

CONCLUSIONS

Les cartes structurales et piézométriques de l'aquifère sont un moyen efficace d'étude de sa configuration, de sa structure, de ses conditions aux limites, des fonctions de son réservoir et de son comportement hydrodynamique. La carte piézométrique, figurant les conditions aux limites géologiques et hydrodynamiques, est le document essentiel de synthèse d'une étude hydrogéologique. Elle est indispensable au calage des modèles mathématiques de simulation hydrodynamique en régime permanent.

Chapitre 8

Réserves et ressources

La réserve en eau souterraine, quantité d'eau gravitaire stockée dans l'aquifère, repose sur l'étude de la fonction capacitive du réservoir.

La ressource, quantité d'eau pouvant être exploitée dans un domaine circonscrit, en respectant un certain nombre de contraintes, résulte des fonctions du réservoir et des comportements hydrodynamique et hydrochimique de l'aquifère.

L'évaluation de la réserve et de la ressource, offre de l'hydrogéologue pour satisfaire une demande d'utilisation, repose sur cinq concepts de base.

L'évaluation des catégories de réserves est obtenue par le calcul du volume de la tranche de réservoir considérée à l'aide de cartes en courbes isopaches et par la porosité efficace ou le coefficient d'emménagement.

La réserve est renouvelée par les apports à l'aquifère. Ce renouvellement est numérisé par le taux et la durée de renouvellement.

A chaque système hydrologique correspond une catégorie de ressource.

L'évaluation de la ressource en eau soterraine exploitable, respectant un certain nombre de contraintes, repose essentiellement sur la prévision de l'évolution des rabattements en fonction des débits et sur le coût de production de l'eau.

L'hydrogéologue présente à l'utilisateu une offre sous forme de plusieurs scénarios.

La planification de l'exploitation de l'eau souterraine repose sur l'évaluation de la réserve et de la ressource. Cette opération est la synthèse finale de toutes les données acquises par la prospection et les expérimentations sur le terrain. Elle repose sur la mise en œuvre de méthodes dont les critères doivent être définis avec rigueur et normalisés afin de présenter des résultats homogènes.

CONCEPTS DE BASE

L'évaluation de la réserve et de la ressource repose sur cinq concepts de base (G. Castany, 1979) :

Concept de réserve et de ressource

La distinction entre réserve et ressource ne doit prêter à aucune équivoque.

La *réserve* est la quantité ou le volume, d'eau gravitaire contenue, à une date donnée ou stockée au cours d'une période moyenne annuelle, dans un système hydrologique. Elle est associée au concept de ressource en eau non renouvelable. Elle résulte de la fonction capacitive du réservoir des aquifères. Évaluée en *unités de volumes*, elle est exprimée en hectomètre cube (millions de m^3) ou en kilomètre cube (milliards de m^3).

La *ressource* est la quantité ou le volume, d'eau pouvant être extrait d'un domaine circonscrit pendant une période donnée, compte tenu de critères ou de *contraintes techniques, socio-économiques et politiques*. L'expression ressource est toujours accompagnée d'un qualificatif précisant sa catégorie. L'évaluation de la ressource repose sur les comportements hydrodynamique et hydrochimique de l'aquifère. Elle est exprimée en terme de *débit moyen* : m^3/s , hm^3/an , km^3/an ou en $l/s.km^2$, parfois par habitant.

Concept de confrontation offre et demande. Recherche d'un compromis

La ressource en eau doit satisfaire aux exigences d'une *demande d'utilisation*, exprimée en quantité et en qualité. Par exemple alimentation en eau d'une agglomération de 2 millions d'habitants, soit 60 000 $m^3/jour$ d'eau potable, au moindre coût (fig. 111).

Face aux conditions précises présentées, l'hydrogéologue présente une offre qui se traduit par deux ou trois scénarios. Par exemple recours à des eaux de surface ou à des eaux souterraines, voire à la combinaison des deux types de prélèvements (fig. 111). Un exemple est également présenté pour le bassin hydrogéologique du Sahara septentrional.

