



BRGM

BUREAU DE RECHERCHES
GÉOLOGIQUES ET MINIERES

74, rue de la Fédération
PARIS XV^e

Direction Scientifique
Département Géologie

SERVICE D'HYDROGEOLOGIE

AGE DES EAUX SOUTERRAINES
ET RENOUVELLEMENT DES RESERVES DES NAPPES
Réflexions sur les bases de l'hydrochronologie

par

J. MARGAT

DS.65.A88

Octobre 1965

R E S U M E

Les développements récents des applications des radio-isotopes naturels ont mis de nouveaux moyens d'investigation à la disposition des hydrogéologues, en créant la possibilité de datation absolue de l'eau souterraine.

Mais l'éclairage moderne donné à la notion d'âge de l'eau souterraine, qui avait été antérieurement définie sur des bases différentes, n'a pas toujours été exempt de quelques confusions attribuables surtout, semble-t-il, à une intégration encore insuffisante des points de vue respectifs des physiciens et des hydrogéologues à ce sujet.

Age de l'eau souterraine, durée d'écoulement, renouvellement des réserves sont des notions distinctes bien que toutes exprimables en durée. Leur examen, auquel il est procédé, montre qu'elles sont complémentaires.

Essai de clarification, ces réflexions sur les bases de l' "hydrochronologie" préludent à la recherche des meilleures conditions d'application -et aussi des limites de validité- des méthodes isotopiques de datation de l'eau souterraine en hydrogéologie. Ces méthodes constituent un instrument de recherche nouveau et original dont on peut attendre beaucoup. Mais elles ne se substituent pas aux méthodes classiques, hydrogéologiques et hydrodynamiques d'évaluation des débits et des réserves, indépendamment desquelles leur valeur est réduite. Au contraire, les unes et les autres se complètent utilement et se valorisent réciproquement.

Ce rapport, établi dans le cadre des études générales d'hydrogéologie réalisées par le Service d'Hydrogéologie du B.R.G.M., dérive pour l'essentiel de la communication présentée par l'auteur à la réunion de Hanovre de l'Association internationale des hydrogéologues (Septembre 1965).

INTRODUCTION.

L'introduction, puis le perfectionnement progressif des techniques de datation isotopiques en hydrologie, au cours des dernières années, a entraîné un regain d'intérêt pour l'âge de l'eau souterraine.

Pourtant, la notion d'âge appliquée à l'eau souterraine n'est pas neuve. Elle est venue naturellement à l'esprit de chercheurs formés aux disciplines géologiques -donc chronologiques- dès lors que des connaissances assez précises furent acquises sur l'origine des eaux souterraines et les vitesses propres à leur écoulement.

Il n'est d'âge que d'évènement et l'on sous-entend communément par âge d'une eau souterraine l'âge de l'infiltration dont elle provient. Cette définition n'est d'ailleurs pas sans défaut car elle exclut les eaux connées (dont l'âge serait théoriquement égal à l'âge géologique de la couche aquifère) et les eaux juvéniles; de plus l'infiltration est loin d'être un phénomène simple et instantané. Il serait sans doute plus rigoureux de parler de l'âge d'introduction dans le système aquifère. Quoi qu'il en soit, la connaissance du temps écoulé depuis l'instant d'infiltration d'une quantité d'eau météorique donnée, nécessairement petite (en toute rigueur une molécule, en pratique un échantillon) et celui auquel on la prélève, défini comme son âge, présente un intérêt indéniable dans les limites de validité des hypothèses admises relatives à l'aquifère considéré.

Mais la durée d'écoulement d'une nappe peut être considérée de plusieurs manières, selon celle des caractéristiques de cet écoulement, les unes ponctuelles les autres globales

-donc significatives à des échelles différentes- que l'on considère. Aussi le concept d'âge a pu être -et a été- défini en hydrogéologie à partir de bases différentes, non réductibles entre elles.

On a d'abord considéré, pour des nappes très étendues, la durée d'écoulement, déduite de vitesses elles-mêmes calculées d'après des débits, mais sur la base d'hypothèses qui n'étaient pas toujours admissibles.

La notion de renouvellement, reposant à la fois sur les données du bilan d'une nappe et sur la connaissance de sa réserve, s'exprime aussi en durée et a pu être comparée à un âge moyen.

Enfin, les progrès récents des méthodes isotopiques ont renouvelé nos moyens d'investigation, en fondant la notion d'âge sur une base plus solide, sinon certaine.

Un examen succinct de ces différentes bases de ce que l'on pourrait appeler l'hydrochronologie conduira d'abord à estimer nécessaire et à proposer une clarification terminologique; il appellera ensuite quelques réflexions sur les limites respectives et la complémentarité des méthodes entrant en jeu.

Loin de présenter un caractère purement spéculatif, ce sujet touche d'assez près les questions d'évaluation, d'exploitation et de protection des ressources en eau, pour retenir toute l'attention des praticiens.

