



abrégé sur les eaux souterraines de la France

chapitre France de l'ouvrage **"Les eaux souterraines de l'Europe"**
(monographies par pays)
promu et publié par les Nations-Unies

Département de la Coopération technique pour le développement
Division pour les ressources naturelles et l'énergie
dans la collection Natural Resources/Water Series



abrégé sur les eaux souterraines de la France

chapitre France de l'ouvrage **"Les eaux souterraines de l'Europe"**
(monographies par pays)

promu et publié par les Nations-Unies

Département de la Coopération technique pour le développement
Division pour les ressources naturelles et l'énergie
dans la collection Natural Resources/Water Series

J. Margat

juillet 1986
86 SGN 623 EAU

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département Eau

B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - Tél.: 38.64.34.34

AVERTISSEMENT

Cet essai synthétique sur les eaux souterraines de la France répond à une demande des Nations-Unies, pour contribuer à un ouvrage sur "Les eaux souterraines de l'Europe" composé de monographies par pays, dont la publication va couronner et achever la série de volumes consacrés aux différentes parties du monde sur le même thème (le premier, consacré à l'Afrique fût publié en 1971 et sa réédition est en cours, le plus récent se rapporte à la "Pacific Region").

Les contraintes de volume très restrictives assignées, au texte et aux illustrations (encore qu'incomplètement respectées), ont déterminé le caractère compact de cet abrégé dense et néanmoins sommaire, composé suivant un plan-type recommandé et destiné surtout à des lecteurs étrangers.

Sa rédaction a largement emprunté à des ouvrages monographiques antérieurs tout en s'efforçant de les actualiser en exploitant des matériaux récents, sans être cependant à l'abri d'omission, et de ne pas s'en tenir à une dissertation descriptive en apportant le maximum possible de données chiffrées.

Moyennant certaines améliorations et quelques compléments (au plan des données et des illustrations surtout), tout en conservant son format "maniable", cette monographie pourrait toutefois être utile à diverses fins intérieures, didactiques ou informatrices (aide-mémoire pour l'enseignement, pour les publicistes et certains professionnels non spécialisés en cette matière). Aussi sa diffusion en l'état présent est-elle restreinte à tous ceux dont des suggestions et contributions sont espérées dans la perspective de la réalisation d'une version consolidée et enrichie en 1987.

J.M.

TABLE

	Page
1. GENERALITES - GEOGRAPHIE PHYSIQUE, GEOLOGIE	1
Relief	1
Hydrographie	3
Climat	4
Hydrologie des eaux superficielles	6
Géologie	7
2. HYDROGEOLOGIE	10
Historique	10
Hydrogéologie régionale de la France	11
Caractéristiques des formations aquifères	19
Hydrologie des eaux souterraines. Alimentation et budgets en eau des aquifères	19
Qualités physiques et chimiques des eaux souterraines	27
3. TECHNIQUES ET METHODES DE CONNAISSANCE	30
Prospection et inventaires	30
Réseaux d'observation	31
Banques de données	31
Cartographie	32
Modélisation	33
Evaluation des ressources	34
4. EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES	35
Conditions et techniques (revue régionale)	35
Coûts de production	39
Statistiques de prélèvements	41
Historique des exploitations	43
Prélèvements et ressources : degrés d'exploitation des eaux souterraines	44
Problèmes	45
5. ADMINISTRATION ET GESTION	47
Le droit des eaux souterraines en France	47
Les acteurs	47
Les objectifs de gestion	48
Les intervenants et les instruments de gestion	49
les aides aux décisions de gestion	50
En conclusion	51
6. FORMATION ET COOPERATION	52
Formation	52
Coopération	53
7. REFERENCES	54

FRANCE

Superficie : 549 183 km²

Population (1984) : 54 900 000 hab.

1 - GENERALITES - Géographie physique, géologie

Couvrant un peu plus du vingtième de la superficie du continent européen, la France en est le pays le plus étendu après la partie européenne de l'URSS. Elle partage avec la seule Espagne le privilège d'être baignée à la fois par les deux espaces maritimes qui bordent le continent : l'Océan Atlantique et la Mer Méditerranée. Aucun de ses points n'est à plus de 450 km de la mer. Frontières terrestres et littorales forment à peu près également ses contours.

Relief

La constitution contrastée du sous-sol de la France, résultat de son histoire géologique, fonde la variété de son relief et de ses paysages où s'équilibrent plaines, plateaux, montagnes jeunes et anciennes, véritable résumé des formes courantes en Europe.

Les **montagnes jeunes**, chaînes alpines rectilignes (Pyrénées) ou arquées (Alpes, Jura) forment les reliefs les plus élevés, comprenant le point culminant de l'Europe (Mont Blanc, 4 807 m), la plus grande partie du territoire d'altitude supérieure à 1 000 m (37 255 km²) et toute celle supérieure à 2 000 m (8 425 km²). Formes d'érosion surtout où coexistent (surtout dans les Alpes) vallées profondes, monts et pics escarpés, elles traduisent vigoureusement la diversité de leur constituants, mélange (hors du Jura) de roches cristallines et de roches sédimentaires de toutes sortes, parmi lesquelles les calcaires composent des reliefs abrupts.

Les **reliefs anciens** qui subsistent (Massif Armoricaïn, 65 000 km² ; Massif Central, 86 000 km² ; Vosges, Ardennes, massifs provençaux) complètent l'ossature du territoire encadrant les plaines sédimentaires. Leurs formes adoucies par une érosion prolongée -pénéplaines anciennes- sont cependant parfois plus accentuées du fait de rajeunissement -contre-coups de la phase alpine- : relèvements favorisant le creusement de vallées surimposées, reliefs volcaniques surajoutés, surtout dans le Massif Central et les Vosges. Ces reliefs ne dépassent jamais 2 000 m : le Massif Central culmine à 1 885 m, le Massif armoricaïn à 417 m, les Vosges à 1 424 m.

Les **plaines des grands bassins sédimentaires** (Bassins de Paris et d'Aquitaine) sont rarement aussi aplanies que les grandes plaines du Nord et de l'Est de l'Europe. Affectées d'ondulations, leurs surfaces structurales se relèvent vers la périphérie des bassins, formant par leurs constituants les plus résistants, les couches calcaires, des reliefs de côte caractéristiques. Leurs altitudes dépassent rarement 200 m mais peuvent s'élever jusqu'à 500 m sur les plateaux qui les prolongent et les seuils qui séparent les massifs bordiers (Est du bassin de Paris, surtout : Lorraine, Bourgogne). Tout un réseau de vallées fluviales s'y développe, générateur de reliefs de coteaux, de terrasses et de plaines alluviales.

S'y ajoutent des plaines d'effondrement moins étendues (Alsace, Limagnes du Massif Central, Bresse et couloir rhodanien) également associées à des vallées fluviales majeures (Rhin, Loire et Allier, Saône et Rhône), et des plaines cotières de largeur variable (Flandre maritime, bas Languedoc).

Le tracé actuel des côtes (plus de 3 000 km) résulte de la transgression flandrienne. L'alternance de côtes rocheuses, escarpées et découpées et de côtes sableuses basses et rectilignes, parfois lagunaires, traduit la variété des reliefs et des constituants géologiques des régions littorales. Les embouchures des cours d'eau sont aussi variées : les estuaires de la façade atlantique (Seine, Loire, Garonne) contrastent avec les deltas méditerranéens (Rhône).

Tableau 1 - Les grands bassins fluviaux français

Fleuve	Superficie du bassin (en France) km ²	Longueur du fleuve principal (en France) km	Débit moyen		Hauteur moyenne de l'écoulement mm/an	Débit régulier (étiage moyen) m ³ /s
			10 ⁹ m ³ /an	m ³ /s		
Seine	78 600	776	14	450	180	210
Loire	118 000	1 010	27	850	230	250
Garonne	81 000	647	31,5	1 000	390	300
Rhône	88 157 (Σ 95 600)	522 (F)	Σ 54	1 700	-	1 000
			Formé en France :		50	-
			46	1 460		
Rhin	23 700 (Σ 185 000)	Moselle (F) 313 III 217 Rhin frontière 182	Formé en France :			
			7,5	240	320	120
Rivières côtières → Atlantique et et Manche	102 793	Adour 335 Charente 360 Vilaine 229 Somme 245	23	730	220	310
Rivières côtières → Méditerranée	40 697	Aude 223 Hérault 160 Var 120	15	475	370	90
Rivières allant en pays voisin (sans retour)	16 236	Meuse (F) 489 Escaut (F) 180	8	255	490	120
France entière	549 183	-	180	5 700	300	2 400

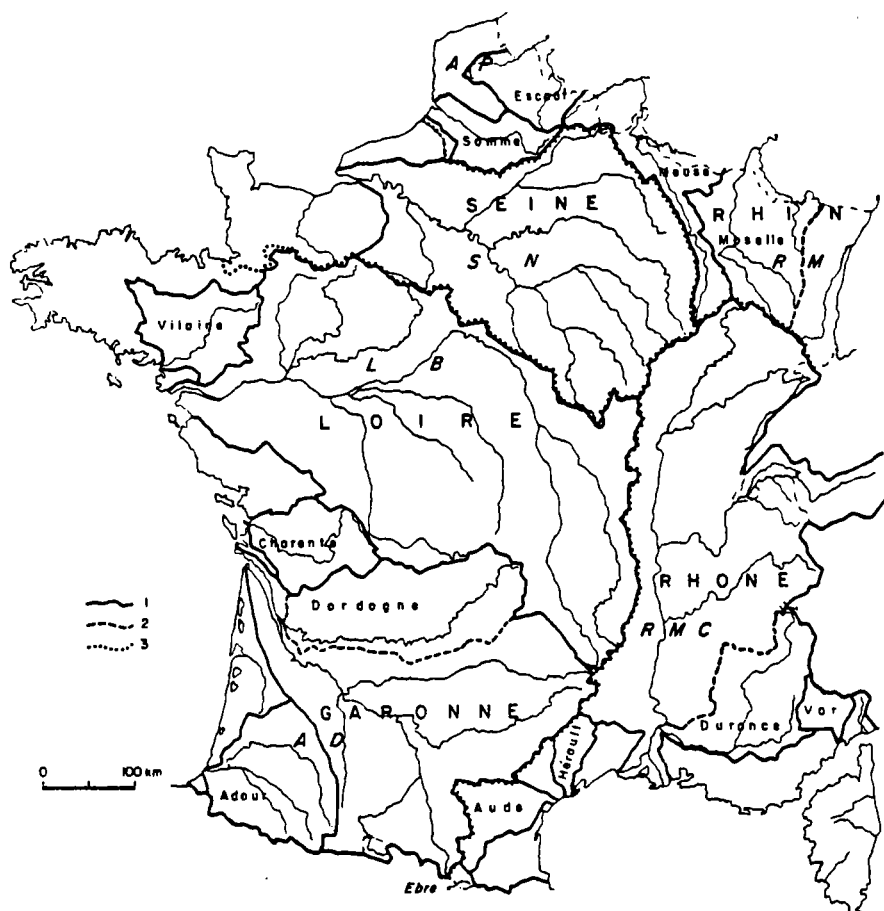


Fig. 1 - Principaux bassins fluviaux et circonscriptions des agences de l'eau (A.D : ADOUR-GARONNE, A.P. : Artois-Picardie, L.B. : Loire-Bretagne, R.M. : Rhin-Meuse, R.M.C : Rhône-Méditerranée-Corse, S.N. : Seine-Normandie).
1. limite de bassins 2. limite de sous-bassin 3. limite de circonscription d'agence de l'eau.

Hydrographie

Modelé sur la structure du relief, le réseau hydrographique français est organisé en quatre bassins fluviaux majeurs -Seine, Loire, Garonne et Rhône- qui drainent vers les trois façades maritimes principales (Manche, Atlantique, Méditerranée) 63 % du territoire, plus une partie du bassin du Rhin qui forme lui-même une frontière fluviale de 170 km entre la France et la RFA, drainant 4,3 % du territoire (13 % de ce grand bassin européen). Seul le Rhône a un bassin amont extérieur, en Suisse (7 443 km²), tandis que seule la frontière du NE est traversée par des cours d'eau exportateurs en Belgique, au Luxembourg et en RFA qui drainent en France, avec le Rhin, 38 664 km² (cf. tableau 1 et figure 1). La longueur totale des cours d'eau français a été chiffrée à 270 000 km.

Climat

Situé entre les latitudes N 42° et 51°, le territoire français est entièrement compris dans la zone tempérée, mais son relief, sa configuration et la situation de ses façades maritimes déterminent une variété climatique qui se résume par trois types principaux de climat (cf. tableau 2) :

- . **le climat océanique tempéré** domine sur la majeure partie du pays, du Nord au Sud-Ouest, où sa pénétration est favorisée par la disposition des reliefs, et par la prédominance accusée des vents d'ouest, avec des formes de transition dans les plaines intérieures (climats parisien et aquitain moins humides et à écarts thermiques saisonniers plus contrastés).
- . **le climat continental** plus sec et plus rigoureux, règne sur les versants est des massifs et dans les dépressions abritées de l'Est et du Centre de la France, en évoluant vers un climat montagnard en altitude, tandis que les versants ouest des reliefs-barrières qui arrêtent les influences océaniques -sont les régions les plus arrosées (Vosges, Jura, Massif Central et Préalpes du Nord, Pyrénées Occidentales).
- . **le climat méditerranéen** s'étend depuis le rivage de la mer Méditerranée, sur une profondeur de 100 à 150 km au plus, jusqu'aux reliefs des Pyrénées orientales, du Sud du Massif Central et des Alpes méridionales, qui forment un écran protégeant les plaines côtières des influences venues du nord et de l'ouest. Il se caractérise par des températures estivales élevées et des précipitations relativement abondantes (souvent supérieures à celles des centres des bassins aquitain et parisien) mais irrégulières et assez concentrées dans le temps.

