. fig. 1) dont les réponses détermineront les impulsions d'entrée du système aquifère considéré (par exemple des modèles précipitations/infiltrations ou précipitations/niveau de cours d'eau). Ils peuvent donc servir à identifier les conditions aux limites à introduire dans les modèles du type suivant (cf. organigramme de la fig. 5). Mais ils ne peuvent prendre en compte des modifications localisées des entrées et des sorties.

Ces modèles peuvent donc être considérés comme des "outils d'appoint" pour schématiser les systèmes aquifères. Ils ne sont pas assez représentatifs pour servir à évaluer des ressources exploitables au stade des choix d'aménagement (planification), mais par contre ils peuvent être très utiles au stade de la gestion des ressources, lorsque la variabilité des apports rend leur "contrôle" nécessaire.

- (2) Les modèles déterministes, conceptuels et dynamiques en général, non globaux ("distributifs"), qui représentent les structures, les paramètres et le comportement physique réel d'un système.

Ces modèles peuvent seuls représenter -plus ou moins finement selon leur degré de régionalisation- la distribution dans l'espace des variables d'entrée et de sortie, et surtout la localisation des modifications des conditions qui seraient dues à une exploitation simulée (prélèvements et influences). Or, pour apprécier ces effets de projets d'exploitation, il importe autant de prévoir avec assez de justesse leur localisation que leur évolution dans le temps. Ces modèles sont donc seuls suffisamment prédictifs pour les besoins de l'évaluation des ressources en eau souterraine exploitables.

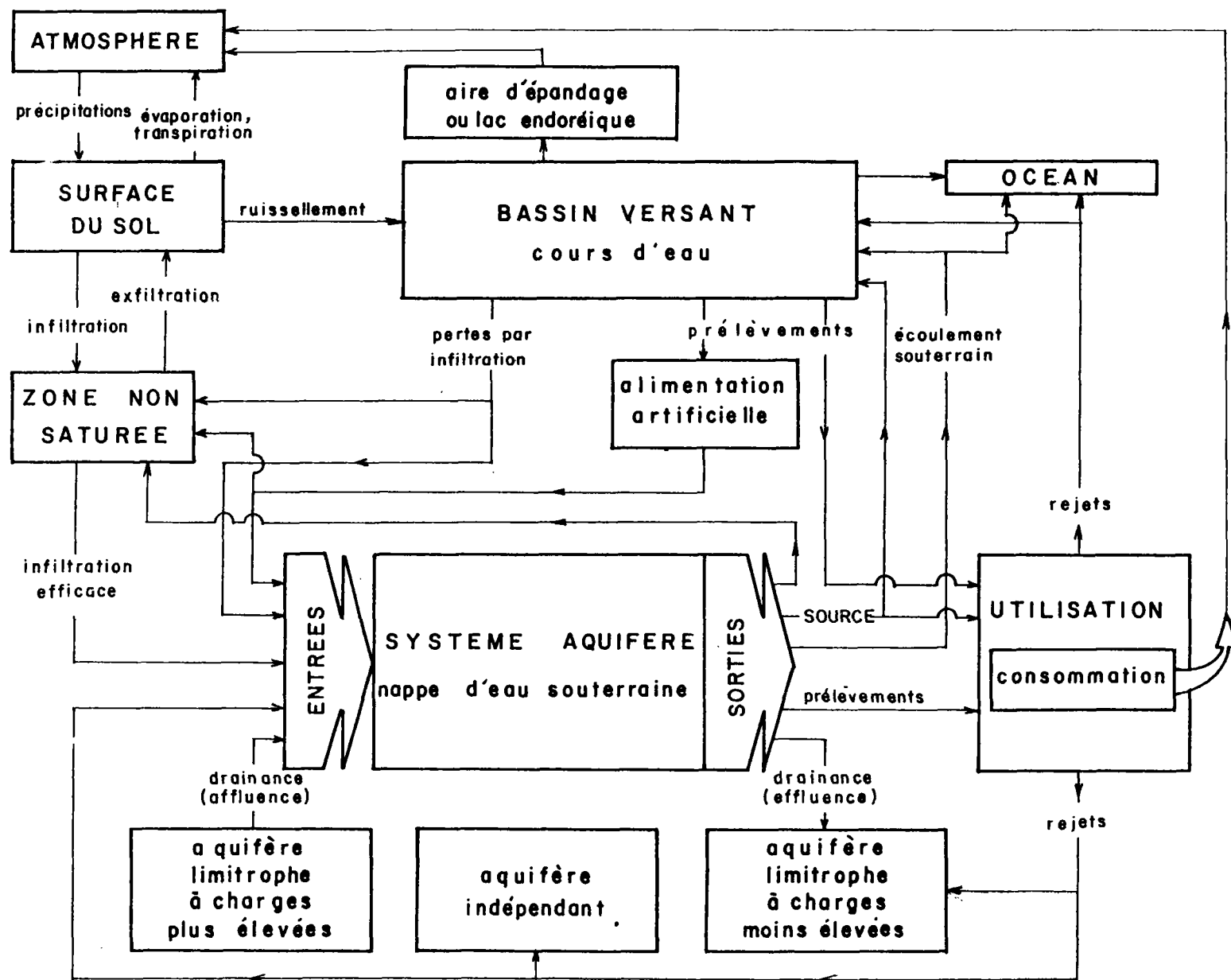


fig. 1 — Interconnexions entre un système aquifère et les systèmes hydrauliques qui lui sont reliés (échanges de flux)

Pour représenter avec assez de réalisme le comportement dynamique d'un système aquifère, ces modèles nécessitent par conséquent une schématisation assez exacte de sa structure et une identification assez précise de ses paramètres.

En fonction de l'objectif d'évaluation des ressources envisagées ici, l'analyse d'un système aquifère aura pour but principal d'élaborer un modèle déterministe du type (2). Ce sera l'objet essentiel du développement qui suit.

Analyser un système aquifère consistera essentiellement à décrire sa structure - son "anatomie" - et son fonctionnement hydraulique naturel - sa dynamique -, en vérifiant la cohérence générale entre les paramètres constants ou variables qui définissent l'une et régissent l'autre (ce sera là la première utilité d'un modèle), puis à évaluer la sensibilité de son comportement à des modifications : notamment celles qui seraient déterminées par des exploitations projetées (ou toute autre action).

1.3 - Structure

La structure d'un système aquifère se définit par sa géométrie - sa configuration - et, s'il n'est pas homogène (ce qui est généralement le cas), par sa composition en corps relativement homogènes et par la manière dont ils sont assemblés et interconnectés :

C'est la conversion hydrogéologique plus ou moins simplifiée d'une structure géologique plus ou moins complexe. Chacun des corps constituant un système est définissable par sa géométrie particulière et par sa nature lithologique qui se traduit par des caractéristiques pétrophysiques propres.

Cinq types essentiels de "composants hydrogéologiques" peuvent participer à la constitution ou à la délimitation d'un système aquifère :

- formations non saturées (sols, roches),
- aquifères, libres ou captifs, continus ou discontinus (karstiques),
- semi-perméables non capacitifs,
- semi-perméables capacitifs ("aquitards"),
- imperméables (aquicludes).

Chacun d'eux se caractérise par une gamme particulière de paramètres hydrauliques et un comportement spécifique vis-à-vis de l'écoulement et du stockage de l'eau dans le sous-sol (cf. tableau 3). Trois fonctions essentielles doivent être bien distinguées dans ce comportement :

- (a) la fonction de conducteur - liée à la perméabilité et à la transmissivité - assurée principalement par les aquifères d'une part, par la zone non saturée et les semi-perméables (seulement pour les flux verticaux) d'autre part,