1. Age d'une eau souterraine et vitesse d'écoulement.

Le concept d'âge d'une eau souterraine a été introduit en premier lieu en hydrogéologie, par déduction directe de la durée d'écoulement depuis la zone d'alimentation d'une nappe jusqu'à ses exutoires. Les premières études sur des nappes captives très étendues, en faisant ressortir le contraste entre la longueur des trajets parcourus et la vitesse nécessairement faible des écoulements, avaient conduit à faire admettre des durées d'écoulement très grandes, donc des âges de l'eau, aux exutoires, d'une ancienneté insoupçonnée jusqu'alors. Ces évaluations, relatives à une distance donnée, ont été déduites de vitesses moyennes, elles-mêmes calculées selon diverses méthodes supposant toutes que l'écoulement entre la zone d'alimentation de la nappe et les émergences se ferait en régime permanent.

1.1. Une première méthode a consisté à assimiler à une vitesse moyenne le "quotient du volume d'eau par le débit".

C'est ainsi que P. LEMOINE, HUMERY et R. SOYER (1939) étudiant la nappe captive des Sables verts du Bassin de Paris (1), considérée par eux comme stagnante avant le premier forage exécuté en 1840 (Puits de Grenelle), avaient calculé que la vitesse de parcours, sur une distance moyenne de 175 km entre les affleurements et Paris, avait augmenté à mesure de la mise en exploitation de nouveaux forages, de 35 cm/an (pour 11 l/s) en 1840 à 50 cm/an (pour 1450 l/s) en 1939, ce qui correspondrait à un âge réduit progressivement de 500 000 à 3 500 ans. Ce mode d'évaluation

(1) Pour mémoire, rappelons qu'antérieurement BELGRAND avait, en 1861, cru pouvoir estimer à 2 mois la durée de parcours de l'eau de cette nappe "entre les points d'affleurement de la craie inférieure et Paris", mais en se basant sur un apparent décalage de 2 mois entre les variations de dureté de l'eau du puits de Passy à Paris et celles du niveau de l'eau de rivières près de Troyes, méthode absolument dépourvue de valeur.

qui assimilait à tort le "débit de la nappe" au débit des forages, et qui supposait contradictoirement un régime permanent et un accroissement de l'alimentation parallèle à celui du débit capté, ne peut plus être retenu aujourd'hui.

Cette méthode aurait conduit en réalité à évaluer une durée de renouvellement (cf. infra 3), si le débit avait été correctement défini.

1.2. Une seconde méthode plus rigoureuse a consisté à déduire la vitesse moyenne du débit connu, compte tenu du gradient hydraulique observé.

G. CASTANY (1960) a notamment tenté ce calcul pour la même nappe, en l'appliquant à la zone d'exploitation par forages de la région parisienne, à 150 km des affleurements alimentaires: d'après le gradient moyen ($6 \cdot 10^{-4}$) et la vitesse moyenne (2,8 m/an) calculée selon la loi de Darcy d'après le débit sorti, on obtient une durée théorique de parcours -donc un âge de l'eau- aux points de captage, d'environ 50 000 ans.

Des calculs analogues ont été appliqués à d'autres grandes nappes captives, comme celle du Continental intercalaire (dit "Albien") du Sahara. Récemment, H. FAURE (1965), a de même estimé à 100 000 ans la durée probable d'écoulement des eaux des sources des oasis de la région de Bilma, du Niger, à partir de leur zone alimentaire.

Cette méthode constituerait un procédé plus acceptable pour évaluer l'âge de l'eau souterraine -en un point d'émergence ou de captage défini-, à l'approximation près des paramètres utilisés, si:

- 1) le mode et la zone d'alimentation de l'aquifère considéré étaient bien définissables;
- 2) l'hypothèse du régime permanent était satisfaita.

Mais ce n'est généralement pas le cas pour la plupart des nappes captives étendues exploitées par forages choisis jusqu'à présent comme exemple d'application.

On sait aujourd'hui que la mise en équilibre du régime d'écoulement dans de telles nappes peut ne se réaliser qu'au bout d'un temps extrêmement long (des siècles, voire des millénaires) et qu'elle ne s'opère pas nécessairement ni principalement par le seul appel aux affleurements considérés comme zone d'alimentation. Tant que le régime est transitoire, on n'a pas le droit de confondre le débit de la nappe avec le débit des forages qui l'exploitent: l'eau captée est prélevée principalement sur la réserve -y compris sur celle des couches moins perméables encaissantes- et il est illusoire de la rapporter au parcours supposé depuis la zone d'alimentation pour établir son âge: celui-ci peut être beaucoup plus ancien ou au contraire plus récent.