Les 800 mm moyens annuels uniformisés de précipitations sont très inégalement répartis dans l'espace et le temps. Un tiers du pays reçoit la moitié du volume total moyen des précipitations, qui s'échelonnent en année moyenne entre 500 et 2 800 mm (valeurs extrêmes) selon les lieux : maximums dans les Alpes du Nord (dont 0,4 à plusieurs -jusqu'à 9-mètres de neige), l'Ouest et le Sud du Massif Central, les Pyrénées occidentales ; minimums dans les plaines cotières méditerranéennes. Les précipitations de fréquence 0,9 -minimums "garantis" 9 années sur 10- sont de l'ordre des 3/4 à 1/2 des hauteurs moyennes annuelles.

A l'inverse l'évapotranspiration réelle, moins diversifiée et variable est généralement comprise entre 500 et 600 mm/an, s'affaiblissant à moins de 500 mm en régions peu arrosées (littoral méditerranéen) et années sèches, dépassant 600 mm en régions et années pluvieuses (fig. 3).

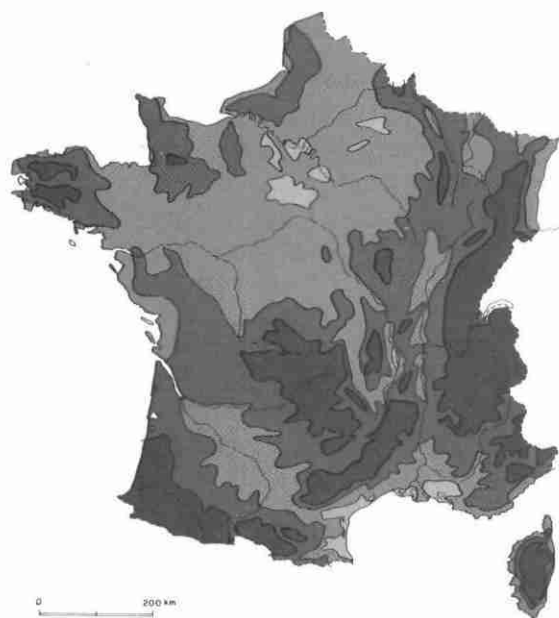


Fig. 2 - Précipitations moyennes annuelles

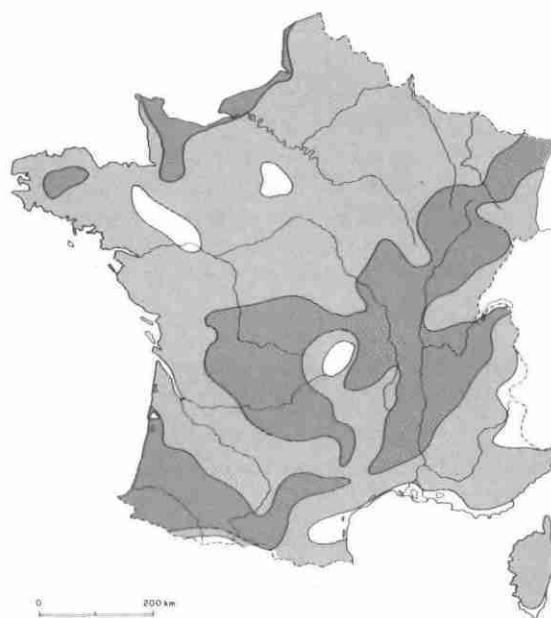


Fig. 3 - Evapotranspiration réelle moyenne annuelle

Tableau 2 - Climats, températures et précipitations en France

Climat	océanique		continental	méditerranéen
	armoricaïn et aquitain	séquanien (parisien)		
Températures moyennes mensuelles vraies : Janvier/Juillet (°C)	Hiver doux, été frais 2 à > 6 / 15 à 22	Hiver plus froid, été tiède 0 à 4 / 15 à 20	Hiver froid, été chaud - 5 à 2 / 15 à 20 (en montagne : < - 10 à 0 / < 10 à 15	Hiver tiède, été chaud 4 à > 6 / 20 à > 22
Nombre moyen annuel de jours de gelée	20 à 60	60 à 80	> 80 (en montagne > 100)	< 20 à 40
Précipitations annuelles moyennes les plus répandues	750 à 800 mm en 150 à 160 jours (max. 200 jours à Brest, plus de 1 m au Sud en 170 jours) < 3 à 10 jours de neige	600 à 750 mm en 160 jours 5 à 20 jours de neige	750 à 1 000 mm, 1 à 2 m en haute montagne en 150 à 180 jours (sauf Sud Alpes et Massif Central : 100 à 120 jours) 20 à > 50 jours de neige	600 à 800 mm en 70 à 80 jours < 3 jours de neige
Saison pluvieuse	Armoricaïn : Septembre - Janvier Aquitain : Avril - Juin et Octobre - Décembre	Mai - Novembre	Mai - Novembre / Décembre	Octobre - Décembre
Saison sèche	Armoricaïn : Février - Août Aquitain : Janvier - Mars et Juillet - Septembre	Décembre - Avril	Nord : Janvier - Avril Sud : Décembre - Mars - Avril	Juin - Août

Hydrologie des eaux superficielles

Reliefs et climats conjugués déterminent trois grands domaines du point de vue des régimes des eaux superficielles :

- un **domaine océanique ou atlantique**, le plus étendu (plus de 50 % du territoire, comprend toutes les régions de basse altitude du Sud-Ouest, de l'Ouest, du Centre et du Nord de la France. Le régime des cours d'eau est essentiellement pluvial : hautes eaux d'hiver, basses eaux d'été -saison la moins pluvieuse et à la plus forte évaporation potentielle- souvent atténuées dans les régions sédimentaires à aquifères régulateurs. Les coefficients d'écoulement moyen varient surtout entre 30 et 50 %.
- un **domaine montagnard** comprenant tous les reliefs assez élevés, où les températures plus basses diminuent l'évaporation alors que l'altitude amplifie les précipitations, où les pentes accentuent le ruissellement, d'où des coefficients d'écoulement de 60 à 80 %. Régime des cours d'eau pluvio-nival à glaciaire (Alpes), avec des hautes eaux de printemps et parfois jusqu'en été (fonte des neiges), des basses eaux de fin d'été et d'automne et des basses eaux relatives d'hiver (faibles précipitations liquides). La plupart des grands fleuves en sont issus.
- un **domaine méditerranéen** dans le Sud-Est, à régimes très irréguliers, avec deux saisons de hautes eaux au printemps et en automne, et des basses eaux très marquées en été, atténuées toutefois dans certains bassins par des aquifères karstiques régulateurs. Les coefficients d'écoulement sont abaissés à moins de 30 % -en moyenne- par la forte évaporation. C'est la région des crues les plus intenses et brutales, dues principalement aux pluies d'orage en automne.

Les régimes des grands fleuves résultent des partages plus ou moins complexes de leurs bassins versants entre ces domaines. La Seine, à régime pluvial océanique est le plus régulier des fleuves français ; un affluent montagnard, l'Yonne, peut néanmoins engendrer des crues d'hiver dévastatrices. La Loire, à bassin amont montagnard à un régime plus irrégulier, à étiage d'été marqué, mieux soutenu en aval par des affluents à régime océanique (Maine). La Garonne à hauts bassins très montagneux a le régime le plus irrégulier, avec de hautes eaux de printemps grossies par la fonte des neiges et des crues parfois brutales, et des étiages sévères dues au défaut de régulateurs et à la forte évaporation estivale. Le Rhône à le régime le plus complexe du à la composition de son bassin principalement montagnard, avec d'importants régulateurs glaciaires et lacustres (Lac Léman) et aussi aquifères (Jura), et en partie océanique par le bassin de la Saône ; d'où un relais entre des hautes eaux d'hiver assurées par la Saône et celles de printemps et d'été issues des affluents alpestres, avec des crues d'Automne des affluents du Jura et du Massif Central.

Le budget en eau global de la France et de chacun des six "bassins" agrégés, circonscriptions des six agences de l'eau (fig. 1) qui interviennent financièrement dans la gestion des eaux, est résumé dans le tableau 3.

Tableau 3 - Budget en eau de la France en année moyenne
(en 10⁹ m³/an)

Bassin (Agence de l'eau)	Superficie en km ²	Flux entrants		Flux sortants			
		(1) Précipitations	(2) Affluents de pays voisins	(3) Evapotranspi- ration réelle (déficit d'écou- lement interne)	(4) Ecoulement naturel d'origine interne (1 - 3)	(5) Ecoulement naturel total sortant (2 + 4)	(6) Part de (5) écoulée en pays voisin et "réimportée" avec (2)
Adour - Garonne	116,9	92	1	53	39	40	0
Artois - Picardie	19,9	14	ε	10	4	4	ε
Loire - Bretagne	155,9	105	0	70	35	35	0
Rhin - Meuse	31,5	29	2*	17	12	14	1
Rhône - Méditerranée - Corse	130,1	125	12	63	62	74	4**
Seine - Normandie	94,9	75	ε	57	18	18	0
FRANCE %	549,2	440 100	15 -	270 61	170 39	185 -	5 -

* Rhin - Frontière non compris ($\bar{Q}$ au point amont : 33.10⁹ m³/an)

** Affluents du Haut-Rhône en Suisse

Géologie

Le sous-sol de la France, au coeur de cet extrême occident de la plaque "Eurasie" qu'est l'Europe de l'Ouest, offre à la fois une grande diversité lithostratigraphique et une structure complexe, fruits d'une histoire géologique variée et mouvementée. Le premier regard sur la carte géologique confirme et complète l'analyse du relief. Le territoire français est fait de la juxtaposition de sept pièces principales bien contrastées (fig. 4) : deux môles anciens (Massif Armoricain, Massif Central) plus quelques accessoires (Ardennes et Vosges au NE, Maures au SE), parties visibles du socle hercynien incluant lui-même des chaînes plissées rabotées et des bassins sédimentaires pré-hercyniens, deux chaînes de surrection récente (Alpes -avec Jura et Corse- au SE, Pyrénées au SO) et trois bassins sédimentaires post-hercyniens (bassins de Paris et d'Aquitaine, bassin subalpin enserré entre le Massif Central, le socle provençal et les Alpes qui l'ont en grande partie incorporé à leurs structures plissées. L'ensemble se partage entre les deux principaux domaines structuraux de l'Europe moyenne : hercynien et alpin.

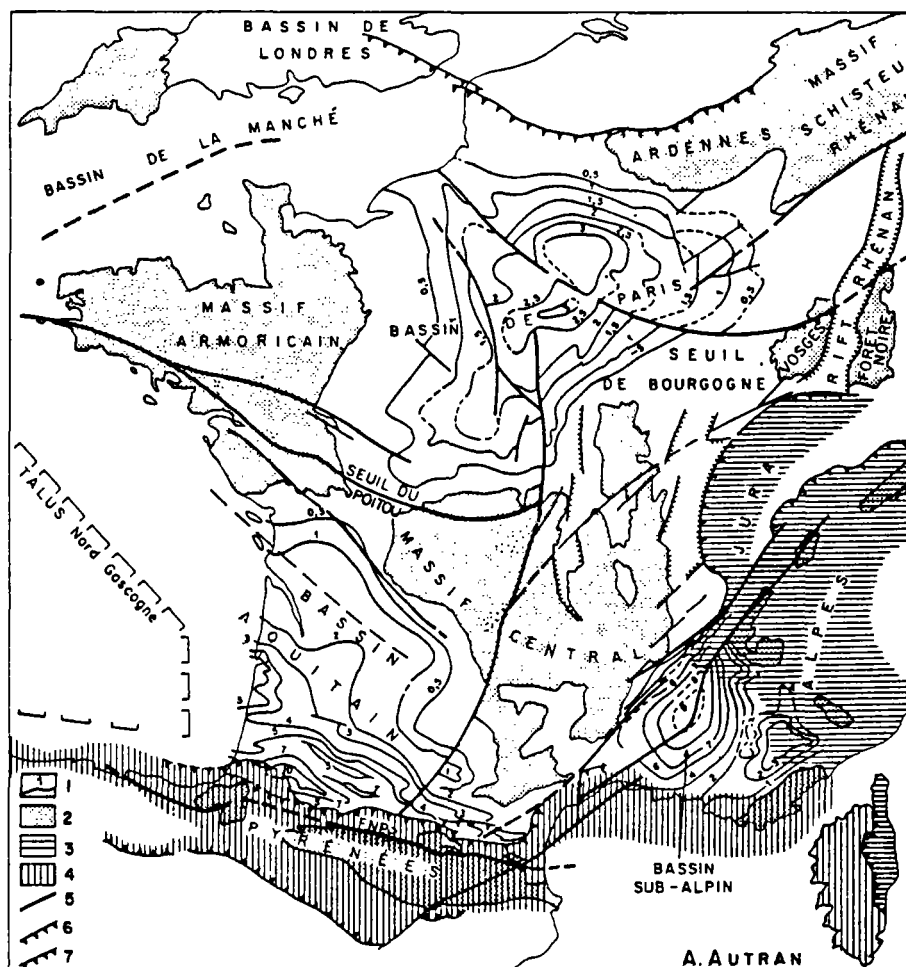


Fig. 4 - Structure géologique de la France

1. Couverture sédimentaire post hercynienne (mésozoïque, tertiaire, quaternaire) et lignes d'égale profondeur du socle hercynien (en km). 2. Socle hercynien affleurant
3 et 4 : zones orogéniques alpines, 3 : domaine alpin, 4. domaine pyrénéo-provençal.
5 : Principaux accidents tardi-hercyniens à rejeu mésozoïque et tertiaire.
6 : Chevauchement externe nord-hercynien. 7. Chevauchements externes des Alpes et des Pyrénées.