TABLEAU 3 - COMPOSANTS DES STRUCTURES HYDROGEOLOGIQUES

			PARAMETRES K : perméabilité S : emmagasinement T : transmissivité T/S diffusivité	ÉCOULEMENT DE L'EAU SOUTERRAINE		COMPORTEMENT HYDRAULIQUE		
				forme	régime	Fonction conductrice	Fonction capacitive	Fonction propagatrice d'influence
Aquifères non saturés ou semi-perméables			K_v très variable f (teneur en eau) $\approx S_0 \text{ à } 2.10^{-1}$	unidimensionnel vertical 	permanent ou transitoire	conducteurs très variables	faible capacité	nulle
A q u i f è r e s	aquifères continus	libres	K invariable $\rightarrow 1 \text{ à } 10^{-6} \text{ m/s}$ S invariable $\approx$ porosité efficace $1 \text{ à } 30.10^{-2}$ T variable f (charge = surface libre) T/S faible	bidimensionnel horizontal $\rightarrow$ (tridimensionnel près de singularités)	permanent ou transitoire	bons conducteurs (selon T)	capacité moyenne à grande, dépendante de S et du volume	moyenne à faible
		captifs	K invariable T invariable S variable f (pression, puissance de la couche) $10^{-4} \text{ à } 10^{-3}$ T/S grand	bidimensionnel horizontal $\rightarrow$	permanent ou transitoire		faible capacité	grande
	aquifères discontinus (karstiques) à réservoir à surface libre, capacitif, et à conduits en général noyés (captifs)		(1)matrice (milieu poreux ou fissuré) : K ₁ invariable, faible par rapport à K ₂ S ₁ invariable $\approx$ porosité efficace T variable f (charge)	bidimensionnel horizontal $\rightarrow$ (tridimensionnel près de conduits)	transitoire (en général)	conducteurs variables en général médiocres	capacité moyenne dépendante de S et du volume	faible
			(2)conduits K ₂ conductivité constante ou variable ($K_2 \gg K_1$) S ₂ capacité peu variable, négligeable par rapport à S ₁	unidirectionnel, bi ou tridimensionnel (à l'échelle du réservoir)		très bons conducteurs	faible capacité	très grande
			Semi-perméables (non capacitifs)			K invariable, faible $\rightarrow 10^{-6} \text{ à } 10^{-9} \text{ m/s}$ $\left\{ \begin{array}{l} K_h \text{ négligeable} \\ K_v \rightarrow \text{flux vertical} \end{array} \right.$ S indifférent (n'intervient pas)	unidimensionnel vertical  (drainance)	permanent
Semi-perméables capacitifs ("aquitards") libres ou captifs			K invariable, faible $\rightarrow 10^{-6} \text{ à } 10^{-9} \text{ m/s}$ $\left\{ \begin{array}{l} K_h \text{ négligeable} \\ K_v \rightarrow \text{flux vertical} \end{array} \right.$ Kv/b' (coeff. de drainance) S utile : - nappe libre S $\approx$ porosité efficace - nappe captive S variable f (pression et puissance de la couche $\approx 10^{-3}$)	unidimensionnel vertical  (drainance)	transitoire	mauvais conducteurs	capacité moyenne à grande, dépendante de S et du volume	très faible
Aquicludes ou "imperméables"			K négligeable $< 10^{-9} \text{ m/s}$ S indifférent	écoulement nul (non significatif)		non conducteurs	capacité nulle	nulle

- (b) la fonction de capacité - liée à l'emmagasinement - assurée également par les aquifères et les semi-perméables capacitifs à surface libre.
- (c) la fonction de propagateur d'influence, c'est-à-dire l'aptitude à transmettre plus ou moins rapidement et avec plus ou moins d'atténuation un changement de niveau déterminé en un point donné, liée au rapport de la transmissivité à l'emmagasinement, est assurée essentiellement par les aquifères, mais très différemment selon qu'ils sont libres ou captifs.

Un système aquifère réel est un domaine tridimensionnel plus ou moins hétérogène en général, dont chaque constituant assure différemment et de manière non uniforme les fonctions conductrices, capacitives et propagatrices d'influence.

Remarques :

- les débits qui peuvent traverser des couches semi-perméables, à perméabilité verticale très faible mais dont les surfaces offrent des sections orthogonales au flux de drainance très grandes, peuvent être du même ordre de grandeur que ceux qui transitent horizontalement dans les aquifères.

- la transmissivité est très dépendante de l'échelle : les transmissivités régionales qui régissent l'écoulement moyen des nappes peuvent différer beaucoup des transmissivités locales qui commandent les productivités des ouvrages de captage.

- l'emmagasinement S qui contribue à déterminer la diffusivité hydraulique (T/S) d'un aquifère, donc son aptitude à propager les influences, peut différer sensiblement de celui qui détermine sa capacité, notamment les variations de sa réserve (annuelles, interannuelles) et les volumes d'eau mobilisables par exploitation de la réserve à long terme ; le second est en général plus grand.

Schématiser un système aquifère réel par un modèle conceptuel consiste à introduire diverses simplifications, telles que, selon les cas :

- deux dimensions au lieu de trois (donc bidimensionalité des écoulements)
- hétérogénéité réduite (pouvant aller jusqu'à l'assimilation à un corps homogène)
- discrétisation du domaine par un ensemble de volumes élémentaires homogènes ("mailles" égales ou variables) plus ou moins nombreux.

Les assemblages des différents constituants définis ci-dessus peuvent donner lieu à un grand nombre de structures hydrogéologiques plus ou moins complexes à toutes échelles. En pratique quelques modèles structuraux fondamentaux sont suffisants pour schématiser la plupart des systèmes aquifères réels.

En raison de la constitution sédimentaire des systèmes aquifères les plus courants, la stratification est le caractère structural considéré en priorité : les modèles structuraux se définissent d'abord par le nombre de couches (1 ou plusieurs) qui les constituent, puis par l'extension de ces couches (complète ou partielle par rapport à celle du système) et par les discontinuités qui peuvent les affecter, et enfin par la disposition des corps limitant le système (substratum, couverture, parois) (cf. infra 1.5).

1.4 - Dynamique

Les processus dynamiques dont un système aquifère est le siège sont commandés par les impulsions qu'il reçoit de l'extérieur mais aussi par les rétroactions de ses réponses : ils sont donc liés à la dynamique des divers systèmes hydrauliques connectés au système aquifère, suivant ses limites "ouvertes" qui permettent des échanges de flux. Il importe donc de considérer toutes les relations d'interdépendance entre un système aquifère et les systèmes auxquels il peut être relié : zone non saturée, bassin versant et eaux de surface, aquifères limitrophes, système d'utilisation des eaux (cf. fig. 1).

Ces relations se traduisent par les conditions aux limites du système, qui régissent pour l'essentiel sa dynamique et dont la définition correcte a par conséquent une importance majeure.

Ces limites sont aussi bien les "frontières périphériques" du système que sa surface. Les conditions aux limites naturelles, stables ou variables, sont (cf. fig. 2) :

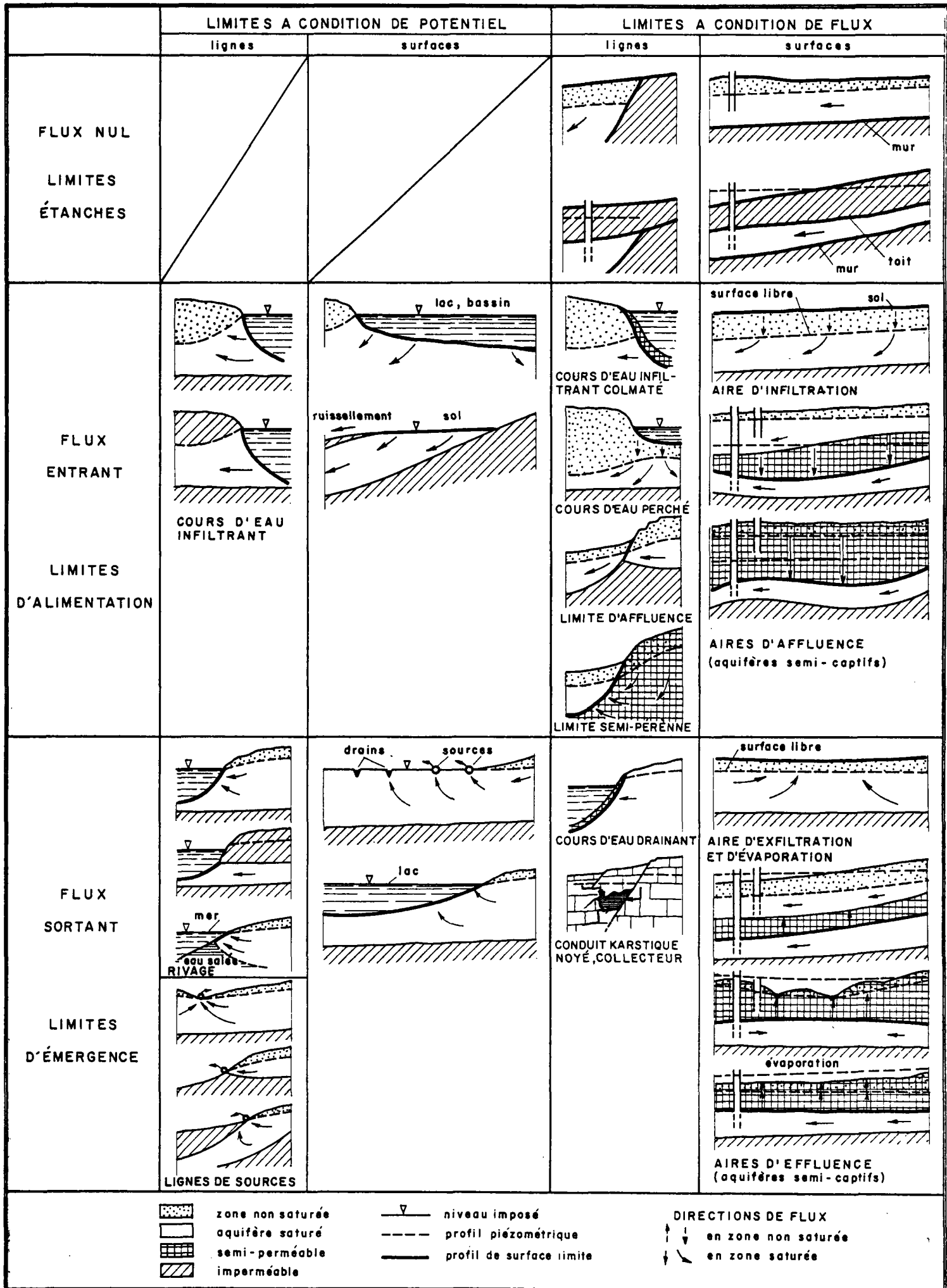
- soit des conditions de potentiel (niveau), imposées par exemple par des cours d'eau ou des rivages de plan d'eau de surface,

- soit des conditions de flux (débit) entrant ou sortant, notamment l'alimentation par infiltration à travers une surface libre, ou un flux nul (limites étanches).