C'est également une erreur de croire, comme l'on fait certains auteurs, que l'eau captée doit être de plus en plus récente au cours de l'évolution des pompages ou des jaillissements des forages artésiens, à mesure que le rabattement s'accentue et que la dépression créée devient plus étendue. Au contraire, le prélèvement intéresse des couches d'eau de plus en plus profondes et anciennes, aussi l'âge moyen de l'eau captée dans ces nappes doit-il d'abord s'accroître avec le temps.

2. Datation par les méthodes isotopiques.

Pour surmonter les difficultés précédentes, on a été naturellement conduit à passer du calcul à l'expérimentation, c'est-à-dire à faire appel aux méthodes de traçage seules capables de permettre la mesure de la durée réelle d'écoulement. Mais pour les nappes captives très étendues considérées principalement, les énormes durées à mesurer interdisent toute expérimentation directe à l'échelle humaine. Seule l'application des techniques isotopiques, en mettant à profit la fonction de traceurs "chronométriques" naturels de certains isotopes instables présents naturellement ou non dans l'atmosphère, a fourni une clef ayant ouvert valablement la voie aux possibilités de datation de l'infiltration de l'eau.

Au cours des dernières années, diverses publications (cf. bibliographie) ont suffisamment traité de ces techniques -d'ailleurs en voie de perfectionnement- pour qu'il ne soit pas nécessaire d'en rappeler ici les bases ni les modalités d'application. On sait que l'interprétation des résultats obtenus, encore relativement peu nombreux il est vrai, soulève des difficultés dues notamment à l'influence de phénomènes perturbateurs possibles, et qui ne sont pas encore toutes résolues.

On se bornera à souligner ici, du point de vue de l'hydrogéologue, que l'application de ces méthodes, à l'instar des méthodes hydrodynamiques précédentes, appelle deux observations préalables :

- a) Elles sont ponctuelles, la datation s'appliquant à un échantillon d'eau donné dont la représentativité est nécessairement limitée et difficilement estimable. Les datations opérées ont d'ailleurs abouti à des résultats bien différents selon la profondeur des prélèvements d'eau dans une nappe sur une même verticale, l'âge croissant généralement avec la profondeur. Ces méthodes peuvent donc

difficilement permettre d'évaluer l' "âge moyen" d'une nappe: il y faudrait un très grand nombre d'échantillonages et surtout pouvoir les relier autant que possible aux caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère.

- b) D'autre part, on sait que pour convertir les résultats des mesures de paramètres physiques en âge de l'eau souterraine analysée, le physicien doit supposer satisfaites un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sur les caractéristiques de l'aquifère considéré. Par exemple, que le mélange des eaux serait parfait, ou au contraire qu'il serait nul, dans la couche. Autrement dit, un "modèle" idéal doit être substitué à l'aquifère réel, et la validité de l'âge obtenu sera fonction de celle du modèle.

En effet, si dans l'absolu aucun paramètre dimensionnel n'intervient dans l'évaluation de l'âge, en pratique l'introduction des corrections, notamment en cas d'échanges, doit tenir compte des caractéristiques de l'aquifère et de la distance d'écoulement.

La datation par les méthodes isotopiques peut ainsi se comparer à l'application des formules hydrodynamiques à l'interprétation des résultats d'essais de pompage: la même limitation provient de l'écart entre les conditions naturelles et celles du modèle, nécessairement simplifié, imposé pour rendre une interprétation possible.

Il serait donc quelque peu illusoire et dangereux de considérer les méthodes de datation comme un moyen "raccourci" d'atteindre la connaissance du bilan d'une nappe et surtout d'en tirer des conclusions pratiques immédiates quant aux disponibilités en eau souterraine sans recourir aux méthodes de recherche hydrogéologique plus "conventionnelles", ainsi

qu'avaient pu le penser quelques physiciens (1).

Par contre, les méthodes isotopiques permettent -et c'est là leur intérêt le plus original- d'étudier la stratification et d'établir la chronostratigraphie des eaux d'une même couche aquifère. Des considérations paléogéographiques, paléoclimatiques et géochimiques avaient certes déjà pu permettre de formuler des hypothèses "paleohydrogéologiques" (VOLKER, 1951; BECKSMANN, 1961; FAURE, 1965), mais en conservant, comme la stratigraphie classique, une chronologie surtout relative.

Il a pu être confirmé par les premières datations que les couches d'eau profondes de nombreuses nappes recèlent de l'eau d'un âge considérablement plus ancien que les couches supérieures.

Ces méthodes peuvent donc renouveler, en les fondant sur des bases plus rigoureuses, les anciens concepts de partie mobile (active et passive), opposée à la zone stagnante d'une nappe (d'ANDRIMONT 1905 (2), IMBEAUX 1930), cette dernière correspondant à l'eau stagnante de nappe ou eau fossile de nappe, distinguée de l'eau connée par H. SCHOELLER (1962), mais pouvant toutefois en être constituée en plus ou moins grande part.