Ainsi l'évaluation de la ressource repose sur la *recherche d'un compromis* entre :

– les possibilités d'une production d'eau, déterminées par les contraintes physiques et techniques de la ressource disponible dans le domaine considéré. Par exemple choix entre le captage dans un aquifère alluvial en relation avec une rivière (système global aquifère/rivière) ou la dérivation du cours d'eau ;

– les exigences, en quantité et en qualité, d'une demande à satisfaire, au moindre coût, imposées par l'utilisation : eau potable, eau agricole ou eau industrielle. La structure de la demande est donc primordiale.

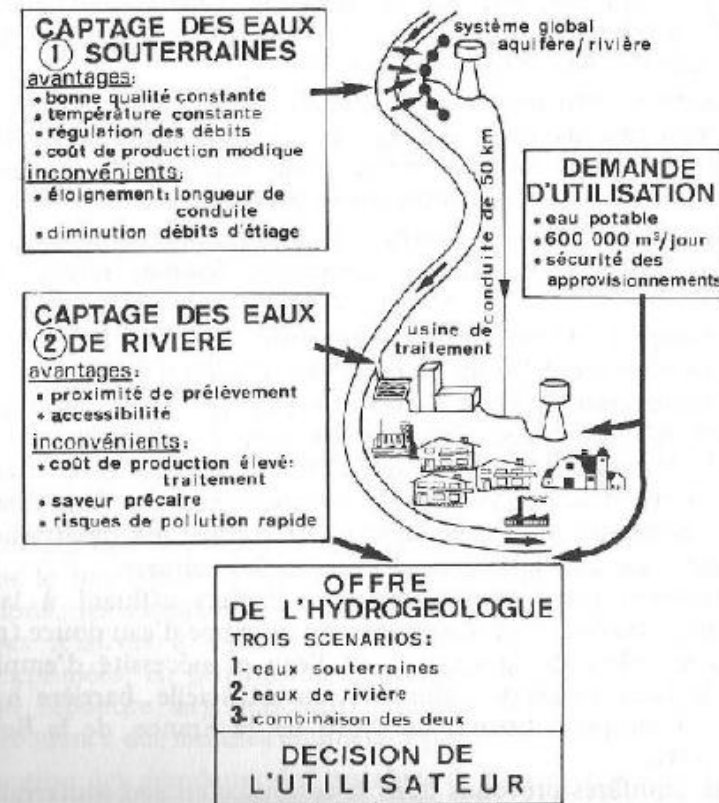


Figure 111 - La ressource en eau est l'offre de l'hydrogéologue, confrontée avec une demande d'utilisation, présentée sous forme de trois scénarios.

Concept de contraintes de planification

L'évaluation de la ressource est effectuée en respectant quatre ensembles de contraintes de planification, évolutives dans l'espace et dans le temps.

– *contraintes physiques et techniques*. Localisation, en profondeur, de l'aquifère et de sa surface piézométrique (structure hydrogéologique). Fonctions du réservoir et comportements de l'aquifère (paramètres hydrodynamiques et hydrochimiques, conditions aux limites). Caractéristiques du complexe aquifère/ouvrage de captage (évolution de la fonction débits/rabattements).

– *contraintes socio-économiques*. Débit d'exploitation maximum pouvant être extrait du système à des coûts admissibles de production, à une date ou au cours d'une période, données : coût de production de l'eau consenti par la demande, rabattement maximum admissible, productivité des ouvrages, coût des répercussions foncières, droits d'usage de l'eau, qualité de la vie, etc.

– *contraintes d'environnement*. Répercussions inacceptables sur le milieu : réduction du débit d'étiage des cours d'eau, détérioration de la qualité de l'eau et des sols, rabattement inadmissible de la surface piézométrique et ses conséquences sur l'agriculture, etc.

– *contraintes politiques*. Politique volontariste de l'eau et du développement. Efforts financiers à consentir. Risques raisonnables à accepter.

Trois exemples illustreront ces contraintes.