A ces conditions aux limites naturelles peuvent s'ajouter des conditions artificielles, qui modifient les précédentes en degré ou en nature : variation et/ou inversion de flux à une limite à condition de potentiel, création de limites à condition de flux (prélèvement), création ou effacement de limite à condition de potentiel, etc..

Les conditions variables dans le temps - avec ou sans continuité, déterminées ou aléatoires - peuvent faire l'objet d'historiques et/ou de prévisions. Elles nécessitent la définition de conditions initiales.

fig.2 - LIMITES NATURELLES DE SYSTÈMES AQUIFÈRES (schémas bidimensionnels)



Les conditions aux limites déterminent d'une part les différents composants du bilan d'eau du système (flux entrant ou sortant) et d'autre part sa réceptivité aux impulsions et les modalités de ses réponses (cf. tableau 4).

En règle générale, chaque composant du bilan d'eau d'un système aquifère correspond à des conditions aux limites différentes :

- alimentation naturelle : conditions de flux à travers des surfaces, plus rarement conditions de potentiel suivant une limite linéaire
- exutoires naturels : conditions de potentiel imposées surtout sur des limites linéaires (cours d'eau, rivage) ou ponctuelles (sources)
- exutoires artificiels (captages) : surtout conditions de flux ponctuelles (puits), ou parfois conditions de potentiel (drains horizontaux, galeries).

C'est cette différence, entre les conditions aux limites qui régissent les entrées et les sorties d'eau, qui se traduit par le "pouvoir régulateur" d'un système aquifère, c'est-à-dire son aptitude à transformer des impulsions discontinues et plus ou moins irrégulières en réponses continues plus régulières.

Par ailleurs de la nature des conditions aux limites dépendent les types d'impulsion imposables au système : seules les limites à condition de potentiel permettent à un changement de niveau (naturel ou provoqué) à la limite d'influencer le système. La plupart des impulsions naturelles ou artificielles reçues par un système sont des variations de flux (alimentation, prélèvements).

Il en est de même des réponses : seules les surfaces libres permettent à un système de répondre à une impulsion par des variations de niveau liées à une variation de réserve appréciable ; les réponses aux limites périphériques ont en général la forme d'un changement de débit.

Comme la structure, la dynamique d'un système peut être simplifiée par un modèle lorsque ces simplifications sont acceptables vis-à-vis du problème à traiter :

- régime permanent : les conditions aux limites sont invariables (pouvant correspondre à un état moyen), (lorsqu'il n'est pas nécessaire de considérer la fonction capacitive du système).
- discrétisation de l'évolution continue par des "pas de temps" discontinus plus ou moins courts.

TABLEAU 4

VARIATION NATURELLE DES CONDITIONS AUX LIMITES

	CONDITIONS DE POTENTIEL	CONDITIONS DE FLUX
Variation périodique continue	Oscillations du niveau par rapport à un niveau moyen constant : marées (loi sinusoïdale $h f(t)$)	
Variation irrégulière continue	Fluctuations du niveau de cours d'eau pérenne (exogènes surtout), en liaison hydraulique avec l'aquifère	Flux d'infiltration d'un cours d'eau pérenne à niveau variable $Q f(h)$ ----- flux d'exfiltration déterminé par l'évapotranspiration
Variation irrégulière discontinue	Niveau de débordement temporaire (source, cours d'eau drainant temporaire)	Flux d'infiltration efficace (à travers la zone non saturée) : apport aux aquifères libres (à partir des précipitations efficaces et de cours d'eau perchés temporaires)
Variations négligeables ($\equiv$ stabilité)	Niveau de source ou de cours d'eau drainant pérenne indigène, niveau de lac	Flux de drainance (entrant ou sortant) au toit ou au mur semi-perméable d'un aquifère ----- Flux échangé (+ ou -) avec un cours d'eau à berge et lit colmaté

1.5 - Types de systèmes aquifères

La combinaison des différentes structures hydrogéologiques et des conditions aux limites fournit une grande variété de types de systèmes aquifères possibles, donc de modèles conceptuels qui les schématisent.

La typologie des systèmes aquifères repose sur les distinctions :

- de structure
systèmes monocouche (aquifère simple), bicouche (aquifère et semi-perméable au toit ou/et au mur), multicouche (plusieurs aquifères alternant avec des semi-perméables).

Chaque couche peut elle-même être plus ou moins hétérogène, ce qui nécessite une description plus ou moins détaillée de la distribution des paramètres qui la caractérisent.

- de régime hydrodynamique
écoulement à surface libre ou captif, régime permanent (moyen) ou transitoire
 - de conditions aux limites
 - système infini
 - système semi-infini
 - système fini à limites à conditions de potentiel et/ou de flux selon les lieux.
- } hypothèses acceptables pour traiter certains problèmes localisés ou schématiser des phénomènes locaux de courte durée.

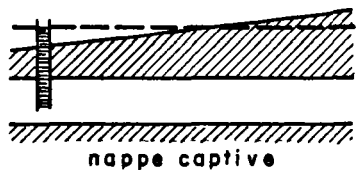
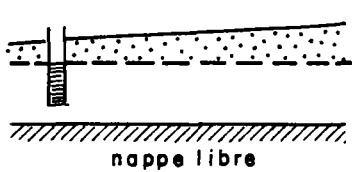
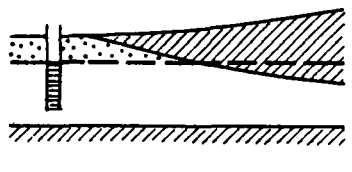
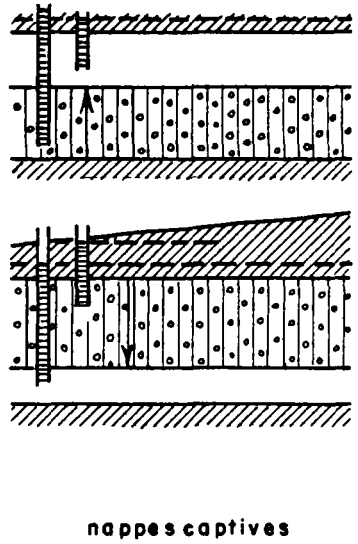
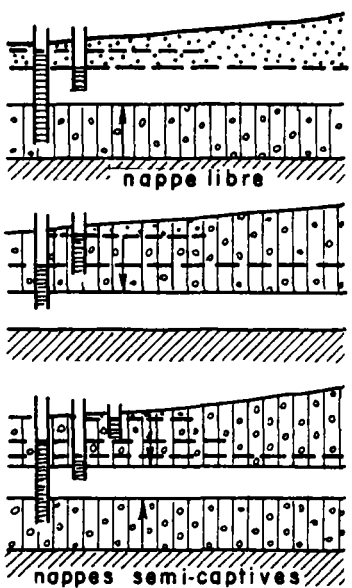
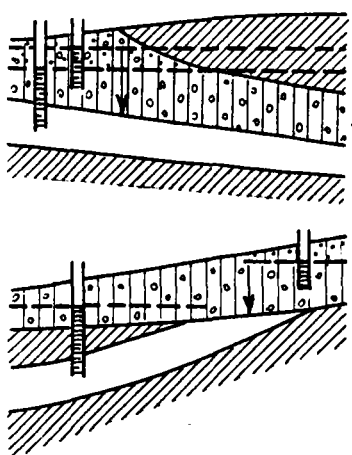
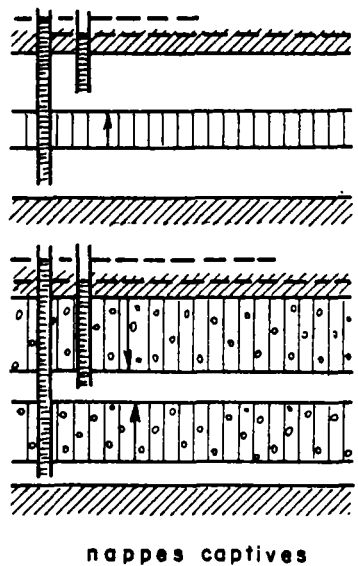
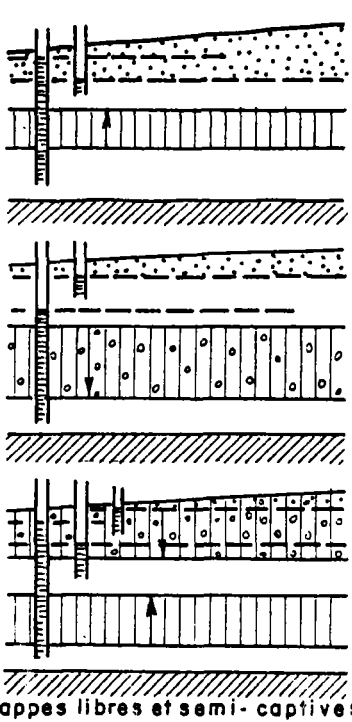
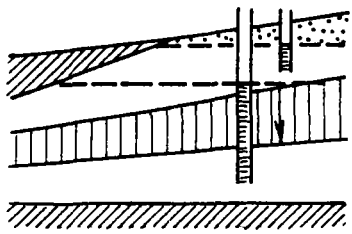
NB : l'évaluation des ressources imposant de considérer l'ensemble d'un système, son modèle est nécessairement fini et des conditions doivent être définies pour toutes ses limites.