Tableau 4 - Les trois principaux bassins sédimentaires français

Bassin	Superficie km ²	Façade maritime	Epaisseur maximale de la couverture sédimentaire (m)
de Paris	160 000	Manche	3 200
d'Aquitaine	60 000	Atlantique	10 000
sub-alpin	25 000	Méditerranée	9 000

Presque tous les étages de l'échelle stratigraphique, du Précambrien au Quaternaire, sont représentés : sédiments précambriens et primaires (schistes, grès, conglomérats, calcaires) en partie métamorphisés, conservés en quelques sillons incrustés dans les massifs anciens ou couverts par les formations plus récentes et connus surtout par les recherches et exploitations minières (bassins houillers) ou pétrolières ; sédiments secondaires (sables, argiles, roches salifères et carbonatées) formant l'essentiel des puissantes couvertures des trois grands bassins - et de leurs prolongements sous-marins - où alternent les faciès de nombreuses séquences sédimentaires surtout marines -cf. tableau 4- ; sédiments tertiaires et quaternaires (sables, argiles, mollasses, calcaires, gypse, alluvions) en partie continentaux (formations lacustres, fluviatiles, localement glaciaires ou éoliennes -loess-) occupant surtout le centre du bassin de Paris, le Sud et l'Ouest du bassin d'Aquitaine, et plusieurs fossés d'effondrement dans le Centre et l'Est du pays (Auvergne, Bourgogne, Alsace) ; tous ont été impliqués dans les constructions complexes des chaînes alpines. Des roches éruptives intrusives ou extrusives sont également de différents âges géologiques, des granites précambriens du Massif Armoricain aux laves quaternaires d'Auvergne.

Deux grandes phases orogéniques sont responsables de l'architecture géologique du pays :

- l'orogénèse hercynienne a touché l'ensemble du territoire : phase de plissements de directions varisques et d'intrusions, parfois de métamorphisme, suivie par un épisode "tardi-hercynien" général de fracturations et de décrochements qui ont souvent influencés les sédimentations et les plissements ultérieurs.
- l'orogénèse alpine n'a touché que le Sud et le Sud-Est de la France, en engendrant à la fin du Tertiaire les deux chaînes pyrénéo-provençale puis alpine s.s., modelées en partie par les héritages hercyniens. Remaniés et exhaussés, des noyaux de socle ancien forment leur ossature (chaînes axiales des Pyrénées et des Alpes, Corse), tandis que les sédiments secondaires et tertiaires ont été violemment plissés, parfois déversés en nappes de charriage. Leur périphérie s'est jalonnée d'effondrements et de ravivements de structures anciennes (Corse, Maures, Sud et Est du Massif Central, "rift" du fossé rhénan). Le volcanisme quaternaire, de l'Auvergne au Languedoc, les signes répandus d'une néotectonique toujours active, la sismicité appréciable en diverses régions, sont autant de symptômes de l'inachèvement de cette phase.

2 - HYDROGEOLOGIE

Historique

Des oeuvres des précurseurs du 17e siècle (P. PERRAULT 1674, E. MARIOTTE 1686) aux contributions des physiciens, ingénieurs et géologues du 19e siècle (F. ARAGO 1834, E. BELGRAND 1846, J. DUPUIT 1848, H. DARCY 1856, J. GOSSELET 1886, A. DAUBREE 1887, E.A. MARTEL 1894, ...) les progrès des connaissances sur les eaux souterraines de la France y ont été inséparables du développement de la science hydrogéologique elle-même, fille de l'hydraulique et de la géologie. Ces progrès ont aussi été directement liés à l'émergence de problèmes engendrés par la croissance urbaine et industrielle, mettant en jeu l'eau souterraine, à leur analyse et à la recherche de solutions.

La découverte et la mise en exploitation des nappes souterraines **artésiennes** (de l'Artois, province du Nord de la France), avec les premiers forages profonds jaillissants à Tours (1830) et Paris (1840) ; le besoin de prévoir et de calculer l'exhaure des eaux des mines de charbon et de fer ; le souci de comprendre la genèse des eaux thermales et minérales, et de raisonner leur captage ; les premières explorations spéléologiques ; la prise de conscience des risques de contamination des eaux de source ou de puits captées et la recherche des moyens d'assurer leur protection sanitaire, furent ainsi autant de contributions au développement de l'hydrogéologie en France. Jusqu'au début du 20e siècle, son avancement demeura néanmoins empirique et sectoriel, restreint à quelques régions.

Depuis le milieu du 20e siècle, la croissance des demandes en eau pour alimenter les populations (parachèvement de la desserte en eau potable urbaine et rurale), les industries et les cultures (expansion de l'irrigation) a provoqué un large appel aux eaux souterraines dont l'exploitation intensifiée, parfois présumée excessive, a motivé des efforts d'évaluation de ressource exigeant des connaissances hydrogéologiques plus complètes, plus pertinentes et plus quantifiées. Une génération d'hydrogéologues professionnels, rodés pour beaucoup en Afrique -notamment au Maghreb- et dont J. ARCHAMBAULT, H. SCHOELLER, G. CASTANY furent les pionniers, s'y est consacrée dans le cadre des Universités ou de Grandes Ecoles, du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), et d'entreprises d'études. Après une analyse stimulante de P. LAFITTE et J. RICOUR qui fit date (1956), des inventaires méthodiques, des recherches documentaires et des opérations de prospection et de modélisation se sont amplifiés. Ils ont permis de réaliser des monographies et oeuvres cartographiques qui expriment un état des connaissances hydrogéologiques aujourd'hui assez avancé pour la plus grande partie du territoire, et dont on résume ci-après les grandes lignes. Les efforts contemporains s'appliquent davantage à tout ce qui a trait à la qualité des eaux souterraines, à sa genèse et à sa protection.

Enfin, les applications de l'hydrogéologie se sont élargies à d'autres finalités que la prospection et l'exploitation des eaux souterraines "matière première". Après les contributions des investigations pétrolières (bassins de Paris et d'Aquitaine principalement), les recherches pour étudier la faisabilité de stockages souterrains de fluide (notamment de gaz) en aquifère, pour évaluer et exploiter les ressources géothermiques, ou pour analyser et garantir la sûreté de dépôts superficiels ou souterrains de déchets, ont ces dernières années beaucoup concouru à faire progresser la connaissance des conditions hydrogéologiques profondes, notamment celles des milieux peu perméables, tant dans le socle ancien que dans le tréfond des bassins sédimentaires.

Hydrogéologie régionale de la France

La constitution géologique variée et les conditions climatiques assez différenciées décrites plus haut s'allient pour créer une grande diversité de conditions hydrogéologiques et de régimes des eaux souterraines. Des structures hydrogéologiques de tailles et de complexités très différentes et des systèmes aquifères aux comportements variés s'inscrivent dans les cadres géologiques et hydrographiques du territoire français. La carte hydrogéologique structurale (systèmes aquifères) de la France à petite échelle publiée en 1980 (BRGM) a donné une image synthétique de ces conditions, schématisée par la figure 5.

La description hydrogéologique abrégée de la France s'organise ainsi le mieux suivant les grandes provinces géologiques.

N.B. : Les conditions offertes aux exploitations comme aux conservations des eaux souterraines sont traitées plus loin en 4.

a - Les massifs anciens

Les terrains cristallins et schisteux qui dominent dans ces massifs ne comportent pas d'aquifères étendus. Il est cependant trop simple et inexact d'accoler à tous ces terrains en bloc l'étiquette "imperméable". La Bretagne n'est pas un "toit d'ardoise" et au coeur du Limousin, dans le Massif Central, le nom même du plateau de Millevaches -c'est-à-dire des mille sources- est significatif. La continuité d'écoulement d'un réseau de rivières très dense, dans ces régions, n'est pas due seulement à la grande fréquence des pluies. Les terrains anciens, surtout les granites et roches similaires, ont en effet souvent une capacité non négligeable, par leur zone altérée qui peut être épaisse de plusieurs dizaines de mètres ; aussi contribuent-ils efficacement à régulariser l'écoulement des cours d'eau (rarement moins de 3 à 5 l/s par km² en étiage). Les sources y ont de faibles débits mais sont nombreuses et assez régulières. De plus, tous ces terrains sont fissurés et fracturés à des degrés divers et l'eau peut y circuler jusqu'à plusieurs centaines de mètres de profondeur et sur des distances très variées, parfois assez grandes (ainsi s'explique l'origine de certaines sources minérales). Néanmoins une multitude de micro-systèmes aquifères élémentaires aux limites floues et parfois instables, selon les connexions des systèmes fissuraux, est le caractère essentiel de ces domaines, ainsi que l'importance des composantes verticale des circulations souterraines assez généralement tridimensionnelles.

Les terrains volcaniques d'Auvergne, où s'entremêlent des roches très poreuses et des laves inégalement fissurées, forment des aquifères complexes, auxquels leur situation de château d'eau assurent une alimentation abondante (pluie et neige) : 400 mm/an dans la chaîne des Puys dont l'aquifère débite en moyenne 3,5 m³/s.

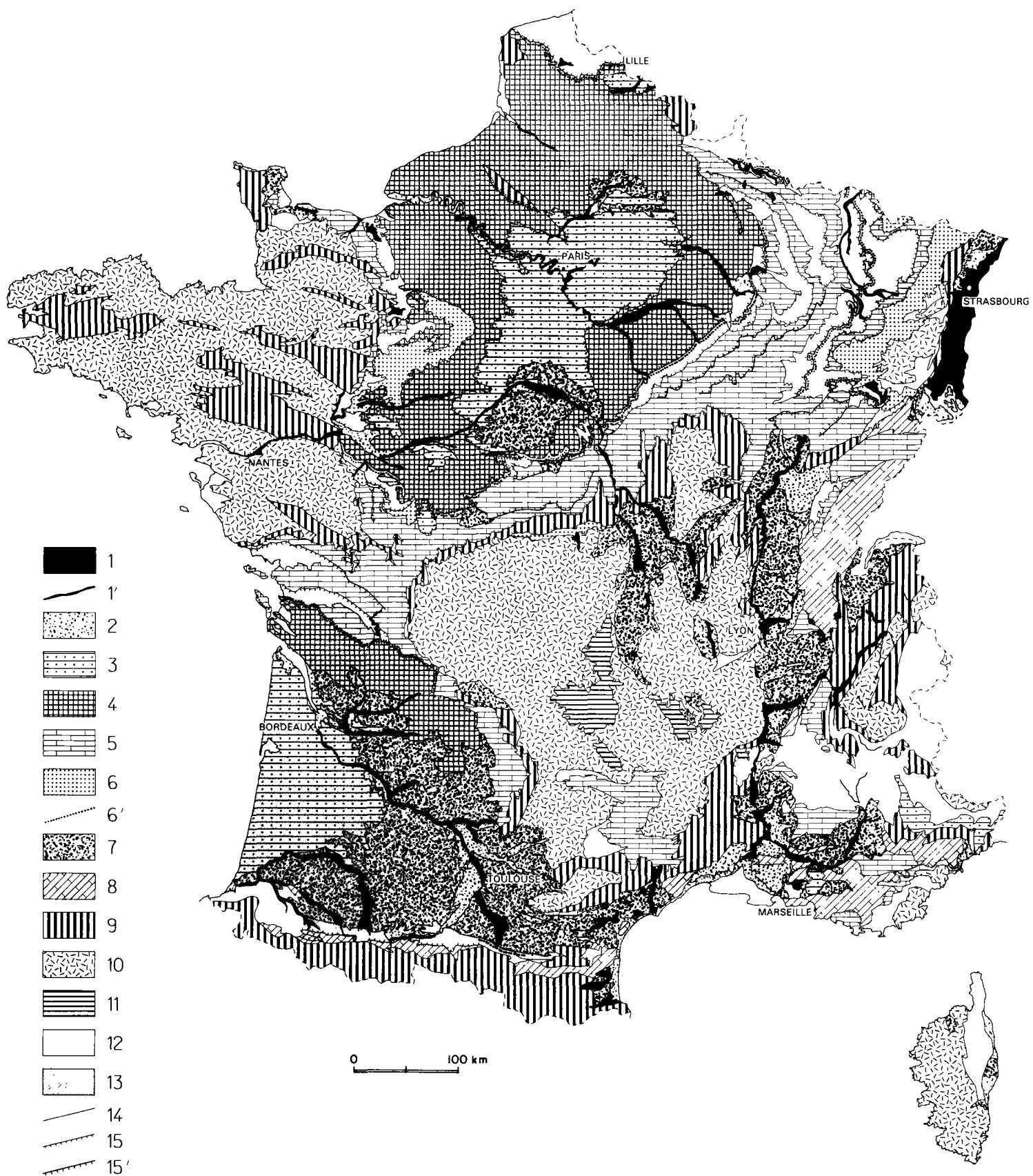
b - Les montagnes alpines

Du fait de leur constitution, par des blocs juxtaposés ou superposés de roches variées, disloquées et fracturées en profondeur, les Alpes et Préalpes comme les Pyrénées ne comportent que des aquifères d'étendue moyenne et compartimentés, mais assez nombreux : il s'agit surtout de massifs calcaires karstiques, qui forment souvent les reliefs dominants : Chablais, Bauges, Chartreuse, Vercors, et Dévoluy dans les Préalpes : massifs d'Arbailles, de la Pierre-St-Martin, des Comminges et du Pays-de-Sault dans les Pyrénées.