L'exploitation intensive du système global aquifère/rivière provoque une dérivation souterraine de l'eau de surface (p. 60). D'où une diminution des débits d'étiage. Celle-ci peut avoir des répercussions sur la navigation, les prises d'eau à l'aval, l'évacuation des eaux usées des agglomérations et sur l'écologie. Le prélèvement dans l'aquifère peut également entraîner un abaissement de la surface piézométrique avec dépérissement des plantations arboricoles et des cultures.

L'exploitation intensive des aquifères côtiers, affluant à la mer, provoquent l'invasion des eaux salées dans la nappe d'eau douce (p. 62). D'où détérioration de la qualité de l'eau et nécessité d'emploi de moyens de lutte onéreux : alimentation artificielle, barrière hydraulique, etc. Exemple : littoral du Nord de la France, de la Belgique et des Pays-Bas.

Dans les aquifères profonds dont la ressource en eau souterraine est non renouvelable, l'exploitation de l'eau, souvent la seule possibilité en zone aride, est suivie inévitablement d'un abaissement des niveaux piézométriques, croissant avec le temps et les débits soutirés (exploitation minière de l'aquifère). Les conséquences sont une augmentation des coûts de production de l'eau par pompage et des répercussions sur l'environnement : tarissement des sources artésiennes, assèchement des puits, intrusion d'eau de mauvaise qualité des nappes profondes, etc. Exemple : aquifère à nappe captive du continental intercalaire du Sahara septentrional.

Concept d'unicité d'espace et de temps

L'évaluation de la réserve et de la ressource doit respecter l'unicité d'espace et l'unicité de temps. Elle se réfère obligatoirement à un domaine d'espace délimité et à une date ou à une moyenne définies. C'est-à-dire à un *système de ressource en eau*.

Domaine d'espace ou système de ressource en eau

Trois types de domaine d'espace sont identifiés, en rapport avec les objectifs de la demande (tableau 32) :

– systèmes hydrologiques : bassin hydrologique, bassin hydrogéologique ou aquifère (p. 8) ;

– circonscription administrative ou région économique : Ile de France, France, etc. ;

– zone d'utilisation de l'eau : alimentation en eau d'une agglomération, zone industrielle, périmètre d'irrigation, etc.

Chacun de ces domaines est caractérisé par une catégorie de réserve et de ressource en eau (tableau 32). Les évaluations relatives aux deux derniers domaines sont obtenues par sommation des données relatives à chaque système hydrologique qui les constituent.

La partition en eau de surface et en eau souterraine, nécessaire à leur évaluation, est purement conventionnelle. Elle ne doit pas masquer l'*unicité quantitative et qualitative* du volume d'eau stocké ou en écoulement, dans le domaine considéré. Un exemple est donné par le système global aquifère/rivière.

Unité de temps. Données moyennes et historiques

Dans le but d'obtenir des résultats fiables et extrapolables pour les prévisions, les évaluations reposent sur le traitement statistique des données relatives à des séries chronologiques ou historiques. Elles sont exprimées, en général, en moyennes annuelles. Les informations doivent répondre aux impératifs concernant la période hydrologique et la fréquence des mesures énumérées page 59.

Adéquation des grandeurs des systèmes de ressource à celle des demandes

Les évaluations sont effectuées dans un domaine d'espace circonscrit, adapté à celui imposé par la demande. L'ordre de grandeur du domaine spatial est lié au développement économique, agricole ou industriel du pays intéressé (ordre de grandeur de 1 000 à 100 000 km²). La durée retenue pour les prévisions, est identique à celle des étapes fixées pour la planification : projections à 5, 10, 15 ou 30 ans. Celles-ci sont relativement précises pour les courtes durées. Elles deviennent plus aléatoires à partir de 30 ans.

Concept de variabilité dans l'espace et dans le temps

La réserve et la ressource sont inégalement réparties géographiquement en fonction de la distribution spatiale des précipitations efficaces et des structures hydrogéologiques (index hydrogéologique, p. 12). Elles sont également irrégulièrement distribuées dans le temps.