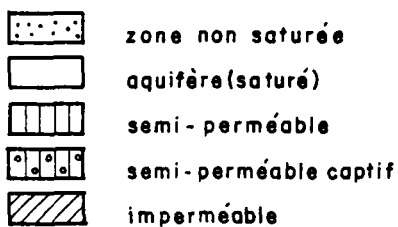
Les principaux types de systèmes aquifères réalisés couramment, classés suivant les structures et les conditions hydrodynamiques, sont décrits dans la fig. 3. Chaque classe définie peut être subdivisée selon les conditions aux limites.

1.6 - Systèmes aquifères et stratégies d'exploitation

En fonction de l'évaluation des ressources en eau souterraine, les différents types de système aquifère peuvent se grouper en un petit nombre de classes correspondant à autant de types de stratégie d'exploitation possible, selon quelques critères principaux : étendue du système, ordre de grandeur de son alimentation naturelle (ressources renouvelables potentielles), conditions hydrodynamiques (nappe libre ou captive), productivités unitaires des ouvrages, degré de liaison avec les eaux de surface (cf. tableau 5).

fig.3 - Types de systèmes aquifères.
(schémas bidimensionnels, sans limites latérales)

structures	conditions hydrodynamiques		
	sans surface libre (systèmes captifs)	avec surface libre (systèmes libres ou semi-captifs)	surface libre partiellement (systèmes mixtes)
monocouches	 nappe captive	 nappe libre	
bicouches	 nappes captives	 nappes semi-captives	
multicouches	 nappes captives	 nappes libres et semi-captives	



--- profil piézométrique

↓ ↑ flux de drainance

N.B. les différences de charge verticale sont des exemples

Tableau 5 -

SYSTEMES AQUIFERES ET STRATEGIE D'EXPLOITATION DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

Type de système aquifère	Alimentation (ressources renouvelables potentielles)	Productivités	Captage de ressources renouvelables exploitables	Utilisation de la capacité
Système aquifère à nappe libre étendue peu liée à des cours d'eau exogènes, drainé par des rivières et /ou des sources. Grande capacité. Fonction régulatrice ("inertie") souvent importante, mais variable suivant la densité du drainage.	régie par conditions climatiques : fraction variable de P efficace, inégale dans l'espace (selon conditions de surface) et discontinue dans le temps (saisonnière).	faibles	faible part exploitable des ressources renouvelables	capacité peu utilisable
		fortes	captage possible d'une part notable des ressources renouvelables, limitée surtout par les contraintes de conservation de débit d'étiage de sources et rivières, et/ou par la conservation de modes de captage préexistants (drains, puits à ne pas influencer).	-utilisation régulatrice possible de la réserve pour s'affranchir des irrégularités des apports saisonniers ou interannuelles (y compris par alimentation artificielle). -prélèvement possible -et nécessaire pour les captages - d'une tranche de la réserve, fournissant des ressources non renouvelable
Système aquifère à nappe libre subordonnée à un cours d'eau exogène, peu ou non colmaté (nappe alluviale,...) faible capacité. Fonction régulatrice accessoire	- idem - (mais rôle accessoire) plus parfois des infiltrations de cours d'eau (continues ou saisonnières)	faibles	ressources exploitables rarement supérieures, souvent inférieures aux ressources renouvelables.	capacité peu utilisable
		fortes	captage possible de débits en général très supérieurs aux ressources renouvelables, dû à la suralimentation induite par les eaux de surface. Limitation possible par la conservation du débit d'étiage du cours d'eau, ou la nécessité d'éviter une rupture de liaison hydraulique avec la rivière.	capacité peu utilisable
Système aquifère à nappe libre étendue, sans liaison avec des rivières (exogènes ou indigènes) affluant à la mer avec interface eau douce/ eau salée. Capacité variable.	fraction variable de P efficace, plus parfois des infiltrations de cours d'eau perchés ou d'irrigation.	faibles	faible part exploitable des ressources renouvelables.	capacité peu utilisable
		fortes	captage possible d'une part notable des ressources renouvelables, limitée surtout par les risques de déplacement d'interface (restrictions de rabattement).	capacité peu utilisable, sauf par action contrôlée sur l'interface
Système aquifère à nappe libre étendue, sans liaison avec des rivières (exogènes ou indigènes), affluant à une aire d'évaporation. (en zone aride ou semi-aride) Capacité variable.	P efficace négligeable, alimentation épisodique par des infiltrations de cours d'eau perchés (crues) ou d'irrigations.	faibles	faible part exploitable des ressources renouvelables.	Capacité peu utilisable
		fortes	captage possible d'une part variable et irrégulière des ressources renouvelables (avec réduction partielle des "pertes").	Capacité partiellement utilisable pour une régularisation saisonnière ou même interannuelle.
Système aquifère discontinu à conduits (karst), drainé par des rivières ou des sources permanentes ou temporaires. Capacité variable.	régie par conditions climatiques : forte fraction de P efficace + pertes de cours d'eau importés ; discontinue et irrégulière.	très inégales (malgré une forte transmissivité globale)	captage possible d'une grande part des ressources renouvelables, surtout par action sur des sources, mais limitée par les contraintes qui restreignent la possibilité de détourner celles-ci (ou l'obligation de restitution).	Capacité partiellement utilisable pour une régularisation saisonnière (plus difficilement interannuelle)
Système aquifère multicouche à nappe libre et nappe(s) semi-captive(s)	régie par conditions climatiques : fraction variable de P efficace, discontinue (saisonnière)	cas où les productivités de l'aquifère captif sont notablement supérieures à celles de l'aquifère libre.	captage indirect possible d'une partie des ressources renouvelables par exploitation de la nappe captive provoquant sa réalimentation par drainage à partir de la nappe libre.	dépression nécessaire d'une part de la réserve de la nappe captive et des couches semi-perméables, pour déterminer la drainage.
Système aquifère multicouche à nappe(s) semi-captive(s), avec des couches semi-perméables capacitatives. Grande capacité. Fonction régulatrice négligeable en régime naturel quasi-permanent.	rôle négligeable	minimales nécessaires suivant le profondeur	ressources renouvelables négligeables.	exploitation de ressources non renouvelables, réglée en fonction du coût maximal admissible à un terme fixé.
Système aquifère captif à limites étanches.	rôle négligeable	- idem -	- idem -	- idem -
Faible capacité (sauf en cas de continuité avec un aquifère à nappe libre). Fonction régulatrice négligeable en régime naturel quasi-permanent.			(l'exploitation d'un aquifère captif prolongeant un aquifère libre peut être un moyen de capter une part des ressources renouvelables de celui-ci lorsque l'influence l'atteint).	

Le critère principal est l'inertie d'un système, ou sa "réactivité", qui détermine la possibilité de l'influencer par des actions (prélèvements d'eau). Mais un optimum est nécessaire : un système aquifère exploitable ne doit être :

- ni trop peu influençable : un système très diffusif - c'est-à-dire très transmissif mais peu capacitif - entraîne des réactions immédiates aux limites ; c'est donc un mauvais régulateur ;
- ni trop influençable : un système très peu diffusif - c'est-à-dire capacitif mais peu transmissif - a des productivités trop faibles et des réactions trop différées aux limites.