L'opposition entre les eaux stagnantes et mouvantes ne doit pourtant pas être considérée comme absolue. Des eaux rigoureusement stagnantes correspondraient à un cas-limite théorique: celui d'une nappe captive dans une couche aquifère emprisonnée entre des couches à perméabilité infiniment petite (il s'agirait alors nécessairement d'eau fossile connée). Il n'en reste pas moins vrai que les vitesses d'écoulement peuvent être, dans certaines nappes

(1) Cette remarque a déjà été faite par certains auteurs, notamment aux Etats-Unis par CARLSTON (1964), encore que ce dernier ait paru sous-estimer l'importance pratique de la distinction entre l'exploitation de la réserve régulatrice et celle de la réserve non renouvelable.

(2) Cf. page 9

captives, si lentes que leurs effets ne seraient perceptibles qu'à l'échelle géologique (cf. infra, 4).

On rejoint ainsi la question du renouvellement des réserves.

(2) On sait que les anciens auteurs, jusqu'à la fin du 19e siècle, considéraient comme stagnante l'eau des parties des nappes du type "de trop-plein" ou "de débordement", situées au-dessous du niveau des exutoires les plus bas, qualifiées de parties passives, par opposition aux parties actives supérieures. D'ANDRIMONT fut, en 1905, le premier à montrer, en se basant sur ses observations relatives aux nappes des dunes du littoral belge et sur des expériences en modèle, que les eaux souterraines se trouvaient aussi en mouvement au-dessous du niveau des exutoires de trop-plein, selon des trajectoires en partie ascendantes, sans pourtant exclure l'existence d'une véritable zone stagnante plus profonde (même dans le cas d'une nappe libre):

"... c'est le poids de la partie active qui donne la charge nécessaire pour mettre en mouvement la partie passive qui subit l'action de la partie active.
Il existe alors, en-dessous de la partie passive, une troisième zone, où les eaux ne seront plus soumises à l'action drainante de la dépression et... elles pourront, pour ainsi dire, être stagnantes. Cette zone jouira des propriétés que l'on avait attribuées à tort à la nappe passive."
(d'ANDRIMONT, 1905, loc. cit. p.M 118)

Quelques résultats de datation d'eaux souterraines.

	<u>Age</u> <u>en années.</u>	<u>Méthode</u>
Nappes captives du fossé rhénan dans la région de Cologne: Nappe captive (-148 à -328) " " (-400m)	2.100 10.500	C^{14} C^{14}
Nappe des grès du Crétacé inf. de l'avant-pays du Hartz (Mine de Salzgitter), -790m (Brinkmann, Münnich et Vogel 1958, 1960)	8.000 à 10.000	C^{14}
Eaux de karst du Jura souabe en Allemagne Nappe de la vallée du Rhin Nappe de la vallée du Nectar (Münnich et Roether, 1963)	>4 >10 à >20 >4	tritium " "
Nappe phréatique des Sables de Cohansey (New-Jersey, USA): - 15m (7 éch.) - 30m (4 éch.) (Carlston, 1964)	2 à 4 12 à 25	tritium "
Nappe des grès de Nubie (Egypte) (Degens, Münnich et Vogel, 1961)	25.000 à 30.000	C^{14}
Nappes profondes en Arabie (Thatcher, Rubin et Brown, 1961)	20.000 à 33.000	C^{14}
Nappes profondes du désert de Nubie (Egypte) oasis de Kharga - - Dakhala - - Bahariya - - Siwa Source à Suez	18.000 à 30.000 22.000 à >40.000 20.000 à >40.000 25.000 à 40.000 30.000 à >40.000	C^{14} - - - -
Nappes profondes saumâtres dans le centre des Pays-Bas, Sud du Zuydersee -70 à -150m (Vogel et Hehhalt, 1963)	8.700 à 10.500	C^{14}
Nappes phréatiques du désert de Kalahari (Afrique du Sud) (Vogel, Ehhalt et Roether, 1963)	env. 30	tritium

3. Renouvellement de la réserve.

A la différence du concept d'âge d'un échantillon d'eau souterraine, la notion de renouvellement de la réserve est globale: elle s'applique par définition à l'ensemble d'une nappe, à l'ensemble des eaux souterraines d'une couche aquifère définie. Elle procède de la comparaison entre le débit moyen global d'une nappe (Q) rapporté à une durée définie, et le volume moyen, rapporté à cette même durée, de la réserve totale (V). Q est le volume de l'alimentation naturelle, égal au volume des émissions, et définissable par la modulation de la réserve régulatrice pour la période considérée: celle-ci doit donc être assez longue pour que le bilan soit sensiblement équilibré, au moins dix ans.

Le renouvellement, qui revient en somme à comparer la réserve régulatrice et la réserve totale moyenne, dépend donc de la durée choisie. Il est commode de le rapporter à l'année moyenne d'une série au moins décennale.

On peut considérer et dénommer:

Taux de renouvellement (1) le rapport $\frac{Q}{V}$, c'est-à-dire la fraction de la réserve totale renouvelée annuellement en moyenne.