Les exigences de la demande sont également variables, en quantité et en qualité. Par exemple : progrès techniques aboutissant à une économie de l'eau, augmentation de la population, développement industriel, évolution des pratiques agricoles.

L'évaluation de la ressource, effectuée à une date donnée sur la base des techniques d'exploitation et des critères de l'utilisateur, évolue comme ceux-ci dans l'espace et dans le temps. Elle n'est donc pas immuable et doit être actualisée périodiquement.

Contraintes principales de l'offre présentée par l'hydrogéologue

Les nombreuses contraintes énumérées précédemment interfèrent entre elles. Il est donc possible, en pratique, pour établir l'offre présentée par l'hydrogéologue, de sélectionner deux contraintes prioritaires :

- évolution, à moyen et long termes dans l'espace et dans le temps, des rabattements en fonction des débits (fonction débits/rabattements) et éventuellement de la qualité de l'eau ;
- coût de production de l'eau.

Ces deux contraintes sont exprimées par la *productivité des ouvrages*, basée sur le calcul du débit d'exploitation maximum en fonction du débit critique, fixé par les essais de puits et du rabattement maximum admissible imposé par l'utilisateur (p. 145).

Les paramètres hydrodynamiques, mesurés par les pompages d'essai, servent à l'établissement des modèles mathématiques de simulation, indispensables à l'établissement des prévisions.

ÉVALUATION DE LA RÉSERVE EN EAU SOUTERRAINE

Catégories de réserves en eau souterraine

La catégorie de réserve en eau souterraine est définie par le volume d'eau gravitaire stocké, à une date donnée ou, de préférence au cours d'une durée moyenne, dans une tranche d'aquifère délimitée (tableau 27 et fig. 112). Quatre catégories sont définies : réserve totale, réserve régulatrice, réserve permanente et réserve en eau souterraine exploitable.

Réserve totale de l'aquifère

C'est la quantité d'eau gravitaire, WT , contenue dans le volume d'aquifère délimité dans tous les cas à la base par le substratum. La limite supérieure est le toit imperméable pour l'aquifère à nappe captive et la surface piézométrique maximale moyenne pour celui à nappe libre (1, fig. 112). La *réserve totale moyenne*, WM , parfois utilisée, est limitée au sommet par la surface piézométrique moyenne annuelle.

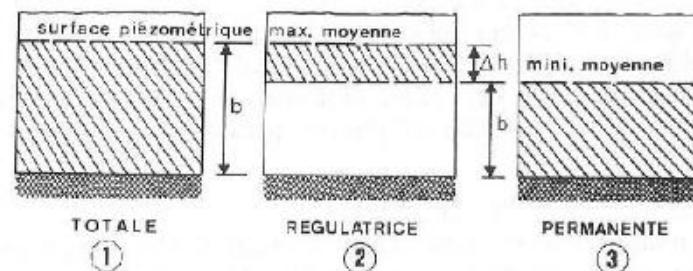


Figure 112 - Catégories de réserves de l'aquifère à nappe libre.

Tableau 27 - Catégories de réserves en eau souterraine et volumes de tranches d'aquifère à nappe libre considérés

Catégories de réserve	Cartes structurales de l'aquifère	
	en courbes isohypses ou hydroisohypses	en courbes isopaches
Réserve totale	substratum surface piézométrique maximale moyenne	épaisseur moyenne de l'aquifère
Réserve permanente	substratum surface piézométrique minimale moyenne	épaisseur moyenne
Réserve régulatrice	surface piézométrique maximale moyenne surface piézométrique minimale moyenne	épaisseur de la zone de fluctuation hauteur de fluctuation moyenne annuelle

Réserve régulatrice des aquifères à nappe libre

C'est le volume d'eau gravitaire, WR , contenu dans la zone de fluctuation de la surface piézométrique d'un aquifère à nappe libre (p. 191). Elle est calculée par référence à une période définie (hauteur de fluctuation annuelle ou moyenne annuelle), (2, fig. 112). Elle peut être comparée, mais ne doit pas être assimilée au débit de l'écoulement souterrain, QW , pour la même période de référence. Elle ne doit pas être confondue avec la différence de réserve, ΔW , solde du bilan (p. 18).