Cet optimum dépend toutefois du programme d'exploitation.

Dans tous les cas, la connaissance d'un système aquifère, donc l'effort à entreprendre pour l'analyser, sont relatifs à l'objectif d'étude, qui doit fixer le degré de précision nécessaire et suffisant.

2 - EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

On s'est longtemps contenté d'assimiler ces ressources au débit naturel global des nappes d'eau souterraine, équivalant à assez long terme à leur alimentation naturelle, ce qui associait les ressources au bilan et à l'idée d'un équilibre à sauvegarder sous peine de "surexploitation".

Mais cette conception purement physique, "hydrologique", des ressources en eau souterraine conduit, d'une part, à définir uniquement des ressources naturelles, ou "potentielles", notion dont l'utilité pratique est restreinte. D'autre part, elle est conservatoire et conduit à ne considérer que les ressources renouvelables, donc à exclure la prise en compte des ressources non renouvelables qui sont pourtant utilisables dans certaines conditions. Enfin, cette conception des ressources a le défaut d'être trop globale pour un bassin ou un réservoir aquifère donné, c'est-à-dire d'être indépendante des modalités et de la localisation des exploitations d'eau projetées ou projetables.

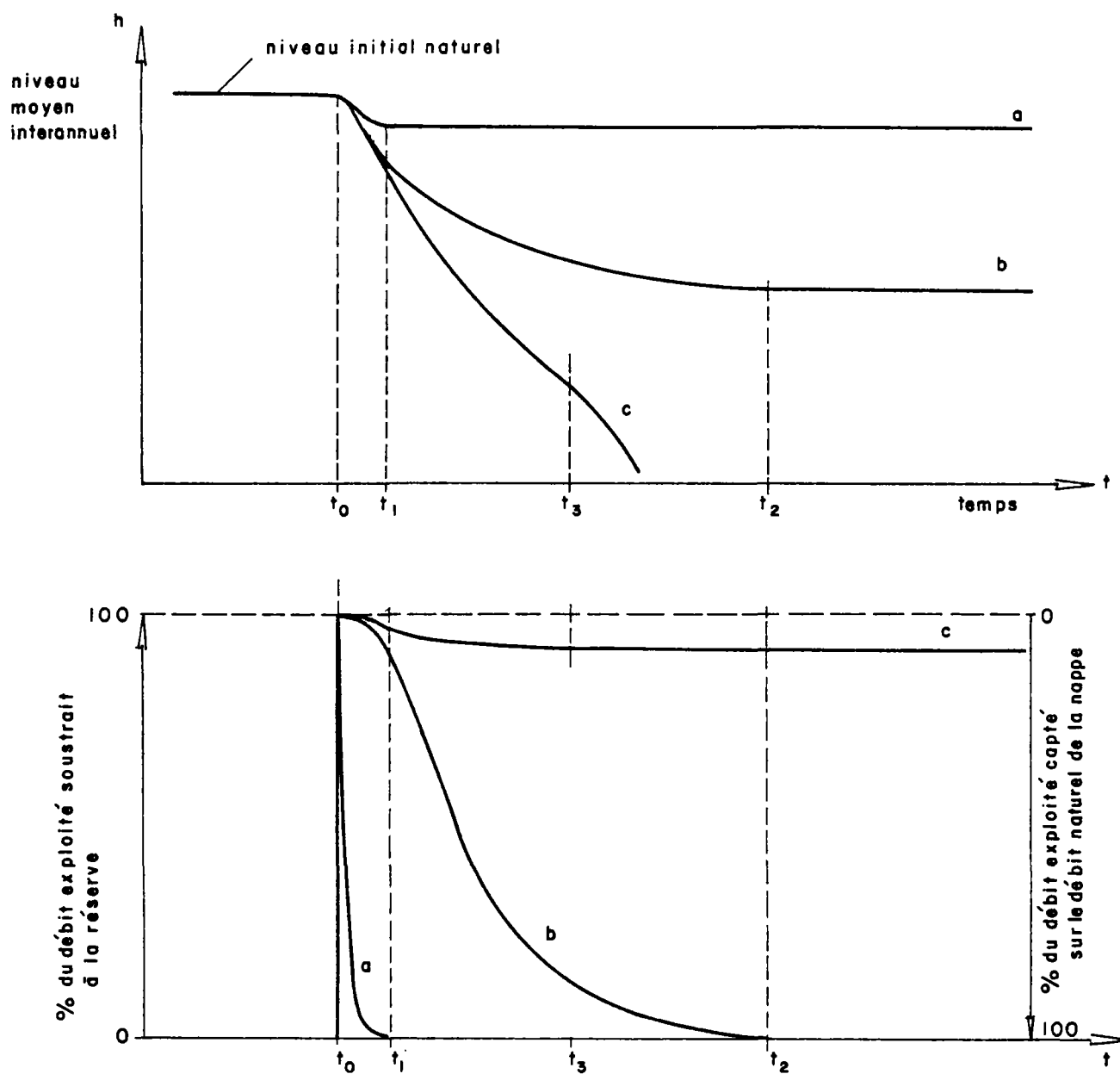
C'est pourquoi l'établissement du bilan d'eau d'un système - en régime naturel, puis en régime modifié prévisible éventuel - ne peut suffire pour évaluer des ressources exploitables.

Les ressources en eau souterraine effectivement exploitables sont, en fait, généralement inférieures aux ressources naturelles renouvelables, par l'effet de diverses contraintes physiques, économiques ou "écologiques", qui limitent les possibilités pratiques d'exploitation de la totalité des ressources potentielles. Mais dans certains cas, au contraire, les ressources exploitables peuvent dépasser largement les ressources naturelles (cas de beaucoup d'aquifères alluviaux très liés aux rivières). Par ailleurs, mobiliser une partie des ressources naturelles d'un aquifère, ce qui revient à détourner une part équivalente du débit de ses exutoires naturels, nécessite souvent des abaissements notables de niveau de la nappe sur de grandes étendues, donc le prélèvement d'une partie de la réserve : pendant la durée souvent assez longue qui précède le rééquilibre, cette exploitation de la réserve (qu'il ne faut pas assimiler à une "surexploitation") fournit temporairement des ressources non renouvelables complémentaires (fig. 4).

Enfin, les quantités d'eau prélevables pendant une longue durée dans les grands aquifères captifs peuvent être très supérieures à leurs ressources renouvelables naturelles (souvent négligeables).

Il importe donc de distinguer clairement plusieurs sortes de ressources en eau souterraine :

- les ressources naturelles ou potentielles (renouvelables) seraient théoriquement procurées par le captage intégral du débit moyen global naturel des nappes souterraines du système, en régime équilibré, c'est-à-dire sans diminution de réserve, à long terme ;



- t_0 = début d'exploitation (à Q constant)
- a = exploitation avec rééquilibre rapide en t_1 et faible prélèvement sur la réserve
- b = exploitation avec rééquilibre tardif en t_2 et prélèvement notable sur la réserve
- c = exploitation sans rééquilibre prélevée principalement sur la réserve
(après une phase de tarissement des exutoires naturels éventuels $t_0 - t_3$)