Durée de renouvellement le rapport inverse $\frac{V}{Q}$, c'est-à-dire le nombre d'années théoriquement nécessaire pour reconstituer entièrement la réserve en partant de zéro, dans l'hypothèse où aucun écoulement à l'extérieur n'aurait lieu en même temps.

Une nappe à réserve totale moyenne de 10^9 m³ et au "débit" moyen global de 10^7 m³/an, par exemple, aurait un taux de renouvellement de 0,01 et une durée de renouvellement de 100 ans.

(1) J.M. 1962. Certains auteurs ont proposé aussi coefficient de renouvellement (PLOTNIKOV, trad. française, 1962), mais s'agissant d'un pourcentage, taux semble plus correct.

La durée de renouvellement de la nappe des Sables verts du Bassin de Paris, prise plus haut comme exemple, a ainsi été évaluée à environ 2 000 ans (J. GOGUEL, 1959), d'après une porosité totale estimée à 30%.

Le renouvellement de la réserve est une caractéristique très importante pour définir les ressources en eau globales d'un aquifère et fixer le régime optimal de leur exploitation. Il peut donc servir de base à une classification des nappes:

- Un taux de renouvellement élevé, égal ou supérieur à 1, sera le propre des nappes à faible réserve, d'aquifères à fonction essentiellement adductrice, sans capacité régulatrice utilisable, à exploiter à la manière de cours d'eau régulier par des ouvrages "au fil de l'eau".
- Un taux moyen, de l'ordre de 0,5, caractérisera des nappes à capacité régulatrice annuelle utilisable mais à capacité régulatrice pluriannuelle limitée.
- Un taux petit, de l'ordre de 0,1, correspondra à des nappes à capacité régulatrice pluriannuelle optimale, pour des exploitations en régime d'équilibre.
- Des taux très petits enfin, inférieurs à 0,1 (jusqu'à 0,01, 0,001 ou moins encore) caractériseront surtout des nappes quasi-fossiles dont l'alimentation actuelle est négligeable; leur capacité régulatrice peut être très grande mais sans intérêt pratique. Par contre, une exploitation prolongée des réserves, en régime de déséquilibre, c'est-à-dire d'épuisement peut, dans certains cas, s'envisager, s'il s'agit de réserves suffisamment grandes (cas de la plupart des nappes captives étendues).

Mais, bien qu'exprimable en années, la durée de renouvellement ne peut pourtant être assimilée à un âge, même à un âge

fictif moyen. D'abord parce qu'elle suppose une constance non prouvée et improbable des facteurs du régime d'alimentation et d'écoulement de la nappe dans le passé. Ensuite et surtout parce qu'à l'instant d'origine fictive trouvé par compte à rebours depuis aujourd'hui, l'aquifère n'était pas vide: il contenait déjà de l'eau plus ancienne et rien ne prouve que toute la masse d'eau de la réserve est également touchée par le renouvellement; les premiers essais de datation absolue ont précisément montré le contraire.

La notion de renouvellement permet donc valablement une utile comparaison entre les nappes et une classification pratique basée sur un critère quantitatif simple, quoique encore difficile à évaluer avec précision puisqu'il est fonction de la connaissance du bilan et de la réserve. Elle a nécessairement le défaut de n'être que globale et de ne pas permettre de séparer les comportements des diverses couches d'eau d'une nappe selon leurs profondeurs, mais c'est elle cependant qu'il importe le plus de connaître sur le plan pratique, pour définir la politique d'exploitation d'une nappe.

Quelques évaluations de renouvellement.

	<u>Taux de renouvellement</u>	<u>Durée de renouvellement</u>
Nappe des sables verts du Bassin de Paris (J. GOGUEL, 1959) N.B. Valeur vraisemblablement trop forte	0,005	2.000 ans
Nappes phréatiques de plaines alluviales du Maroc présaharien: Tafilalt Ferkla (J. MARGAT, 1962)	0,3 à 0,7 0,25	1,5 à 3 ans 4 ans
Nappe phréatique du bassin pliocène de Meknès-Fès (Maroc) - ($V = 5,10^9 \text{ m}^3$, $Q = 3 \cdot 10^8 \text{ m}^3/\text{an}$ environ) (J. MARGAT, 1961)	0,1 à 0,5	10 à 20 ans
Sahara: Nappe du Continental intercalaire ou "Albien" (d'après A. CORNET et N. GOUSKOV, 1952: $V = 5 \cdot 10^{13} \text{ m}^3$, $Q = 23 \text{ m}^3/\text{s}$) N.B. Valeurs de V et de Q probablement surestimées.	0,00015	$7 \cdot 10^4$ ans
U.R.S.S. : Nappe captive de sous-écoulement alluvial d'Inkermann	0,7	1,5 an
Nappes captives du Cénomanien et du Jurassique du bassin Dniepr-Donetz (eaux douces)	0,00001	$1 \cdot 10^5$ ans
Nappe du carbonifère de la région Oural-Volga (eaux fortement concentrées) (Plotnikov, 1962)	0,0000001	$1 \cdot 10^7$ ans
Nappe captive de Zarzis (Tunisie) (J.M. Daniel, 1965)	0,003	3.700 ans

4. Age et renouvellement.

Le rapprochement entre les concepts d'âge de l'eau souterraine et de renouvellement des réserves, que l'on vient d'examiner successivement, montre qu'il s'agit de notions bien distinctes, non réductibles entre elles, mais qui peuvent se compléter utilement pour améliorer notre compréhension des processus d'alimentation et d'évolution des eaux souterraines.