CARTE HYDROGEOLOGIQUE STRUCTURALE A 1/5 000 000

Légende

- 1 - Principaux aquifères alluviaux reliés à des cours d'eau (réalimentation induite possible).
- 1' - Symbole d'aquifère de largeur < 2 km.
- 2 - Aquifères graveleux (autres que 1) à nappe libre ; déjections, terrasses étagées ; parfois à nappe captive sous couverture locale semi-perméable (Quaternaire, Pliocène).
- 3 - Aquifères multicouches : sables, calcaires, argiles en alternance, à nappe libre en surface et plusieurs nappes en général captives en profondeur, que l'aquifère supérieur contribue à alimenter (séries tertiaires principalement).
- 4 à 6 : Aires d'affleurement d'aquifères sédimentaires étendus, pouvant se prolonger sous recouvrement au-delà de la limite 15 (à des distances variées et en ne conservant pas toujours les mêmes caractéristiques).
- 4 - Aquifères carbonatés poreux et microfissurés (craie, principalement) monocouches à nappe libre (Crétacé).
- 5 - Aquifères carbonatés discontinus fissurés et plus ou moins karstiques (calcaires, dolomies) en structure tabulaire (plateaux) ; surface libre profonde (Crétacé, Jurassique, Trias).
- 6 - Aquifères siliceux ou détritiques poreux et/ou fissurés (sables, grès, conglomérats) en structure tabulaire ; monocouches à surface libre (Crétacé, Trias).
- 6' - Symbole des zones d'affleurement de faible largeur.
- 7 - Formations semi-perméables capacitives (sables argileux, mollasses, marnes) pouvant être drainées par des aquifères alluviaux emboîtés (types 1 ou 2) ou par des aquifères profonds captifs (couverture de système multicouche) (Tertiaire principalement, Permo-Trias).
- 8 - Aquifères carbonatés discontinus et compartimentés plus ou moins karstiques, en structures plissées et fracturées, en partie couverts, dans les chaînes alpines (Crétacé, Jurassique principalement).
- 9 - Domaine composite, à structure plissée et/ou fracturée, ou disséqué par l'érosion, où s'entremêlent des aquifères locaux carbonatés ou détritiques, libres ou captifs, et des formations peu ou non aquifères, non dissociables à petite échelle (notamment : bassins sédimentaires anté-hercyniens, chaînes alpines, formations du Lias).
- 10 - Aquifères discontinus des roches cristallines intrusives et métamorphiques fracturées (à couverture locale d'altérites aquifères à nappe libre, dans les massifs anciens).
- 11 - Aquifères hétérogènes, poreux ou fissurés, des roches volcaniques récentes ; surface libre.
- 12 - (sans figuré). Domaine soit sans aquifère libre (terrains argileux, marneux dominants) mais à aquifère(s) profond(s) possible(s) -cf 13- (en bassins sédimentaires), soit sans aucun aquifère étendu, à aquifères très localisés possibles (terrains schisteux compacts, pélites, flysch argileux, en massifs hercyniens ou chaînes alpines).
- 13 - Domaine comportant un ou plusieurs aquifères profonds (à eau douce), soit sous des domaines à aquifère libre (types 1 à 6) ou à formations semi-perméables (type 7) en surface, soit sous des domaines sans aquifère libre (type 12), dans les bassins sédimentaires.
- 14 - Limite d'aquifère au contact de son substratum. Ligne de déversement possible (lieu de sources) ou limite étanche.
- 15 - Limite d'aquifère affleurant prolongé (du côté des "dents") sous une couverture. Ligne de débordement possible (lieu de sources).
- 15' - Symbole de zone d'affleurement de couche non aquifère (cf. 12) de faible largeur, cloison entre aquifères.



Fi. 5 - Carte hydrogéologique structurale de la France

C'est dans ces massifs calcaires, à surface criblée d'avens où les eaux s'engloutissent, qu'on a découvert les réseaux de conduits karstiques les plus remarquables : la Vernaison souterraine (20 km) et le gouffre Berger, le plus profond du monde (1 122 m reconnu en 1956), dans le Vercors ; le trou du Glaz (23 km, profond de 603 m) dans la Chartreuse ; le gouffre de la Pierre-St-Martin (profond de 1 110 m) dans les Pyrénées. Grâce à leur altitude, ces aquifères bénéficient d'une forte alimentation (300 à 1 000 mm/an), due en bonne part à la fonte des neiges, plus régulière que les pluies infiltrées. Les débits d'automne des sources et des rivières collectrices en sont plus soutenus qu'en plaine. Les réserves d'eau permanentes contenues dans les zones noyées de ces massifs, difficiles à apprécier, ne sont probablement pas énormes et certainement moindres que celles des aquifères karstiques de plus basse altitude.

Outre ces réservoirs calcaires, les terrains de couverture déposés par les glaciers et les torrents (moraines, cônes de déjection, terrasses) jouent un rôle appréciable comme régulateurs d'écoulement, car ce sont de meilleurs accumulateurs et ils forment des aquifères locaux peu étendus mais nombreux.

Le Jura est un vaste aquifère que l'on ne peut découper qu'en un petit nombre de bassins d'écoulement souterrain indépendants. Tant dans sa partie plissée montagneuse que dans ses hauts plateaux, c'est le domaine classique où la circulation des eaux souterraines s'affranchit des limites des bassins versants superficiels : pertes de rivières et résurgences y abondent et de véritables bassins fermés en surface s'y développent. La liaison souterraine la plus célèbre est celle qui relie les pertes du haut Doubs à la source de la Loue (10 à 15 km), démontrée la première fois par le transport d'absinthe lâchée lors de l'incendie de la manufacture Pernod à Pontarlier le 11 août 1901. C'est donc le sous-sol qui reçoit et collecte l'essentiel des abondants apports d'eau régionaux (de 350 à presque 1 500 mm/an, avant de les restituer en aval au Doubs, à la Loue et à l'Ain principalement : environ 250 m³/s = 8 milliards de m³/an en moyenne.

c - Les plateaux calcaires et gréseux

En bordure des massifs anciens ou des chaînes de montagnes que l'on vient de décrire, de vastes plateaux calcaires (du Jurassique ou du Crétacé inférieur) plus ou moins **karstiques**, ou parfois gréseux (du Trias surtout), forment une auréole de réservoirs aquifères étendus à la périphérie des grands bassins sédimentaires : de la Lorraine à la Bourgogne, au Berry et au Poitou ; du Quercy aux Causses du sud du Massif Central, aux garrigues du Languedoc et à la haute Provence (plateaux de Vaucluse et du Verdon). Dans les calcaires les surfaces libres des zones noyées sont souvent profondes : plus de 100 m, parfois jusqu'à 200 ou 300 m.

Encore bien alimentés (150 à 600 mm/an) et de grande capacité (en Lorraine, par exemple : réservoir calcaire des Côtes de Meuse : 8 milliards de m³ ; réservoir calcaire des Côtes de Moselle : 50 milliards ; réservoir des grès du Trias inférieur -partie libre- : environ 100 milliards) ces aquifères sont de bons régulateurs et ils contribuent pour une part essentielle à nourrir les cours d'eau des bassins de la Seine, de la Loire, de la Saône, de la Durance, de la Charente, de la Dordogne et de la Garonne (rive droite).

Les circulations souterraines, souvent de type karstique -surtout dans la moitié sud de la France- prédominent beaucoup sur les cours d'eau de surface à réseau très lâche, parfois quasi-inexistant, et elles peuvent les court-circuiter : on sait que le Serein perd de l'eau au profit de la Cure, dans le bassin de l'Yonne, que les pertes totales du Bandiat et de la Tardoire (affluents de la Charente) sont récupérées par la source de la Touvre près d'Angoulême, que celles de la Nesque vont à la Fontaine du Vaucluse ... Les exemples de ces "captures souterraines" abondent. C'est dans ces aquifères karstiques que les plus longues distances de circulation ont été reconnues par traçage : le record est celui réalisé en 1968 dans l'aquifère de Vaucluse entre l'aven de la Belette et la Fontaine de Vaucluse, 46 km (en ligne droite) parcourus en 25 jours.

Quelques uns de ces aquifères, d'étendue moyenne, se trouvent en bordure de la Méditerranée (massif des calanques à l'Est de Marseille principalement). Ils débitent directement dans la mer environ 6 m³/s en moyenne, par des sources littorales ou sous-marines dont l'eau est plus ou moins saumâtre, car leur courant entraîne une partie de l'eau de mer qui envahit ces réservoirs en profondeur, et la mélange aux eaux douces. Mais dans leur grande majorité les aquifères karstiques du territoire français se vident par des sources continentales, collectées par des cours d'eau. Ces sources débitent abondamment -beaucoup dépassent 1 m³/s en étiage et une dizaine de m³/s en crue- mais irrégulièrement, surtout dans le midi ; elles comptent les plus importantes de France : Fontaine de Vaucluse (débit moyen : 25 m³/s ; jusqu'à 150 m³/s en crue ; minimum séculaire : 4 m³/s), Touvre de Charente, Fontaine-Lévêque du Verdon, etc..

d - Les bassins sédimentaires

La superposition de couches à perméabilités très différentes, donc en alternance d'aquifères, d'aquicludes et d'"aquitards", et les structures en cuvette qui les font affleurer en auréoles successives (bassin de Paris surtout, bordures nord et nord-est du bassin d'Aquitaine, bordure ouest du bassin sub-alpin) rendent ces bassins riches en réservoirs aquifères étendus : tant en aquifères libres directement alimentés qu'en aquifères captifs profonds qui prolongent les précédents et sont plus ou moins intercommunicants. D'après leur structure et les régimes d'écoulement des eaux souterraines, on distinguera dans ces bassins trois types d'aquifères :

d.1 - De grands aquifères monocouches à nappe libre, formés de roches surtout carbonatées (craie, calcaires jurassiques, crétacés ou tertiaires) mais aussi siliceuses (sables et grès crétacés ou tertiaires). Moyennement alimentés (150 à 300 mm/an), ils contribuent de manière appréciable à entretenir le débit des cours d'eau qui les drainent et qui les fractionnent en systèmes aquifères à peu près indépendants et d'étendues variées (de plusieurs centaines à plusieurs milliers de km²). Les nappes les plus importantes sont celles des aquifères de la craie, dans le Nord de la France et une grande partie du Bassin de Paris (Normandie, Picardie, Champagne, Sénonais), la nappe de la Beauce (7 000 km² avec un débit moyen global de l'ordre de 600 millions de m³/an et une capacité estimée à 20 milliards de m³), la nappe des sables des Landes (13 000 km², 14 milliards de m³/an d'apports moyens), principale nourricière du système multicouche d'Aquitaine occidentale qu'elle surmonte, mais mal exploitable directement du fait de productivités médiocres.