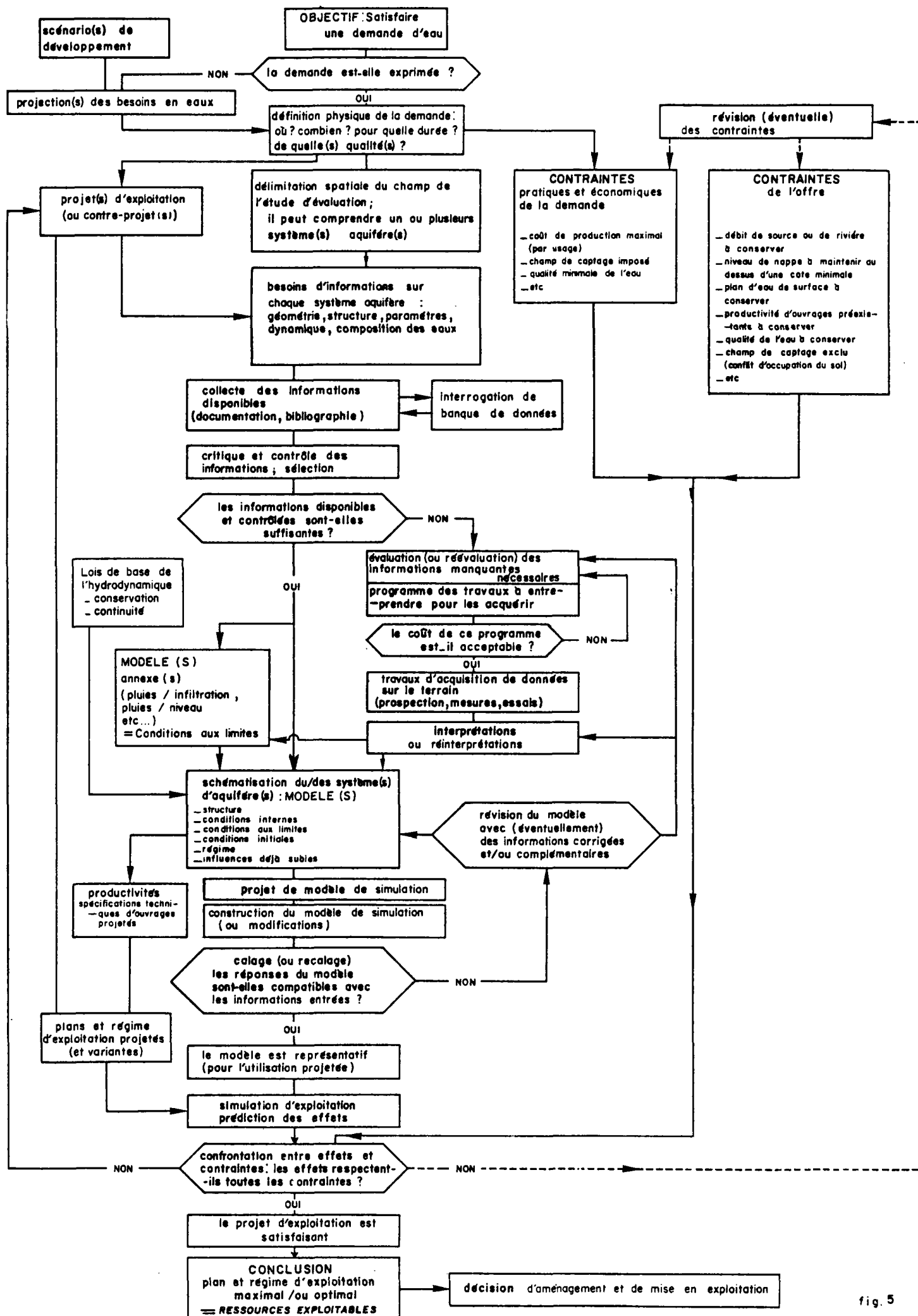
fig. 4 - Effets possibles d'exploitation sur les niveaux, le débit et la réserve d'un aquifère.

- les ressources exploitables équivalent aux quantités d'eau utilisable qu'il est techniquement possible et économiquement avantageux de prélever dans le système aquifère pendant une durée définie, en respectant différentes contraintes convenues. Ces ressources peuvent être inférieures ou supérieures aux ressources naturelles renouvelables, et aussi comporter temporairement une part de ressources non renouvelables. Les ressources exploitables renouvelables sont immédiates ou différées en fonction du terme du rééquilibrage pouvant succéder à l'exploitation nécessaire d'une partie de la réserve, comme on l'a indiqué plus haut ;
- les ressources suralimentées sont les ressources exploitables en supplément des ressources renouvelables naturelles, procurées par une suralimentation du système induite par l'influence des captages, ce qui accélère le renouvellement de la réserve ; ce sont en fait des ressources exploitables de système nappe + rivière ;
- les ressources d'exploitation de la réserve sont des ressources non renouvelables procurées par prélèvement dans la réserve du système, donc limitées à terme (à choisir).

Ce sont donc bien les ressources en eau souterraine exploitables qu'il s'agit d'évaluer. Mais cette évaluation n'est pas indépendante de la demande d'eau à satisfaire (localisation/variabilité des besoins, flexibilité, valeur d'usage, sans parler des exigences de qualité) : c'est un problème sans solution unique. Elle revient à confronter un "modèle d'offre" à une gamme de "modèles de demande" et à opérer un choix plus ou moins optimal - ou à fournir les éléments de ce choix au "décideur" -, ce qui s'apparente à la "recherche opérationnelle" (cf. infra 2.1).

En pratique, l'évaluation des ressources en eau souterraine, qui n'a de sens que dans le cadre spatial d'un système aquifère bien défini, doit suivre schématiquement la procédure suivante, exprimable par un organigramme, (cf. fig. 5).

- (1) définition d'un objectif : demandes d'eau à satisfaire (quantité, qualité) exprimées ou possibles (à projeter) ;
- (2) définition du système aquifère (géométrie, structure et caractéristiques internes, conditions aux limites, conditions initiales, dynamique), schématisable par un modèle ;
- (3) définition des contraintes (absolues, ou plus ou moins flexibles) à respecter : contraintes physiques (débits ou niveaux à conserver, qualité à maintenir), contraintes pratiques ou économiques (exclusions de sites de prélèvement, coût de production maximal fixé) ; ces contraintes se rapportent à l'offre ou à la demande ;
- (4) élaboration de programmes d'exploitation (plan de dispositifs, régime projeté) correspondant à différents scénarios de besoins en eau (exprimés ou imaginés, et tenant compte d'éventuelles restitutions au système) ;



- (5) prévision et évaluation des effets des programmes projetés sur le système (et élimination des programmes physiquement impossibles) ;
- (6) confrontation des effets (5) et des contraintes (3) ;
- (7) évaluation des ressources exploitables, c'est-à-dire choix du (ou des) programme(s) qui maximise(nt) ou optimise(nt) les prélèvements nets d'eau souterraine en respectant les contraintes (ce qui nécessite en général un certain nombre de "boucles" entre les stades 6 et 4).

Cette procédure très générale appelle quelques précisions ou commentaires.

2.1 - Relativité de l'offre à la demande

Les ressources en eau - même les ressources "mobilisables" - sont encore souvent conçues comme une offre indépendante de la demande, comme une "donnée" à fournir aux projeteurs d'aménagement soucieux de savoir si l'eau constituera ou non un facteur limitant.

Mais une définition purement technique des ressources en eau exploitables est insuffisante puisqu'elle ignore la solvabilité de la demande, alors que l'acceptabilité du coût de production d'eau est très dépendante de sa valeur d'usage.

Annoncer une possibilité de production globale d'un certain débit moyen à un coût donné ne présente qu'un intérêt pratique restreint alors que la demande est nécessairement composée de besoins de fournitures d'eau à des coûts maximaux très différents (eau potable urbaine ou rurale, irrigation, industries, etc...). Il serait donc plus réaliste de concevoir des ressources en eau d'alimentation, en eau d'irrigation, en eau industrielle, etc..., ce qui pourrait conduire à évaluer des ressources en eau (exploitables) maximales pour satisfaire une demande composée correspondant à ces différents besoins en proportions définies.

Cette composition de la demande pouvant évoluer en fonction de divers scénarios de développement, les ressources en eau exploitables peuvent donc varier dans le temps : elles sont en général croissantes à mesure que la proportion de demandes d'eau les plus solvables augmente. Elles peuvent en outre évoluer en fonction de la localisation des utilisateurs.

2.2 - Relativité du modèle de système aquifère à la stratégie d'exploitation

La représentativité - donc le degré de schématisation - du modèle à construire dépend autant du problème à traiter, c'est-à-dire de la complexité des simulations à opérer, que de la complexité des conditions naturelles du système aquifère.

*Définir le système nécessaire et suffisant
vis-à-vis d'un problème donné*

La délimitation même du système à considérer n'est pas indépendante du problème envisagé, notamment de la durée à prendre en compte.

Par exemple, un modèle monocouche peut suffire pour représenter un système hétérogène correctement calé en régime naturel peu variable, alors que la simulation d'une évolution influencée à long terme par l'exploitation du même système pourra nécessiter un modèle multicouche.

De même, des modèles en régime permanent (donc sans capacité) suffisent pour simuler les effets de changements d'état d'équilibre, lorsqu'on peut négliger l'évolution transitoire d'un état à l'autre (notamment si elle est très rapide). Au contraire la prise en compte de la capacité d'un système est indispensable pour prévoir des évolutions à long terme (notamment sans perspective de rééquilibre), l'emmagasinement n'étant d'ailleurs pas indépendant des durées envisagées (il s'accroît souvent avec le temps).

2.3 - Adéquation des données aux besoins d'information et des coûts de leur acquisition à leur valeur

Deux jugements préalables à l'élaboration d'un modèle sont indiqués dans l'organigramme et nécessitent une appréciation :

- les informations disponibles sont-elles suffisantes ?
- le coût des travaux d'acquisition de données complémentaires (si celles dont on dispose sont jugées insuffisantes) est-il acceptable ?

Ces jugements ne peuvent être portés dans l'absolu : ils sont subordonnés à la précision voulue pour les réponses à obtenir (donc à la représentativité du modèle) et aux incidences économiques des diverses marges d'approximation possibles : en dernière analyse ils ne sont pas indépendants de l'objectif.