Les progrès très sensibles de l'hydrodynamique souterraine ont, au cours des dernières années, accru considérablement l'efficacité de nos moyens d'investigation et d'intervention pour une meilleure connaissance et une utilisation à la fois plus intense et mieux consciente des eaux souterraines. Mais en portant au premier plan l'aspect physique et actuel des phénomènes hydrauliques dans le sous-sol, ces progrès ont pu conduire à faire perdre quelque peu de vue ou à sous-estimer l'importance du facteur temps à l'échelle géologique, c'est-à-dire le fait que les nappes ont une histoire, s'inscrivant dans le cadre de tous les phénomènes géodynamiques externes et internes. Cette histoire ne peut, pour la plupart des nappes étendues profondes, se ramener à un déroulement cyclique perpétuellement recommencé, selon un schéma pouvant s'appliquer aux nappes limitées et subsuperficielles en relation étroite avec des cours d'eau.

Une hydrogéologie exclusivement "actualiste" ne suffit pas à rendre compte de tous les faits observés: un point de vue "paléohydrogéologique" est nécessaire.

Les roches sédimentaires qui constituent la plupart des couches aquifères se sont constituées en majorité dans l'eau et le plus souvent dans l'eau de mer. Cette eau d'imbibition des sédiments originels, ou eau connée, dont la composition chimique s'est, en général, plus ou moins modifiée au cours de la lithogenèse (SCHOELLER, 1962), constitue le fond initial de la nappe au début de l'évolution continentale du système.

Cette constatation banale appelle deux remarques:

- L'eau de mer ou de lac dans laquelle les sédiments se sont déposés pouvait avoir elle-même un âge plus ou moins antérieur à l'époque de cette sédimentation, surtout dans le cas de mer profonde: il n'est donc pas exclu qu'une couche aquifère puisse recéler de l'eau plus ancienne que la roche.
- Au cours des temps géologiques, maintes couches sédimentaires ont subi des alternances d'émersion et de submersion qui ont à la fois perturbé le fonctionnement hydraulique du système et introduit des masses d'eau d'âges et de qualités variés.

L'effet des transgressions et régressions marines quaternaires et même historiques, sur la distribution des couches d'eau douce ou saumâtre dans le sous-sol des Pays-Bas, en a fourni un exemple "récent" (VOLKER, 1951).

Si l'on considère comme point de départ de l'évolution d'un système aquifère la date de sa dernière immersion, il est donc probable que, dès l'origine, une nappe comprend des eaux d'âges différents.

Ensuite, au cours de l'évolution continentale, les eaux d'infiltration d'origine météorique vont se substituer progressivement -et plus ou moins se mélanger- aux eaux connées originelles. La vitesse de cette dilution dépend naturellement des caractéristiques et des dimensions du système aquifère, et des conditions climatiques et morphologiques qui régissent son alimentation; elle peut être variable à la fois dans le temps et dans l'espace. Le degré de dilution des eaux d'un système par rapport à son état originel dépend donc, à conditions égales, du temps écoulé, de la durée de l'évolution: à tout instant de cette évolution, y compris à l'époque présente, une nappe donnée pourra contenir des eaux d'âges variés, s'échelonnant entre un âge actuel ou sub-actuel et un âge égal -ou même antérieur- à l'âge géologique de la roche aquifère. Les proportions des eaux de ces différents âges et leur distribution spatiale sont fonction des hétérogénéités internes du système, de la durée de son évolution et des modifications de régime qui ont pu la marquer: on conçoit bien qu'elles puissent être fort complexes.

— — —

Par suite de la grande diversité des conditions hydrogéologiques et climatiques, on peut donc s'attendre à trouver tous les intermédiaires possibles entre des nappes composées d'eaux sub-actuelles, à renouvellement rapide et uniforme, et des nappes d'eaux fossiles connées à peine altérées, sans renouvellement. Entre ces deux cas-limites doivent se situer de nombreuses nappes profondes étendues comportant des couches à proportion non négligeable d'eau connée, à renouvellement partiel et inégalement réparti.