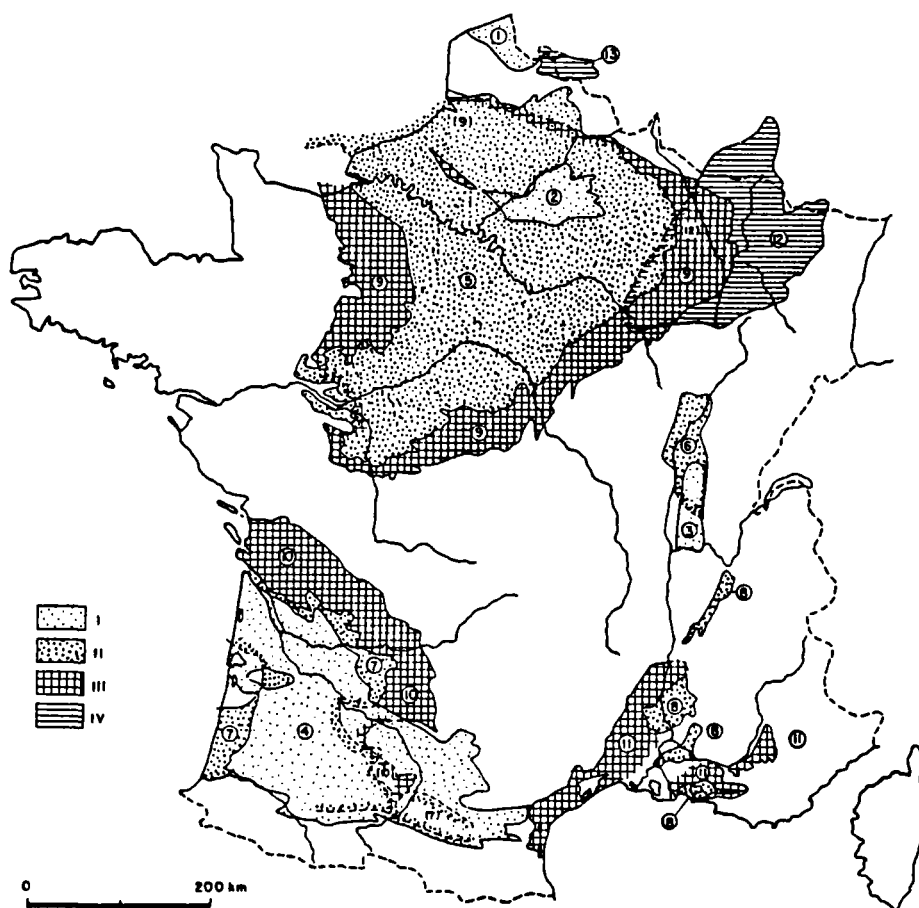


Fig. 6 - Principaux aquifères à nappe captive du territoire français

Niveaux superposés de haut en bas :

- I. Tertiaire. 1. Sables landéniens des Flandres. 2. Sables de Bracheux et craie du Soissonnais. 3. Sables miocènes de Bresse. 4. Sables inférieurs éocènes d'Aquitaine.
- II. Crétacé. 5. Sables verts du bassin de Paris et sables cénomaniens de Touraine. 6. Sables albiens de Bourgogne. 7. Sables cénomaniens et calcaires crétacés d'Aquitaine. 8. Calcaires crétacés du couloir rhodanien et de Provence.
- III. Jurassique. 9. Calcaires du Jurassique supérieur et moyen du Bassin de Paris. 10. Calcaires du Jurassique supérieur et moyen du Poitou et du Bassin d'Aquitaine. 11. Calcaires jurassiques du Languedoc et de Provence (bassin d'Aix, Valensole).
- IV. Trias et Primaire 12. Grès du Trias inférieur ("Grès Vosgiens") de Lorraine. 13. Calcaire carbonifère du Nord.

d.2 - Des aquifères multicouches complexes constitués surtout par des sédiments tertiaires très variés et hétérogènes (couches alternantes de sables, de calcaires et d'argiles superposées et juxtaposées, souvent biseautées) forment les régions centrales des bassins de Paris et d'Aquitaine -Ile-de-France (nappe du Soissonnais) et Bordelais- et quelques autres régions moins étendues (bassin d'Orchies, dans le Nord ; bassin d'Aix-en-Provence). Ces systèmes aquifères comportent une nappe libre supérieure, alimentée par l'infiltration des pluies, et en profondeur plusieurs nappes captives qui communiquent toutes entre elles, plus ou moins facilement, selon les différences de potentiel qui se créent : certaines ont localement un potentiel au-dessus du sol. Par exemple, la nappe des sables et

calcaires éocènes d'Aquitaine occidentale, prolongée par la nappe "infra-molassique" dans le centre du bassin d'Aquitaine, principal aquifère (50 000 km²) du système multicouche de ce bassin -et le plus exploité- reçoit plus de la moitié de son alimentation et débite plus du tiers de ses émissions par échanges avec des aquifères contigus, sur un flux global de 130 millions de m³/an (selon les résultats d'un modèle de simulation numérique, reconstituant un état supposé en équilibre en 1965, réalisé par l'Ecole des Mines de Paris en 1974), cf. tableau 7.

- d.3 - De grands aquifères captifs profonds (plusieurs centaines de mètres, jusqu'à un millier), principalement sableux ou gréseux (triasique, jurassique, crétacé) ou parfois carbonaté (Calcaire carbonifère du Nord) -fig. 6-. Leur alimentation et leur flux global sont faibles mais leur capacité est énorme : elle peut se chiffrer en centaine de milliards de m³, toutefois ces "réserves" théoriques sont très faiblement mobilisables tant que la nappe reste captive. Leur renouvellement très lent entretient néanmoins la présence d'eau douce dans une grande partie des réservoirs, mais ceux-ci contiennent aussi des eaux saumâtres ou salées. A potentiels initiaux au-dessus du sol en d'assez larges zones, ce sont les réservoirs des "nappes artésiennes" classiques reconnues dès le 19^e siècle : nappe des sables verts (Albien) du Centre du bassin de Paris, nappe des grès du Trias inférieur de Lorraine, nappe du calcaire carbonifère de la région de Lille... Plus en profondeur d'autres aquifères ne contiennent plus que des eaux saumâtres ou salées, mais intéressent maintenant la géothermie (calcaires du Jurassique moyen dans le bassin de Paris, en particulier).

e - Les fossés d'effondrement

Le fossé rhénan, le couloir de la Saône et le fossé de la Bresse, les Limagnes du Massif Central, le Genevois entre Alpes et Jura, le bas Dauphiné entre Alpes et Massif Central, ont en réduction des structures profondes similaires à celles des bassins, avec la même alternance de couches aquifères à nappe captive ou semi-perméables, mais les premières affleurent peu ou pas du tout aux bordures, étant limitées surtout par des accidents, et sont donc peu alimentées (et leurs eaux sont déjà salées souvent à moyenne profondeur), tandis que les secondes -molasses sablo-argileuses inégalement aquifères- prédominent en surface. Font exception : le puissant ensemble molassique du bas-Dauphiné, au Sud de Lyon (jusqu'à 600 m, d'où des transmissivités fortes et une grande capacité estimée à plus de 100 milliards de m³), et surtout le fossé rhénan tapissé d'une épaisse couche (pouvant dépasser 200 m) d'alluvions très perméables et productifs, abondamment alimentée -surtout par les infiltrations des cours d'eau issus des Vosges, flux moyen global estimé à 1 milliard de m³/an-, de grande capacité -réserve de l'ordre de 35 milliards de m³- et aux niveaux soutenus par le Rhin à la limite est, qui dote la plaine d'Alsace d'une riche ressource en eau souterraine.

f - Les aquifères alluviaux

Les sables et graviers qui tapissent le fond des vallées forment tout un réseau de couloirs aquifères plus ou moins continus qui double celui des fleuves et rivières avec lesquels les nappes sont pour la plupart en étroite liaison, à part quelques aquifères alluviaux étendus analogues à ceux des couches sédimentaires décrites ci-dessus (d.1) comme ceux d'une partie de la plaine d'Alsace déjà citée, de la vallée du Rhône, ou de la plaine de Crau, en Provence. Les plus importants sont ceux des vallées des grands fleuves : Seine, Meuse et Moselle, Rhin. Loire et Allier, Saône, Rhône, Durance, Var. L'étagement des terrasses dans certaines vallées isole par contre les aquifères alluviaux des cours d'eau (Garonne). A nappe libre dans la plupart des cas, ces aquifères sont parfois captifs sous des couvertures limoneuses et argileuses, souvent dans les basses vallées non loin des embouchures.

Hautement ou moyennement transmissifs (les alluvions fluvio-glaciaires des vallées intérieures des chaînes alpines ou des zones de piémont étant les plus perméables et productifs) -cf. tableau 5- ces aquifères ont par contre de faibles capacités -sauf celui de la plaine d'Alsace-, en raison de leur faible épaisseur (Crau, par exemple : 3.10^5 m³.km²). En général plus perméables que les terrains dans lesquels ils sont encaissés, même lorsqu'il s'agit d'aquifères (craie, sable, etc.), les alluvions font souvent office de drain intermédiaire entre les nappes des plateaux et les cours d'eau. Ce rôle de drain est également actif lorsqu'ils sont emboîtés dans des formations peu perméables -et mal exploitables directement de ce fait- telles que certaines mollasses du bas Dauphiné (plaines des Bièvres) ou d'Aquitaine méridionale (vallées de l'Adour, de l'Ariège). Aussi l'alimentation propre de ces nappes alluviales -par leur seule surface- est-elle souvent accessoire par rapport à ces afflux des côtes et surtout en comparaison de leurs échanges avec les cours d'eau : échanges naturels -notamment en crue- ou provoqués par l'exploitation lorsqu'elle fait baisser les niveaux de la nappe au-dessous de ceux des eaux de surface, ce qui arrive souvent localement.

Presque tous les aquifères assez étendus pour participer de manière significative au régime naturel des écoulements naturels totaux et/ou pour jouer un rôle dans les économies de l'eau régionales ont été identifiés et étudiés. Environ deux cents systèmes aquifères bien délimités d'importance régionale, à superficie supérieure à 100 km², ont été inventoriés en France :

- 175 aquifères à nappe libre, simples ou multicouches, souvent limités par les cours d'eau majeurs qui les traversent, dont :
 - . 15 grands aquifères alluviaux,
 - . 40 aquifères karstiques,
 - . 20 aquifères multicouches (au moins en partie),
- 25 aquifères profonds à nappe captive reliés pour la plupart à l'un des précédents (cf. fig. 6).

La plupart sont entièrement compris dans l'un ou l'autre des grands bassins fluviaux dont ils forment les réservoirs régulateurs naturels. Le mieux doté est le bassin de la Seine, avec 40 aquifères libres régionaux qui couvrent sa plus grande partie ; le moins bien pourvu est le bassin de la Garonne (une vingtaine, d'extensions moyennes). Quelques aquifères se trouvent partagés entre deux grands bassins (Beauce entre Seine et Loire, aquifère gréseux des Vosges entre Moselle et Saône, Causse du Larzac entre Garonne et Hérault) ou entre des bassins côtiers adjacents (aquifères de la Craie d'Artois et de Picardie, ...). A l'échelle du pays les lignes de partage des eaux superficielles et souterraines diffèrent peu. Dans les régions formées de calcaires karstiques, la prédominance des circulations souterraines peut cependant entraîner des écarts notables, en particulier dans les seuils entre bassins sédimentaires (Bourgogne, Poitou, Grands Causses du Sud du Massif Central).

Caractéristiques des formations aquifères

Les différentes formations géologiques, sédimentaires pour l'essentiel, qui composent les systèmes aquifères passés en revue ont des caractéristiques tant géométriques (épaisseurs) que "pétrophysiques" (paramètres d'emménagement et de conductivité) très variées. Elles sont en outre très inégalement homogènes et continues. Le tableau 5 récapitule pour les formations aquifères les plus répandues en France classées par types lithologiques, leurs caractéristiques dominantes, l'état de leur connaissance résultant de nombreuses études et d'opérations de modélisation. Les gammes de paramètres propres à chaque formation sont très larges dans la plupart des cas : porosités et perméabilités varient beaucoup suivant les faciès locaux (alluvions, sables plus ou moins argileux) ou les degrés de fissuration et leur distribution verticale (roches carbonatées, roches éruptives). La craie par exemple est bien plus fissurée, donc transmissive, dans les vallées que sous les plateaux, et cent à mille fois moins en profondeur, sous couverture.

Les **productivités** des ouvrages de captage permises par les transmissivités locales sont donc elles aussi très diverses et dispersées : le tableau 6 indique la répartition des formations aquifères les plus courantes suivant une gamme de productivités, tandis que la carte de la figure 7 esquisse leur distribution relative aux premiers aquifères accessibles (nappes libres en général).

Hydrologie des eaux souterraines. Alimentation et budgets en eau des aquifères

Bien que des chroniques de niveaux piézométriques soient inégalement disponibles, en durée d'observations et en nombre, selon les régions, on connaît à peu près les traits essentiels des **régimes de variation des niveaux** des nappes libres des principaux aquifères continus -et plus rarement des aquifères karstiques, variation qui traduit les rôles régulateurs des flux écoulés par ces aquifères alimentés irrégulièrement et dont les différences inter-annuelles reflètent assez bien celles des précipitations "efficaces". Les plus fortes amplitudes de ces variations peuvent atteindre une ou plusieurs dizaines de mètres au centre des aquifères les plus étendus et "compacts" -peu disséqués par des cours d'eau collecteurs- tels que les aquifères de la craie, de la Beauce, de plateaux calcaires jurassiques, ..., où les amplitudes pluri-annuelles peuvent dépasser sensiblement les amplitudes saisonnières et annuelles. Les variations restent d'ordre métrique (un à plusieurs mètres) dans les aquifères moins étendus dont aucun secteur n'est très distant de limites à condition de potentiel.

Tableau 5 - Caractéristiques des principales formations aquifères du territoire français.