Un "système annexe" d'économie de l'évaluation des ressources (analyse et confrontation coût/avantage) devrait donc être élaboré pour fournir des critères d'appréciation. Il permettrait une comparaison entre les "valeurs ajoutées" par des gains de précision et les coûts des travaux nécessités pour obtenir ces gains.

En pratique les méthodes d'analyse et d'optimisation n'ont guère encore été appliquées à cet objectif. Les appréciations sont faites surtout empiriquement en se basant plus sur des expériences antérieures et des habitudes que sur une analyse rationnelle.

2.4 - Relativité des contraintes

Pour la plupart les contraintes de la demande, comme celles de l'offre, ne sont pas indépendantes des objectifs de développement qui commandent la demande elle-même. C'est pourquoi les conséquences préjudiciables (limitations éventuelles du développement) d'un respect intégral des contraintes, et celles qui résulteraient de leur violation (à divers degrés) doivent elles aussi être confrontées. Les choix qui s'ensuivent peuvent entraîner une révision des contraintes - donc une réévaluation des ressources en eau exploitables - et ces choix peuvent eux-mêmes être reconsidérés au cours des temps.

Les contraintes sont essentiellement d'ordre :

- pratique ou juridique : nécessité de conserver des niveaux ou des débits, notamment aux limites du système, pour sauvegarder des droits acquis ou pour prévenir des préjudices
- économique : coût de production maximal accepté par la demande, selon chaque usage, y compris en tenant compte de coût éventuel de traitement de l'eau si la qualité offerte est inférieure à la qualité exigée
- foncier : des domaines peuvent être assignés aux ouvrages de prélèvement, d'autres peuvent être exclus (notamment par suite de priorité donnée à d'autres utilisations du sol et du sous-sol) : contrainte d'aménagement du territoire
- écologique : contraintes de sauvegarde de l'environnement.

2.5 - Confrontation entre les effets d'exploitation projetée et les contraintes

C'est la phase essentielle de l'évaluation des ressources exploitables, puisque celles-ci peuvent se définir comme le débit prélevable maximal qui respecte toutes les contraintes.

A chacun des types d'incidence d'un projet d'exploitation donné (effets physiques et conséquences économiques) peut correspondre une contrainte, c'est-à-dire une valeur limite d'incidence acceptable.

Ces incidences et ces contraintes ont trait respectivement :

- aux niveaux de nappe souterraine
- aux conditions aux limites (débits de source ou de cours d'eau, alimentation du système, qualité de liaison nappe/rivière)
- à la qualité de l'eau.

(cf. tableau 6)

Tableau 6 - CONFRONTATION ENTRE INCIDENCES D'EXPLOITATION ET CONTRAINTES

	Incidences	Contraintes
Niveau de nappe	abaissements maximaux (en régime rééquilibré, ou à différentes dates fixées en régime transitoire) : variable régionalisée. Conséquences : - décroissance des productions unitaires par ouvrage - croissance des coûts de production - réduction ou suppression de marais, de plan d'eau de surface lié à l'émergence d'une nappe - affaissement du sol possible - effets aux limites (cf. infra)	maximum d'abaissement acceptables (selon les zones), imposés pour : - conserver des productions unitaires par ouvrage, et ne pas dépasser des coûts maximaux de production (ou un taux de croissance admis de ces coûts) - conserver des plans d'eau de surface (contrainte notamment écologique) - prévenir des affaissements du sol (zone urbanisée, site d'ouvrage à préserver) - prévenir des préjudices possibles à la végétation ou à l'agriculture (notamment : forêt, arboriculture)
Conditions aux limites	- débit de source modification du régime de source : diminution du débit, notamment en étiage en cas extrême, suppression de source - débit de cours d'eau modification du régime fluvial : diminution du débit d'étiage et du débit d'écoulement moyen ; en cas extrême, suppression de cours d'eau permanent - alimentation de l'aquifère modifications du régime et du débit moyen des apports : - diminution possible des apports par infiltration si l'abaissement des niveaux accroît trop la hauteur de la zone non saturée, ou entraîne une rupture de liaison hydraulique avec une rivière à pénétration partielle (infiltrante). - accroissement des apports aux limites : - soit inversion de flux à une limite-rivière (ou augmentation du débit naturel apporté par les pertes d'un cours d'eau infiltrant) (réalimentation induite) - soit création ou augmentation d'un flux de drainance provenant d'aquifères sus ou sous-jacent (dans les deux cas : apport d'eau externe au système pouvant modifier la qualité cf. infra)	conserver un débit de source minimal (notamment en étiage) conserver un débit minimal d'étiage (assorti éventuellement défaillance fixé) ; conserver la continuité de l'écoulement dans l'espace conserver l'alimentation naturelle du système (= ressources renouvelables) maintenir au-dessous d'un taux maximal la proportion d'eau de surface ou d'eau d'un aquifère limitrophe, ajoutée aux apports naturels (notamment pour conserver la qualité de l'eau, cf. infra).
- liaison nappe/rivière	colmatage de berge et de lit (conséquence possible de la réalimentation induite), et substitution locale d'une condition de flux à une condition de potentiel, ce qui peut limiter les possibilités d'accroître les prélèvements sans diminution des productions unitaires (risque de rabattements supplémentaires à débit d'exploitation égal), et en cas extrême entraîner une rupture de liaison hydraulique	conserver les productions unitaires d'ouvrages rivaux (minimum fixé)
Qualités de l'eau souterraine	modifications (altération) de caractères physiques (température) ou chimique de l'eau, dues notamment à l'appel à des eaux de surface ou à des eaux d'aquifères limitrophes (déplacement de front d'eau salée,...)	conserver la qualité de l'eau, au-dessus de normes fixées (pour les usages actuels ou futurs)

En règle générale l'une des contraintes est prédominante, c'est-à-dire qu'elle restreint le plus la possibilité d'exploiter les "ressources potentielles" du système. Il importe donc de hiérarchiser les contraintes, car il pourrait suffire en principe de confronter les effets d'exploitations projetées à cette contrainte prédominante.

Toutefois pour la plupart ces contraintes ne sont pas globales et certaines ne sont pas constantes : elles peuvent intervenir différemment selon les dispositions des captages dans le système - et aussi selon le régime de variation des prélèvements -. Aussi la prise en compte de l'ensemble des contraintes demeure en pratique nécessaire.

2.6 - Interdépendances des systèmes

L'évaluation des ressources exploitables impose de considérer les relations d'interdépendance entre le système aquifère (système physique) d'une part, et divers autres systèmes physiques ou économiques (cf. fig. 6).

Un système aquifère est d'abord à connecter à deux systèmes physiques qui régissent en partie :

- ses conditions amont :
système de transfert d'eau en zone non saturée schématisable par un modèle global précipitations/infiltration efficace (flux)
- ses conditions aval :
système d'écoulement de surface (bassin versant) schématisable par un modèle précipitations/niveau de rivière (potentiel) (cf. fig. 1).

Plus généralement, on a déjà souligné l'interdépendance entre système aquifère et bassin versant superficiel, qui est plus ou moins développée et complexe selon les conditions naturelles. Elle peut être très forte dans le cas d'aquifères subordonnés à des cours d'eau ou quasi nulle dans le cas d'aquifères captifs profonds, avec tous les intermédiaires.

On sera amené parfois à considérer l'ensemble d'un système d'écoulement d'eaux de surface et souterraines schématisable par un "modèle de bassin" (assez grand pour inclure un ou plusieurs systèmes aquifères) et dans lequel les systèmes aquifères constituent surtout des réservoirs utilisables concurremment avec des accumulations de surface (barrages) mais dans des conditions différentes. Il s'agit alors d'un système à plusieurs réservoirs dont l'aménagement et la gestion posent des problèmes d'optimisation.

Il faut aussi considérer les relations avec le système d'utilisation des eaux souterraines : le système "prélèvement - usage - rejet", qui comporte lui aussi des flux d'entrée et de sortie et qui se caractérise par des localisations (sites de prélèvement et de rejet), par une consommation de quantité et de qualité, et par une superstructure économique.