Réserve permanente des aquifères

C'est la part, WP , de la réserve totale non renouvelée. Pour l'aquifère à nappe libre elle est limitée, au sommet, par la surface piézométrique minimale moyenne (3, fig. 112). Pratiquement dans les aquifères à nappe captive, réserve totale et réserve permanente ont des valeurs identiques.

Réserve en eau souterraine exploitable

C'est la quantité ou le volume d'eau maximal, WEX , qu'il est possible, en pratique, d'extraire de la réserve totale d'un aquifère, temporairement ou définitivement, dans des conditions économiques acceptables. Elle est exprimée en m^3 ou en m^3/km^2 . Elle est définie par les contraintes énoncées précédemment, p. 198. Elle est liée au concept de *ressource d'exploitation de la réserve* (p. 214). La modulation annuelle et interannuelle du volume d'eau extrait de l'aquifère repose sur la connaissance de cette réserve (fig. 113).

Méthodes d'évaluation de la réserve en eau souterrainePrincipes d'évaluation

La réserve en eau souterraine, W , est évaluée par le traitement d'un couple de données :

- le volume, V , de la tranche d'aquifère considérée (réservoir saturé),
- la porosité efficace des aquifères à nappe libre, n_e ou le coefficient d'emmagasinement des aquifères à nappe captive, S .

$$W = V \cdot n_e \quad (84)$$

$$W = V \cdot S \quad (85)$$

Le calcul du volume de la tranche d'aquifère considérée est basé sur l'interprétation par planimétrie des cartes en courbes isopaches (tableau 29 et fig. 113). Parfois il est calculé avec l'épaisseur moyenne,

b_m , de la tranche aquifère :

$$W = b_m \cdot A \cdot n_e \quad (86)$$

Pour les aquifères à nappe libre il s'agit de la totalité de cette tranche. Par contre pour les aquifères à nappe captive, profonds, il faut considérer des tranches successives de quelques dizaines de mètres (50, 100 ou 200 m). Un exemple est donné par le tableau 2, page 5.

Lorsque le réservoir est hétérogène il est nécessaire de considérer des zones hydrogéologiques de structure relativement homogène (tableau 28).

Exemples d'évaluation de la réserve des aquifères à nappe libreAquifère à nappe libre des alluvions de la Moselle

La réserve totale, WT , des alluvions de la Moselle à l'aval de Metz, calculée par l'expression (86), est égale à :

$$WT = 4 \text{ m} \times 200 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \times 0,2 = 160 \text{ hm}^3 \quad (87)$$

La réserve régulatrice, WR , est calculée par l'expression (86) avec une hauteur moyenne de fluctuation moyenne de 2 m.

$$WR = 2 \text{ m} \times 200 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \times 0,2 = 80 \text{ hm}^3 \quad (88)$$

Aquifère à nappe libre de Ber Rechid

Cet aquifère, situé au sud de Casablanca (Maroc), présente un réservoir hétérogène constitué de calcaires marneux du Pliocène et de calcaires gréseux dunaires ou marins, quaternaires, surmontés de limons récents (R. Hazan et M. Ferré, 1964). La surface piézométrique de référence est la moyenne des années 1956-58. La réserve totale, WT , a été évaluée par le calcul du volume total du réservoir par planimétrie de la carte en courbes isopaches, $11\,207 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ et une porosité efficace moyenne de 5 % (expression 84) :

$$WT = 11\,207 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \times 0,05 = 5\,600 \text{ hm}^3 \quad (89)$$

L'évaluation de la réserve régulatrice, effectuée en tenant compte de l'hétérogénéité de la tranche de réservoir, obtenue par la hauteur de fluctuation moyenne annuelle, est donnée dans le tableau 28. Elle est de $67,6 \text{ hm}^3$.