Formation aquifère	Position stratigraphique	Situation	Type de conductivité P milieu poreux F milieu fissuré M milieu mixte	Porosité (S en nappe libre)	Epaisseur m	Transmissivité m ² /s
Alluvions graveleuses	Quaternaire Plio-quaternaire	Vallées fluviales, terrasses Plaine d'Alsace Plaine du Roussillon	P	0,03 - 0,2 0,05 - 0,15 0,01 - 0,2	5 - 40 10 - 250 10 - 150	10 ⁻³ - 5.10 ⁻¹ 1 à 5.10 ⁻¹ 5.10 ⁻⁴ - 3.10 ⁻²
Sables	Quaternaire	Dunes côtières, Landes (Aquitaine occ.)	P	0,05 - 0,1	10 - 150	10 ⁻³ - 2.10 ⁻²
	Pliocène	Languedoc (profondeur)	P	-	10 - 30	10 ⁻⁴ - 10 ⁻³
	Miocène	Bresse (profondeur)	P	-	80	10 ⁻³
"Sables d'Ostricourt"	Eocène	Nord, Flandre (→ Belgique)	P	0,01 - 0,05	15 - 45	10 ⁻⁶ - 2.10 ⁻³
	Cénomanien	SO Bas. de Paris N Bas. d'Aquitaine	P	0,05 - 0,1	30 - 90	10 ⁻⁴ - 10 ⁻²
"Sables verts"	Albien	Bas. de Paris, Bourgogne	P	0,05 - 0,2	30 - 200	10 ⁻⁴ - 4.10 ⁻³
Sables, grès et calcaires mêlés	Oligo-Miocène	Centre Bas. de Paris, S. Ile-de-France, Beauce O. Bas. d'Aquitaine	M	0,01 - 0,15	50 - 130 100 - 120	10 ⁻³ - 10 ⁻¹ 5.10 ⁻⁴ - 2.10 ⁻²
Molasses	Miocène	N. Bas. Sub-Alpin, has Dauphiné	M	0,1 - 0,05	100 - 600	1 à 5.10 ⁻²
"Calcaire grossier"	Eocène	Centre Bas. de Paris, N. Ile-de-France	M	0,1 - 0,005	70 - 120	10 ⁻³ - 10 ⁻²
"Sables du Soissonnais"		Centre et O. Bas. d'Aquitaine	M		50 - 300	10 ⁻³ - 10 ⁻²
Grès						
"Grès du Luxembourg"	Lias	N.E Bas. de Paris, N. Lorraine	M		50 - 100	5.10 ⁻⁴ - 1.10 ⁻³
	Trias sup. (Rhétien)	E. Bas. de Paris, Lorraine	M		10 - 30	5.10 ⁻⁵ - 2.10 ⁻⁴
"Grès vosgien"	Permien, Trias	E. Bas. de Paris, Vosges, Lorraine	M	0,10 - 0,15	50 - 500	5.10 ⁻⁴ - 2.10 ⁻²
Craie	Crétacé sup.	Centre N et O. Bas. de Paris ~ 100 000 km ²	M (+ karst local)	0,001 - 0,05	100 - 500	10 ⁻⁵ - 5.10 ⁻²
Calcaires, dolomies						
"Calc. de Brie, de Champigny, de St Ouen"	Eocène, Oligocène	Centre Bas. de Paris, S et SE Ile-de-France N-O. Bas. d'Aquitaine	F (+ karst local)	0,001 - 0,01	40 - 100	2.10 ⁻⁴ - 10 ⁻¹
	Crétacé sup. et moyen	N Bas. d'Aquitaine, Charentes + profondeur	F + karst	0,01 - 0,02	300 - 350	10 ⁻⁴ - 2.10 ⁻²
	Crétacé inf., "Urgonien"	Bas. sub-alpin, Alpes, Provence	F + karst	0,01	200 - 400	10 ⁻¹ (Vaucluse) 10 ⁻²
	Jurassique sup. et moyen (plusieurs couches)	Bas. de Paris, (périphérie + profondeur), Lorraine, Champagne, Bourgogne, Berry, Poitou, Normandie ; Nord			100 - 800	10 ⁻⁶ - 10 ⁻²
		N et NE Bas. d'Aquitaine, Quercy, Charentes	F, M (dolomies) + karst	0,01	100 - 200	3.10 ⁻⁴ - 4.10 ⁻²
		Jura, Alpes, pré-Alpes, S. Massif central, Causses			600 - 1 500	-
	Lias	S. Bas. de Paris, Poitou	F, M + karst	0,001 - 0,01	5 - 80	10 ⁻⁵ - 5.10 ⁻⁴
	Trias (Muschelkalk)	E. Bas. de Paris, Lorraine, Alpes, Provence	F + karst	0,005 - 0,1	30 - 100	5.10 ⁻⁵ - 5.10 ⁻³
	Dévonien, Carbonifère	Nord, Ardennes, S. Massif central, (Montagne Noire), Pyrénées	F + karst	0,01 - 0,2	30 - 50	5.10 ⁻⁵ à 10 ⁻² 10 ⁻¹ en zones fissurées
Roches volcaniques : laves, projections	Quaternaire	Centre Massif central, Auvergne	P, F	0,01 - 0,1	10 - 200	5.10 ⁻⁵ - 10 ⁻²
Roches cristallines et métamorphiques	Antécambrien, Primaire	Massif armoricain, Massif central, Vosges, Alpes, Pyrénées, Maures, Corse	F	-	zone fissurée : 100 à 200 m	-

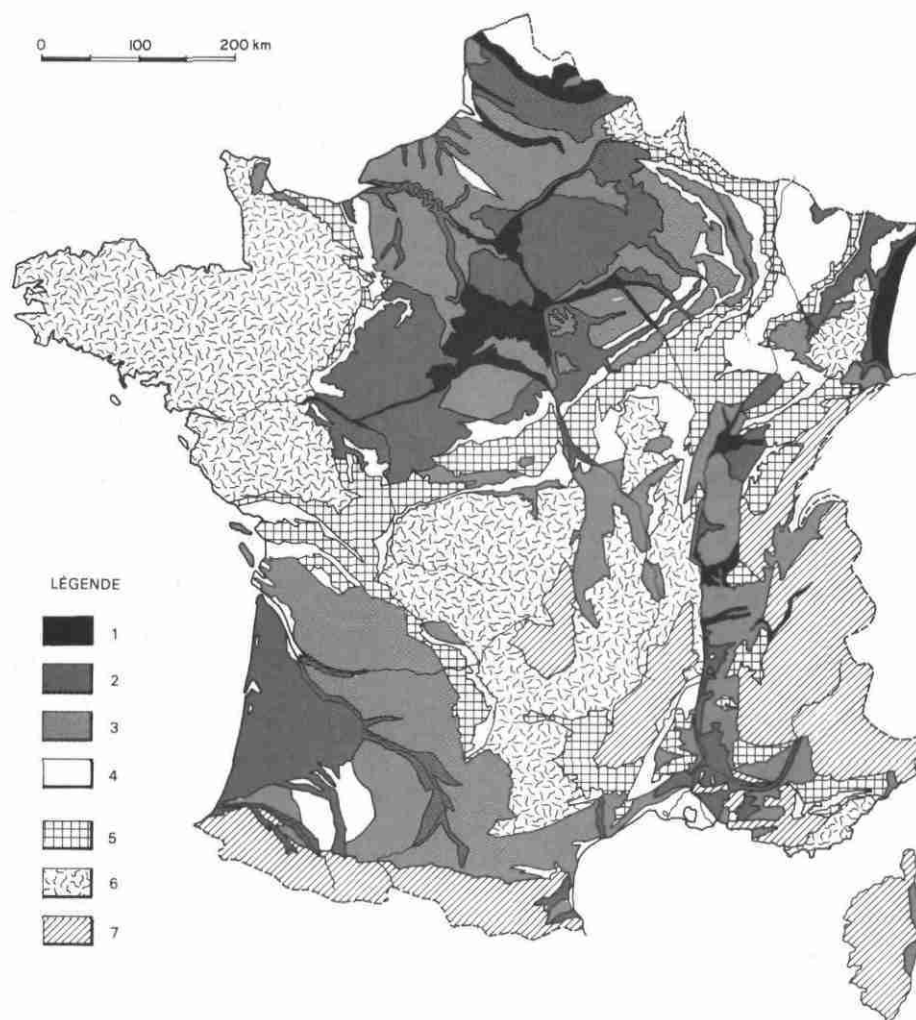


Fig. 7 - Répartition des productivités probables des forages d'exploitation d'eau, relatives à la première nappe accessible, en France.

Zones à productivité probable prévisible (> 50% des forages) : 1 : > 100 m³/h - 2 : 10 à 100 m³/h - 3 : 1 à 10 m³/h - 4 : < 1 m³/h (domaine sans nappe d'eau souterraine accessible à faible profondeur, sauf très localement).

Zone à productivité variée, mal prévisible :

5 : Aquifères calcaires karstiques à productivité très variable et aléatoire (1 à > 100 m³/h) - 6 : Aquifères discontinus de socle cristallin ou schisteux à productivité fréquente de 1 à quelques m³/h, possible mais plus aléatoire jusqu'à 10 ou plusieurs dizaines de m³/h - 7 : Domaine montagneux non classé.

Tableau 6 - Productivités des formations aquifères

Classes de productivité* m ³ /h	Formations aquifères
Forte : ≥ 100 (jusqu'à 1 000 exceptionnellement)	Aquifères alluviaux épais et non argileux de larges vallées, tout particulièrement dans les vallées des domaines montagneux et les piémonts des reliefs (formations fluvio-glaciaires), roches carbonatées (craie, calcaires, dolomies) puissantes, très fissurées et en partie poreuses, couches de sable et grès puissantes (aquifères profonds).
Moyenne : 10 à 100	La plupart des aquifères alluviaux, la plus grande partie des aquifères sédimentaires à nappe libre de puissance moyenne : certaines molasses, sables et calcaires tertiaires, craie et calcaires moyennement fissurés, grès, formations volcaniques.
Faible : 1 à 10	Aquifères alluviaux (notamment dans les vallées de massifs anciens), sables argileux et/ou de faible épaisseur, arènes, molasses, roches carbonatées peu fissurées (notamment en profondeur) et/ou marneuses, schistes altérés, roches cristallines assez fracturées.

* Production d'un puits ou forage complet et correctement construit et équipé.

Tableau 7 - Données sur les budgets en eau de quelques systèmes aquifères en France

Type de formation aquifère	Situation (1) : indice porté fig. 9	Système aquifère	Régime d'écoulement L : libre C : captif	Superficie km ²	Flux global moyen (apports = flux sortant naturel) Mm ³ /an	mm/an	Origine des apports : a : infiltr. précipitations b : infiltr. eau surface c : affluence, drainance + : alimentation induite	Prélèvements Totaux (et date) Mm ³ /an	Notes
Alluvions graveleuses	Alsace (1)	Alluvions quaternaires fossé rhénan	L	2 600	≈ 1 000 (700 à 1 200)	385	a : 200 Mm ³ /an (≈ 20 %) b : 500 à 1 000 (≈ 80 %)	480 (1976)	(1)
	Vallée du Rhône (2)	Alluvions quaternaires, Plaine de Lyon	L	480	Initial : 140 Etat 1975 : 275	290 (573)	1975 : a : 140 Mm ³ /an b + : 135	275 (1975)	(2) (3)
	(3)	Alluvions quaternaires Comtat, Plaine Algues-Sorgues	L	530	165	310	a : 25 % b : 75 % (dont irrigation et canaux : 20 %)	50 (1975)	
	Provence (4)	Alluvions quaternaires, Plaine de Crau	L	520	200	385	a : 19 % b : (irrigation) : 69 % c : 12 %	35 (1975)	(3)
	Rousillon (5)	Alluvions plio-quaternaires multicouche	L et C	800	± 58 (dont Pliocène captif : 18)	72	a : 96 % b : 4 % (Pliocène : c = 50 %)	40 (1975)	(3)
Sables	Aquitaine (6)	Sables des Landes plio-quaternaires	L	13 000	1 400	110	a : ≈ 100 %	60 (1975)	(3)
	Ile-de-France (Paris) (7)	Sables du Soissonnais + Calcaire grossier (Eocène, multi-couche)	C	700	95	135	c : pour l'essentiel (dont afflux de la Seine)	190 (1976)	
	Aquitaine (8)	Sables inf. éocènes et aquifère "infra-mollassique"	C	50 000	Etat 1965 : 130 (avec c +)	≈ 3	c + : 100 % (dont : drainance 70 Mm ³ /an)	36 (1965) 55 (1975)	(3)
	S-O Bassin de Paris, Touraine, Anjou (9)	Sables cenomaniens	C	25 000				21 (1976)	
	Bassin de Paris (10)	Sables verts albiens	C	≈ 75 000	≈ 25	0,3	c : 100 %	34 (1936) 16 (1977)	(3) (4)
Grès	E Bassin de Paris, Lorraine (11)	Grès du Trias inférieur	C	20 000	≈ 50	≈ 2,5	c (- nappe libre) ≈ 100 %	164 (1978)	(5)
Roches carbonatées craie calcaires dolomies	Bassin de Paris Ile-de-France Orléanais (12)	Calcaire de Beauce (Oligocène)	L (C local.)	6 000	465	78	a : ≈ 100 %	112 (1976)	(3)
	Ile-de-France Brie (13)	Calcaire de Champigny	C	3 500	630	180	b + c 100 % (pertes eaux superf.)	65 (1976)	
	Flandre (14)	Craie, région Lys-Dunkerque	L	630	100	160	a + alimentation artificielle	44 (1975)	
	(15)	Craie, région Deule-Scarpe	L	1 105 (aire alim. ≈ 306)	96	87	a : 50 % b + : 12 % (pertes canaux) C + : 38 % (drainance)	93 (1975)	(3) (6)
	Picardie (16)	Craie, bassin de la Somme	L	5 670	1 030	182	a : ≈ 100 %	90 (1973)	(7)
	Provence (17)	Calcaire, cretaces Plateau de Vaucluse Karst	L	1 230	600	488	a et b : ≈ 100 %	ε	(8)
	E Bassin de Paris Lorraine (18)	Calcaires jurassiques Côtes de Meuse	L	1 500	≈ 300	200	a : 100 %	12 (1976)	
	(19)	Calcaires jurassiques Côtes de Moselle	L	3 300	≈ 600	180	a : 100 %	240 (1975) dont exhaure des mines	
	Jura (20)	Calcaires, bassins du Doubs et de la Loue (Jurassique) -karst-	L	6 350	4 200	660	a : 100 %	ε	(7)
	S Massif central Grands Causses entre Lot/Hérault (21)	Calcaires jurassiques Karst	L	4 500	≈ 2 000	≈ 445	a + b : 100 %	ε	
	Flandre + BELGIQUE p.p. (22)	Calcaires carbonifères	L et C	1 582	Initial : 88 1973 : 125	56	Etat initial : a : 90 % c : 10 % 1973 : c + 30 Mm ³ /an c : 29 %	90 (1973) 77 (1977) (dont 30 en F)	(3) (9)
Roches volcaniques (23)	Massif central Auvergne	Projections volcaniques Chaîne des Puys	L	260	110	425	a : 100 %	40	