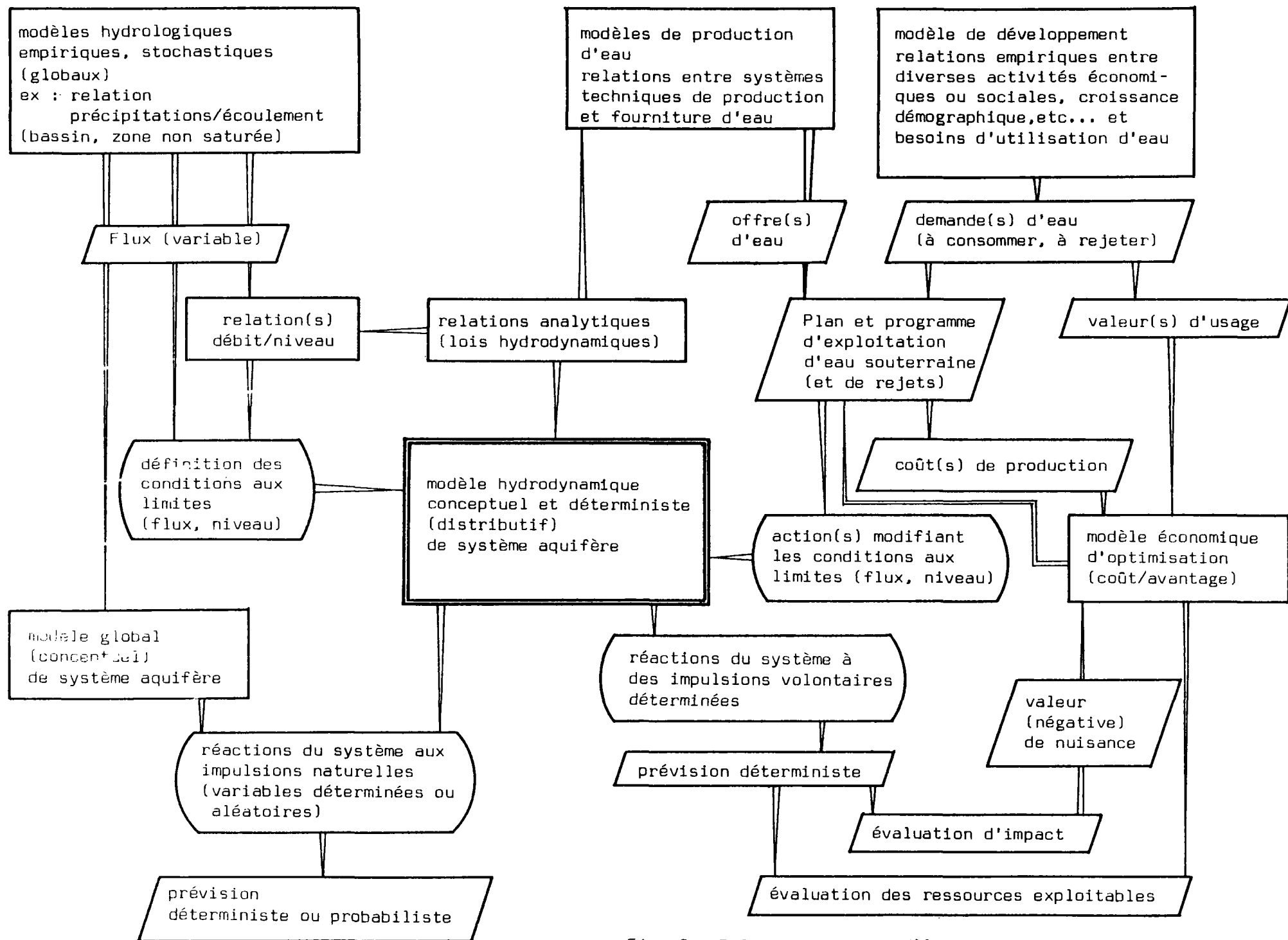


Fig. 6 - Relations entre modèles

La comparaison entre le coût de l'offre et la valeur d'usage de la demande permet de fixer une contrainte économique essentielle. Mais on comparera aussi la valeur des satisfactions de besoin en eau et la valeur négative des éventuelles nuisances conséquentes aux rejets d'eau usée.

Dans le cas particulier où les rejets sont faits dans l'aquifère exploité - ou dans un autre - l'évaluation des nuisances possibles nécessite de superposer au modèle hydraulique du système aquifère un modèle de déplacement de l'eau (prenant en compte la dispersion) et un modèle d'échanges chimiques, afin de simuler et de prévoir des changements de qualité dans l'espace et dans le temps. (Ceci s'applique aussi aux rejets dans le sous-sol d'eau usée provenant des prises d'eau de surface).

Des relations sont encore à envisager avec le système "utilisation des ressources du sous-sol", y compris ses ressources en espace (occupation du sous-sol et exploitation de ressources minérales). Il faut pouvoir comparer des utilisations qui se contrarient pour opérer des choix optimaux fixant des contraintes à l'exploitation des eaux souterraines.

CONCLUSION

Les points essentiels qui se dégagent de cette revue sommaire sont les suivants :

- Les "ressources naturelles" d'un aquifère (débit) ne sont qu'un des éléments de la dynamique du système. Elles ne constituent pas une offre et ne doivent pas être comparées aux demandes.

- Les ressources en eau souterraine exploitables sont relatives à la demande : elles ne peuvent être évaluées comme une offre purement physique et indépendante. Evaluer les ressources est un problème sans solution unique.

- Les ressources exploitables ont un contenu économique qui les rend très sensibles aux variables affectant le coût de production de l'eau et aux valeurs d'usage de l'eau. Elles peuvent évoluer dans le temps.

- Evaluer des ressources exploitables consiste essentiellement à confronter des effets d'exploitations techniquement possibles et des contraintes à respecter.

- Cette confrontation nécessite un assemblage de modèles de systèmes physiques et économiques qui permettent à la fois de prévoir les effets et de fixer les contraintes à comparer.

ANALYSE DES SYSTEMES ET RESSOURCES EN EAU

Indications bibliographiques

- CLARKE R.T. (1973) - Mathematical Models in Hydrology (Irrigation and Drainage Paper n° 19. F.A.O. Rome)
- CRAWFORD N.H., LINSLEY R.K. (1964) - A conceptual model of the hydrologic cycle (IASH pub. 63. pp. 573-587)
- DOOGE J.C.I. (1968) - The hydrologic cycle as a closed system (Bull. int. Assoc. scient. Hydrol., 13 (1) pp. 58-68)
- DOOGE J.C.I. (1973) - Linear theory of Hydrologic Systems (Technical Bull. n° 1468, Agricultural Research Service, U.S. Dép. of Agriculture, Washington DC)
- FIERING M. (1974) - Synthetic Hydrology (IIASA, WRP Internal Seminar, janv. 1974)
- FIERING M. (1975) - Proceedings of International Seminar on the Application of System Analysis in the Management of Water Resources, april 1975, Jablanna, Pologne - IIASA
- GUILLOT P. (1971) - L'utilisation des modèles mathématiques pour la prévision en hydrologie et météorologie (Sympos. mathematical models in hydrology - IASH/UNESCO, Varsovie)
- KACZMAREK Z. (1973) - Proceeding of IIASA Planning Conference on Water Resources (IIASA, PC-73-1, Laxenburg)
- KACZMAREK Z. (1975) - System analysis in Water Resources (The IIASA Water Resources Project. A status Report. IIASA, june 1975, RR-76-15, Laxenburg)
- KARPLUS W.J. (1972) - System identification and simulation. A pattern recognition approach. (Proceed. Fall joint Comp. conf. 1972)
- ROZANOV Y.A. (1970) - System Simulation for Management of a Total Water Resources. (Texas Water Development Board and Water Resources Engineers, Inc. Report 118 - Austin, Texas)
- ROZANOV Y.A. (1975) - Optimization Technique in System Analysis of Water Resources. (The IIASA Water Resources Project - A status Report - IIASA - June 1975. RR-76-15- Laxenburg)
- VANSTEENKISTE G.C. (ed) et al (1974) - Proceeding of the IFIP Working Conference on Computer Simulation of Water Resources Systems. Ghent 1971. (North-Holland pub. Co. Amsterdam)
- VANSTEENKISTE G.C. (ed) et al (1976) - System Simulation in Water Resources. Proceeding of the IFIP Working Conference on Biosystems Simulation in Water Resources and Waste Problems. Bruges 1975 (North-Holland pub. Co. Amsterdam)
- VEN THE CHOW (1977) - Systems analysis for hydrologic input to water resources management (CONFAGUA, Reuniones tecnicas y cientificas, Mar del Plata Argentina, mars 1977)
- WOOD E.F. (1975) - Project Work in Hydrologic and Water Quality Models (The IIASA Water Resources Project - A status Report. IIASA june 1975, RR-76-15, (Laxenburg)

YEVJEVICH V. (1971) - Systems approach to hydrology. (Proceed. of the first
bilateral US-Japan Seminar in hydrology - Honolulu Jan. 11-17-1971)

LISTE DES FIGURES

- 1 - Interconnexions entre un système aquifère et les systèmes hydrauliques qui lui sont reliés.
- 2 - Limites naturelles de systèmes aquifères
- 3 - Classification des types élémentaires de systèmes aquifères.
- 4 - Effets possibles d'exploitation sur les niveaux, le débit et la réserve d'un aquifère.
- 5 - Organigramme général d'évaluation des ressources en eau souterraine exploitables.
- 6 - Relations entre modèles.