Un renouvellement actif, limité à quelques couches privilégiées, est vraisemblablement la règle non seulement

pour la plupart des nappes captives étendues, mais aussi pour les nappes libres puissantes, assimilables en général à des nappes de trop-plein (SCHOELLER, 1962), à réserve en grande partie inférieure au niveau des exutoires.

Des observations qui précèdent, il ressort bien que la connaissance de l'âge -même avec une précision acceptable- d'un échantillon d'eau souterraine isolée, ne fournit en elle-même qu'une indication de faible valeur, sinon illusoire, sur le renouvellement global actuel.

Par contre, les datations de séries d'échantillons prélevés en des points convenablement répartis, en permettant de définir une stratification des eaux, peuvent contribuer à distinguer et à délimiter les couches d'eau les plus soumises au renouvellement.

CONCLUSIONS.

1. Sur le plan terminologique, il conviendrait de ne pas confondre sous une même dénomination des concepts également homogènes à une durée, mais différemment définis.

Le terme d'âge d'eau souterraine, ou mieux âge d'infiltration, ne devrait désormais s'appliquer qu'aux résultats de datation obtenus par les méthodes isotopiques; mais en ne lui donnant qu'un sens ponctuel: il ne vaut que pour l'échantillon et le point de prélèvement considéré. Aussi, ne doit-on pas parler de l'"âge d'une nappe" composée nécessairement d'eaux d'âges variés. Un âge moyen n'est lui-même relatif que de l'échantillonnage, et étant fonction de la représentativité de ce dernier, il permet mal des comparaisons entre des nappes différentes.

On réservera les dénominations de durée d'écoulement et de durée de renouvellement aux concepts à base hydrodynamique:

- le premier, ponctuel, se définit en fonction des caractéristiques de l'écoulement entre la zone d'alimentation et le point d'émergence ou de prélèvement considéré. C'est le temps de parcours d'un filet liquide donné;
- le second, global, résulte de la comparaison entre le volume moyen de la réserve et celui des apports pendant une durée assez longue et dépend de la connaissance du bilan.

Ces concepts ne doivent pas être assimilés à des âges

2. Sur le plan méthodologique, il convient de souligner que les méthodes d'évaluation des caractéristiques de l'écoulement et du renouvellement des nappes d'une part et les méthodes de datation d'autre part, loin de se concurrencer, se complètent et se valorisent mutuellement. Les méthodes isotopiques n'ont qu'une portée limitée si elles ne s'appuient pas sur une connaissance suffisante des caractéristiques hydrogéologiques et hydrodynamiques de l'aquifère, et il serait illusoire de les considérer comme une méthode de remplacement. Mais les méthodes "conventionnelles" de l'hydrogéologie, notamment les méthodes hydrodynamiques, qui considèrent avant tout des pressions, ont souvent le défaut de n'apporter que des informations globales sur le comportement des eaux dans une couche aquifère. Aussi l'intérêt des méthodes isotopiques de datation est-il autant qualitatif que quantitatif, car elles permettent de définir, au sein de la continuité hydrodynamique, la zonalité interne d'une nappe, une stratification de couches d'âges différents et très inégalement touchées par le renouvellement. Une fraction plus ou moins grande, mais parfois très importante, de la réserve d'une nappe peut être quasiment "morte", bien que toute la couche aquifère soit transmissive.

Les méthodes isotopiques constituent ainsi de nouveaux moyens d'investigation sur les eaux souterraines que l'hydrogéologue ne doit pas méconnaître ni sous-estimer, bien qu'elles soient encore perfectibles à beaucoup d'égards. Mais elles n'enrichissent efficacement l'hydrogéologie que dans la mesure où elles s'appuient sur ses autres méthodes. Une collaboration étroite et dans les deux sens doit donc s'établir entre l'hydrogéologue et le physicien, comme elle s'est déjà instituée entre l'hydrogéologue et l'hydraulicien.

BIBLIOGRAPHIE

ANDRIMONT R. (d') (1905)

Note préliminaire sur une nouvelle méthode pour étudier expérimentalement l'allure des nappes aquifères dans les terrains perméables en petit.

(Ann. Soc. géol. Belgique, XXXII, 2, P.M 115-122, Liège, 1905)

BECKSMANN E. (1961)

Das Alter des Grundwassers.

(L'âge de l'eau souterraine).

(Réunion de Rome. Assoc. intern. hydrogéol., 1961, t. IV, pages 193-196).

BEGEMANN F., LIBBY W.F. (1957)

Continental water balance, ground water inventory and storage times, surface ocean mixing rates and world-wide circulation patterns from cosmic ray and bomb tritium.

(Le bilan d'eau continental, l'inventaire des eaux souterraines et leur durée d'emmagasinement, les vitesses de mélange en surface des océans, et les régimes de circulation à l'échelle mondiale d'après le tritium provenant du rayonnement cosmique et des bombes).

(Géoch. et Cosmoch. acta, 12, 1957, p. 277-296).

BELGRAND E. (1861)

Note sur le puits de Passy.