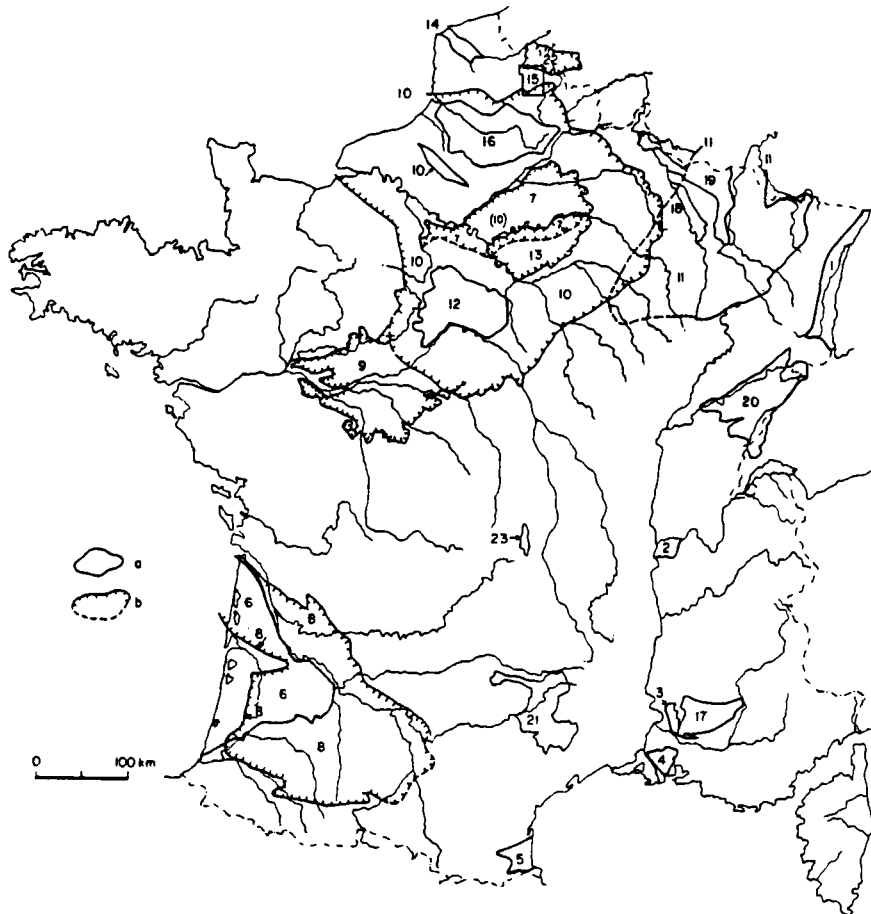


Fig 8 : Situation des systèmes aquifères auxquels se réfèrent les données du tableau 7 (les indices renvoient à la colonne 2 du tableau).
(a) Nappes principalement libres. (b) Nappes profondes captives.

Notes du tableau 7

- (1) - Apports calculés d'après les données climatiques et hydrologiques
- (2) - Suralimentation à partir du Rhône, induite par les captages
- (3) - Equilibre des flux contrôlés par modèle de simulation numérique
- (4) - Etat actuel en quasi équilibre
- (5) - Diminution de réserve : environ 100 Mm³/an actuellement
Déstockage global de 1900 à 1975 : 3 à 4.10⁹ m³
- (6) - Etat influencé en équilibre, en 1970
- (7) - Flux estimé d'après l'écoulement souterrain des cours d'eau drainants
- (8) - Flux moyen connu par mesure du débit à l'exutoire unique
Fontaine de Vaucluse, pendant 1 siècle
- (9) - Etat en déséquilibre en 1973, diminution de réserve : 4,7 Mm³/an
Etat actuel quasi en équilibre.

Aux régimes réguliers et annuels des nappes souterraines très "soutenues" à leurs limites -comme celle d'Alsace- ou influencées par l'irrigation- plaines alluviales de Provence ou du Languedoc-. font contraste les régimes irréguliers et pluri-annuels de la plupart des nappes libres à alimentation pluviale, de faible ou moyenne capacité et débitées par des sources à flux eux-mêmes différemment variables.

- Les apports d'origine météorique, concentrés en France sur 2 à 4 mois -hiver et début du printemps- varient beaucoup selon les années :
 - . apport annuel probable inférieur à la moitié de l'apport d'année médiane (fréquence 0.5) 1 an sur 3 à 5 ;
 - . apport quasi-nul probable 1 an sur 10 (et 1 an sur 5 en région méditerranéenne) ;
 - . apport des années humides de fréquence 0.25 de l'ordre du double de celui des années sèches de même fréquence ;
 - . coefficients de variation (rapports de l'écart-type à la moyenne) des apports annuels : 50 à 100 %.
- Les débits des sources d'aquifères poreux sont assez réguliers. mais ceux d'exutoires d'aquifères carbonatés fissurés et plus encore d'aquifères karstiques varient beaucoup dans l'année et selon les années : dans le rapport de 1 à 100, parfois de 1 à 1 000 pour des sources "vaclusiennes", exurgences ou résurgences de véritables rivières souterraines.

Pour concourir à l'évaluation et à la gestion des eaux souterraines en France les **budgets en eau** d'une centaine de systèmes aquifères de types variés -à nappe libre ou captive- et en divers états -naturels ou influencés par l'exploitation, en équilibre actuel ou non- ont été établis par divers chercheurs et organismes d'études. Le tableau 7 présente des données numériques relatives à une sélection d'aquifères situés figure 8. importants par leur extension ou leur utilisation et représentatifs des différentes conditions d'établissement de budgets : superficie, flux global moyen d'apport (équivalent en état naturel au flux sortant moyen) et expression en hauteur d'eau équivalente (mm/an) pour faciliter les comparaisons, proportions des apports selon leur origine, prélèvements (données extraites, pour la plupart, des sources citées dans la liste de références). L'analyse de la gamme complète des budgets dressés conduit aux constatations suivantes :

- les flux d'apport moyen unitaire aux nappes libres varient entre 50 et plus de 1 000 mm/an, les plus élevés correspondant à des aquifères karstiques de montagne (Alpes, Jura). Les alimentations de nappes captives, essentiellement par drainance, sont en comparaison minimales : de quelques dizaines à moins d'1 mm/an (du fait aussi de leur grande étendue) et, en valeur absolue, en général inférieures à 100 Mm³/an en état naturel.
- les répartitions des flux tant par origine des apports (infiltration des précipitations d'eau de surface ou d'irrigation ; affluences latérales ou drainance), que par mode de débit (émergence ou drainage par des cours d'eau ; effluences latérales ou drainance ; prélèvements) sont très diverses. L'alimentation par les précipitations prédomine normalement pour les nappes libres. mais peut être minoritaire (exemple : nappe de Crau). Les nappes captives sont alimentées et débitées essentiellement par drainance en état naturel.

- des déstockages (diminutions de réserve) appréciables doivent et peuvent être pris en compte dans certains cas (états de déséquilibre), leur ordre de grandeur pouvant dépasser celui des apports naturels (exemple : grès du Trias de Lorraine).

Un essai de généralisation des estimations de flux moyens d'alimentation, basé sur des données climatiques et géologiques, a été par ailleurs réalisé et exprimé par une cartographie que schématise la figure 9.

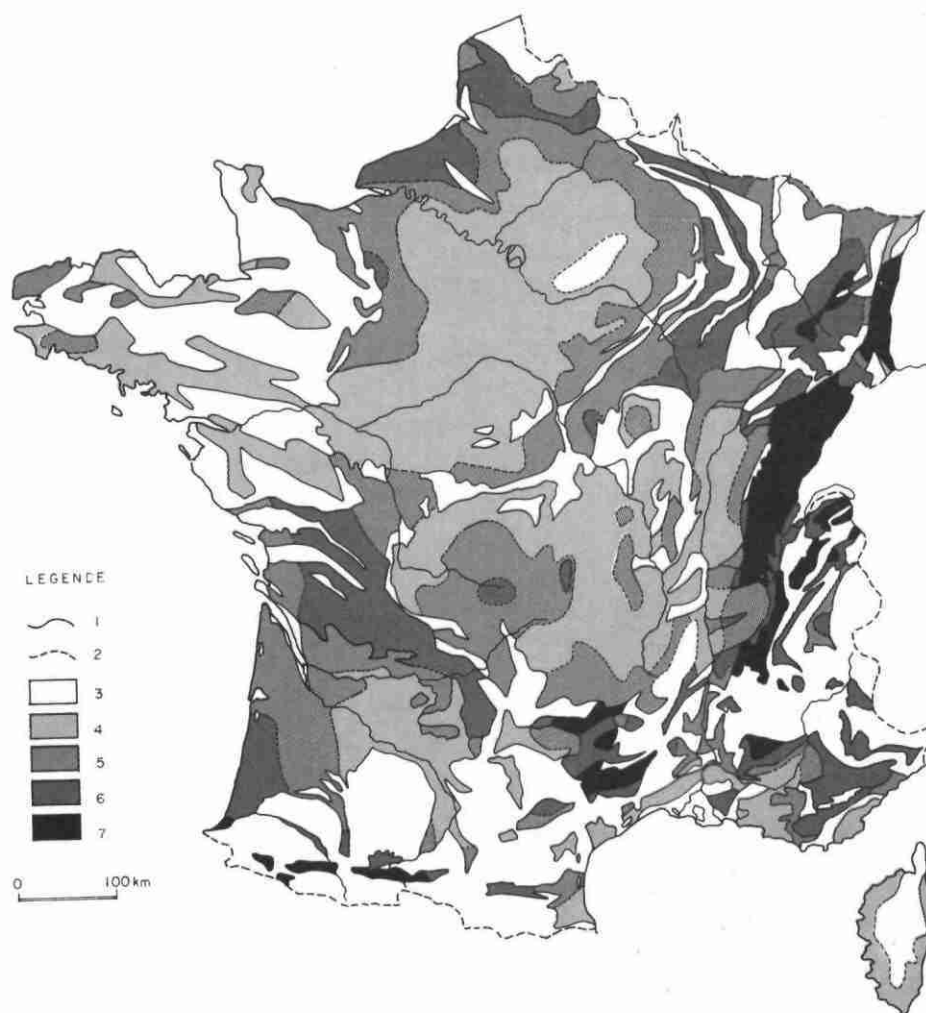


Fig 9 : Alimentation moyenne annuelle des aquifères à nappe libre.

1 : limite géologique. 2 : limite climatique. 3 : domaine sans aquifère libre significatif 4 : < 100 mm/an. 5 : 100 à 200 mm/an. 6 : 200 à 500 mm/an. 7 : > 500 mm/an.

Enfin, à une échelle plus macroscopique et globale, permettant la jonction avec les budgets en eau totaux des bassins et de la France entière esquissés plus haut, on peut estimer comme suit la répartition des flux souterrains en distinguant les écoulements souterrains totaux. principales composantes des écoulements de surface réguliers, des débits des nappes souterraines des principaux systèmes aquifères régionaux proprement dits qui forment donc la base naturelle des ressources en eau souterraine renouvelables et auxquels les prélèvements seront pour l'essentiel à comparer (cf. infra tableau 13).

Tableau 8 - Flux souterrains globaux en 10^9 m³/an

Bassin	(1) Ecoulement souterrain moyen approximatif	(2) Débit global moyen des principaux aquifères régionaux - compris dans (1) -	(3) Ecoulement souter- rain occulte à la mer (très approximatif)
ADOUR-GARONNE	22*	9*	0.6
ARTOIS-PICARDIE	3,5	3	0.02
LOIRE-BRETAGNE	20	6	0.02
RHIN-MEUSE	8,5	7	0
RHONE-MEDITER- RANEE-CORSE	31*	15*	0.2*
SEINE-NORMANDIE	15	10	0.25
Total FRANCE	100	50	env. 1,1

* dont une forte proportion de débit irrégulier d'aquifères karstiques.