(Ann. Soc. météor. France, t. IX, p. 124, 1861).

BRINCKMANN R., MÜNNICH K.O., VOGEL J.C. (1959)

C. 14 - Altersbestimmungen von Grundwasser.

(Détermination de l'âge de l'eau souterraine par le C.14).

(Naturwissenschaften, t. 46, n° 1, pages 10-12, 1959).

CARLSTON C.W., THATCHER L.L., RHODEHAMEL E.C. (1960)

Tritium as a hydrologic tool.
The Wharton tract study.

(Le tritium au service de l'hydrologie.
L'étude de Wharton tract).

(C.R. Ass. gén. Helsinki, Assoc. intern. Hydrol. scient.,
1960, Publ. A.I.H.S., n° 52, p. 503-512).

CARLSTON Ch. W. (1964)

Use of tritium in hydrologic research. Problems and
limitations).

(Utilisation du tritium dans la recherche hydrologique.
Problèmes et limitations).

(Symposium sur les techniques nouvelles en géologie.
Michigan Basin geol. Soc. - Michigan state University,
Ap. 1964 - Bull. A.I.H.S. IXè année, n° 3, 1964, p.38-42).

CASTANY G. (1960)

Quelques aspects nouveaux de l'hydrogéologie du Bassin
parisien.

(C.R. Com. nat. fr. géod. géoph., 1960).

DANIEL J.M. (1965)

Etude des répercussions d'une exploitation de longue durée
sur un système aquifère artésien (Terres et Eaux, n° 45,
2è trim. 1965).

FAURE H. (1965)

Le problème de l'origine et de l'âge de l'eau des oasis
sahariennes du Niger.

(C.R. Réunion d'Hanovre de l'Ass. intern. hydrogéol., 1965)

GOGUEL J. (1959)

Applications de la géologie aux travaux de l'ingénieur.
(Paris, MASSON, 1959).

LEMOINE P., HUMERY R. et SOYER R. (1939)

Les forages profonds du bassin de Paris. La nappe artésienne
des Sables verts.

(Mém. Mus. Nat. Hist. nat., XI, 1939).

LIBBY W.F. (1954)

Tritium in nature.

(Sc. amer., vol. 190, n° 4, pp. 38-42, 1954)

MARGAT J. (1962)

Mémoire explicatif de la Carte hydrogéologique de la plaine du Tafilalt.

(Notes et Mém. Serv. géol. Maroc, n° 150bis, Rabat, 1962).

MARGAT J. (1965)

Possibilités d'exploitation saisonnière des réserves régulatrices des nappes.

(Rapport B.R.G.M., DS.65.A.42, 1965).

MÜNNICH K.O., VOGEL J.C. (1960)

C. 14 déterminations of deep ground-waters.

(Détermination de l'âge d'eaux souterraines profondes par le C.14).

(C.R. Ass. gén. Helsinki. Ass. Intern. Hydrol. scient. Publ. A.I.H.S. n° 52, 1960, p. 537-541).

MÜNNICH K.O., VOGEL J.C. (1962)

Application of Isotope Techniques in Hydrology.

(Agence intern. de l'énergie atomique, "Technical reports series", n° 11, Vienne, 1962).

C.R. d'un colloque tenu à Vienne les 6-9 novembre 1961).

MÜNNICH K.O., VOGEL J.C. (1964)

Isotope Techniques for Hydrology.

(Agence intern. de l'énergie atomique, "Technical reports series", n° 23, Vienne 1964).

C.R. d'un colloque tenu à Vienne les 17-21 décembre 1962).

MÜNNICH K.O. et ROETHER W.

A comparaison of Carbon 14 and tritium ages of groundwater.

(in "Radioisotopes in hydrology (p.383-395). Proc. Symposium de Tokyo, I.A.E.A. , Vienne 1963).

PLOTNIKOV N.A. (1962)

Ressources en eaux souterraines: classification et mode d'évaluation.

(trad. française Gauthier-Villars, Paris, 1962).

SCHOELLER H. (1962).

Les eaux souterraines (pp. 383-387).

THATCHER L.L., RUBIN M. et BROWN G.F. (1961)

Dating desert ground water.

(Science, 134, p. 105-106, U.S.A. , 1961).

VOGEL J.C. et EHHALT D. (1963)

The use of the carbon isotopes in ground water studies
(in "Radioisotopes in hydrology" , pp. 383-395).
Proc. Symposium de Tokyo, I.A.E.A. Vienne 1963.

VOLKER A. (1951)

L'origine des eaux saumâtres à grandes profondeurs
dans le sous-sol des polders hollandais.

(Publ. n° 32 Assoc. intern. Hydrol. scient., réunion de
Bruxelles, 1951, T. IV, pp. 218-221).

Anonyme (1964)

Isotopes techniques for hydrology.

(Technical reports series, n° 23. I.A.E.A. , Vienne, 1964)