Les **réserves** des aquifères sont par contre moins couramment et surtout beaucoup plus approximativement chiffrées. On a mentionné les capacités estimées de quelques aquifères libres ou captifs -qui n'ont évidemment pas la même signification-. Ramenées en hauteur d'eau moyenne, ces réserves s'échelonnent en France entre 0,1 m et plus de 10 m selon les aquifères. Pour l'ensemble du territoire les réserves d'eau souterraine, jusqu'à un millier de mètres de profondeur, sont probablement de l'ordre de 2 000 milliards de m³, dont un dixième pourrait correspondre à la part variable ("réserves régulatrices"), et selon les régions de l'ordre de 0,1 à 10 millions de m³ par km².

Qualités physiques et chimiques des eaux souterraines

Encore qu'inégalement selon les régions et les aquifères, les qualités des eaux souterraines sont assez bien connues, notamment parce que leur captage concourt dans une large mesure à l'alimentation en eau potable des populations (environ 63 % des productions d'eau à cette fin, en comptant les eaux de source). Sur la base de plusieurs milliers d'analyses chimiques une cartographie hydrochimique et de classes normatives de qualités des eaux souterraines a été réalisée en différentes régions et, en 1977, pour la France entière (figure 10).

Des eaux faiblement minéralisées (moins de 100 ppm) de "bonne qualité" (satisfaisante pour tous les usages ou presque) prédominent dans les montagnes et les massifs anciens -où elles sont néanmoins souvent agressives et parfois chargées en fer dans les formations cristallines et les roches siliceuses- ainsi que dans les alluvions fluviatiles ou fluvio-glaciaires de ces domaines. Des eaux de "qualité moyenne" (utilisables après traitements correcteurs, pour la production d'eau potable et certaines industries) sont les plus répandues dans les bassins sédimentaires et les alluvions de leurs vallées : celles des aquifères carbonatés requièrent souvent un adoucissement, celles des alluvions et de certains sables une déferrisation ; ces eaux sont partout utilisables pour l'irrigation. Des eaux de "mauvaise qualité" naturelle (salées ou séléniteuses) sont toutefois localisées en quelques régions de ces bassins : aquifères éocènes à terrains gypseux de la région parisienne (N et E) à eaux sulfatées, aquifères carbonatés également éocènes à eau fluorée en Ile-de-France et en Aquitaine Occidentale, aquifère des calcaires du Muschelkalk de Lorraine en contact avec des terrains salifères, aquifères littoraux d'Aquitaine et du Languedoc à influence marine. Les aquifères profonds renferment des eaux douces (moins de 1 000 ppm) jusqu'à d'assez grandes profondeurs : 1 000 m dans le bassin de Paris, 1 500 à 2 000 m dans le Bassin d'Aquitaine. D'autres, à très faible renouvellement ou au contact de formations salifères, contiennent des eaux salées moins profondément : la nappe des grès du Trias inférieur en Lorraine à l'Ouest du méridien Metz-Nancy, la nappe des Sables verts albiens dans le Nord du bassin de Paris, les nappes profondes de l'Alsace, de la Bresse, ou de zones littorales (Languedoc, delta du Rhône). Appliquant la classification multi paramétrique simplifiée, cohérente avec la classification normative recommandée par la CCE mais adaptée plus spécifiquement aux eaux souterraines, présentée au tableau 9, le tableau 10 résume les qualités dominantes des eaux des principaux types d'aquifères français, suivant le même ordre que le tableau 5.

Aux causes naturelles de défauts de qualités des eaux souterraines s'ajoutent des facteurs artificiels de détérioration : pollutions locales chroniques ou accidentelles -mais aux effets persistants- d'origine surtout industrielle, pollutions plus diffuses et extensives d'origine agricole (élévation des teneurs en nitrates) sur lesquelles on reviendra (infra 4).

Enfin, la France est riche en eaux minérales et thermales de toutes catégories : eaux carbo-gazeuses, sulfureuses, chlorurées, réparties en différentes provinces "hydrominérales et hydrothermales" correspondant aux grands domaines structuraux, tant dans les bassins sédimentaires que les chaînes alpines et les zones de socle à structures ravivées et à volcanisme récent (1 200 sources ont le label d'eau minérale attribué par les autorités médicales et sanitaires).

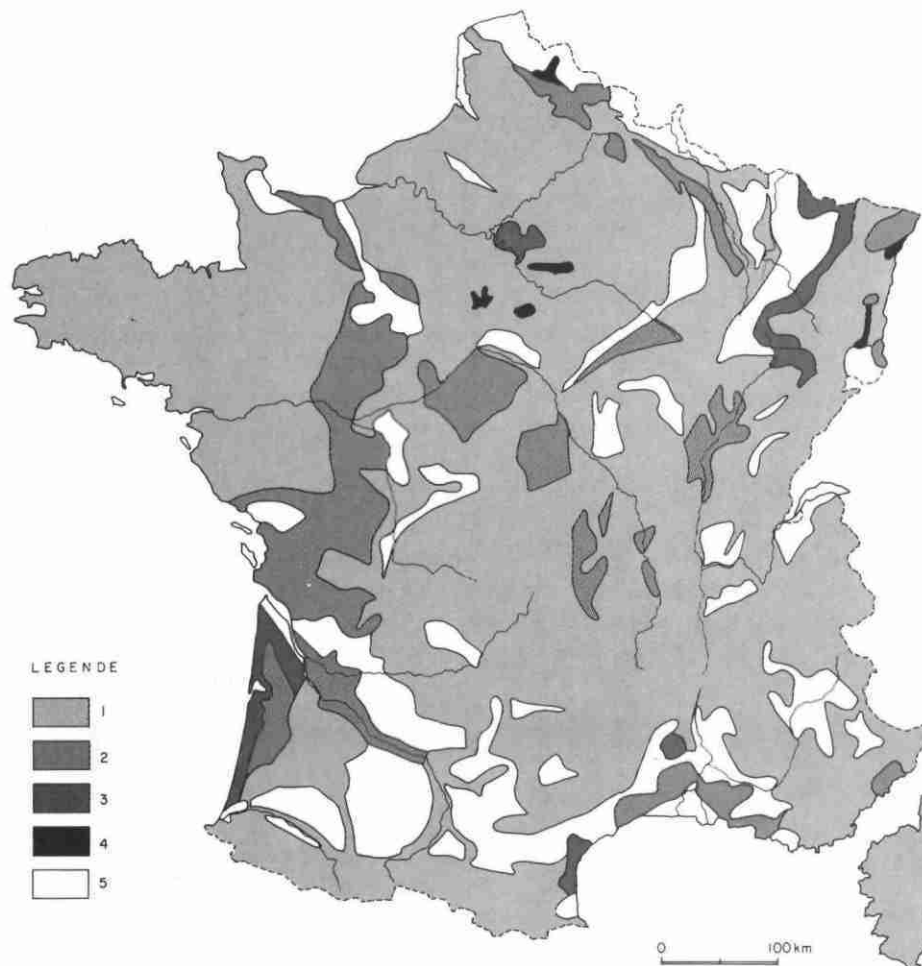


Fig 10 : Qualités chimiques des eaux souterraines (schéma simplifié).
Classes de qualité :

1. eau de bonne qualité chimique apte sans traitement à de nombreux usages notamment alimentaire.
2. eau dont la qualité chimique permet l'utilisation soit sans traitement pour diverses industries. soit après un traitement simple (déferrisation et/ou adoucissement pour satisfaire à des usages plus exigeants (classe 1).
3. eau de mauvaise qualité due généralement à une minéralisation élevée ou à une forte teneur en fer, inapte sans traitement poussé à la plupart des usages.
4. eau dont la mauvaise qualité est due aux activités humaines.
5. zones non cartographiées (absence de données. nappes trop discontinues ou inexploitées, absence de nappe phréatique).

Tableau 9 - Classification hydrochimique des qualités d'eau souterraine selon les critères d'usages

Classe de qualité	Paramètres (valeurs maximales)						autres
	Dureté TH (degré français)*	Résidu sec ppm	Cl ⁻ ppm	SO ₄ ²⁻ ppm	NO ₃ ⁻ ppm		
Qualités décroissantes	1	5°	100	20	20	10	
	2A	25°	850	20	20	15	
	2B	30°	2 000	20	250	50	
	3	30°	2 000	250	250	50	
	4	25°	850				Fe 0,3 Mn 0,2
	5	18°	2 000				Fe 1 Mn 1
	6	50°	2 000				Fe 2 Mn 1
	7	50°	2 000			50	Fe 1 Mn 1

* 1° français = 10 ppm CaCO₃.

Tableau 10 - Qualités chimiques des eaux souterraines des principales formations aquifères

Formations aquifères	Position stratigraphique (et situation)	Classe de qualité (cf. tableau 9)	Paramètres déterminant (Rs : résidu sec)	Facteurs	
				naturels	artificiels
Alluvions graveleuses	Quaternaire Plio-quaternaire	2 à 7	Rs, TH, Cl, Fe	Nature du sol et du réservoir, apports d'eau de surface, invasion marine	Rejets urbains et industriels, lessivage de déchets, invasion marine provoquée
Sables	Quaternaire (dunes et cordons littoraux)	2A, 3, 7	Cl	Invasion marine, précipitations littorales	
	Plio-Quaternaire (Landes)	2 à 7	Fe	Nature du sol et du réservoir	
	Pliocène (Astien, Languedoc)	2A, 4 à 7	Cl, Fe	Nature du réservoir, invasion marine	
	Miocène (Aquitaine, Sologne)	2B 3 5, 7	Cl, SO ₄ Cl, TH TH, Fe	Apports d'eau de surface, faciès ferrugineux	
	Eocène (Nord)	2A 7	TH, Rs Cl	Nature de la couverture et du réservoir, invasion marine	
	Cénomanién, Albien (Bassin de Paris)	2A 2B 6 7	TH Cl, SO ₄ , Rs TH, Fe Fe	Nature de la couverture, lessivage de pyrite, limonite, glauconie ; présence de lignites	
Mollasses	Miocène (Bas Dauphiné, vallée Rhône, Aquitaine)	2A, 2B 3	TH, Cl Cl	Nature du réservoir	
Sables et calcaires mêlés	Eocène (Bassin de Paris, Soissonnais)	4, 6 7	TH TH, SO ₄ , Fe, Rs, F	Nature du réservoir faciès gypseux	Rejets urbains
	(Aquitaine occ.)	1, 2A, 2B 3 4, 5, 6 7	Cl Cl, Rs TH, Fe Cl, TH, SO ₄ , F	Nature du réservoir invasion marine faciès ferrugineux faciès gypseux	
Grès	Permo-Trias (Lorraine, basse Normandie)	1, 2A 2B 6 7	Rs, TH, SO ₄ SO ₄ , Mg Rs, TH, SO ₄ , Fe Fe	Nature du réservoir faciès gypseux faciès ferrugineux lessivage de pyrite	Exhaure mines de fer
	Primaire "Grès armoricain"	1, 4	Fe	Nature du réservoir	
Craie, calcaires	Crétacé sup. (Bassin de Paris, Artols, Charentes)	2A 2B 3 6 7	TH, Cl SO ₄ , NO ₃ , Mg Cl TH, Fe Cl, SO ₄ , Fe	Nature du réservoir faciès marneux, glauconieux ; couverture argileuse "siderolithique" ; invasion marine	Pollution azotée (engrais)
Calcaires, dolomies	Oligocène (Bassin de Paris, Brie, Beauce)	2A 2B 3 4, 5 6 7	TH SO ₄ , NO ₃ Cl Fe TH, Fe NO ₃ , Fe	Nature du réservoir Faciès marneux, pyriteux couverture ferrugineuse	Pollution azotée (engrais)
	Eocène (Bassin de Paris, Brie)	2A, 3 6	Cl TH	Nature du réservoir	
	Crétacé inférieur (Bassin sud alpin, Provence, Languedoc)	2A, 2B	TH, Rs	Nature du réservoir	
	Jurassique moyen & supérieur (Bassin de Paris, Jura, Provence, N et NE Aquitaine)	1, 2A 2B 3 6	Cl TH, SO ₄ , Mg Cl TH, Fe	Nature du réservoir, faciès marneux, substrat ferrugineux	
	Trias (Lorraine, Provence)	7	TH, SO ₄	Faciès gypseux	
	Carbonifère (Nord, Massif armoricain)	3, 6 7	TH, Fe SO ₄	Nature du réservoir, captivité, lessivage de pyrites	
Schistes, roches cristallines	Antécambrien (Massif armoricain, central, ...)	1, 2A 2B 4, 5	Rs, TH Rs, TH SO ₄ , Mg, Fe, NO ₃	Nature du réservoir, influence de couverture sédimentaire	Pollution azotée
Roches volcaniques	Quaternaire (Auvergne)	1, 2A	Rs, TH	Nature du réservoir	

3 - TECHNIQUES ET METHODES DE CONNAISSANCE

Prospection et inventaires

Toutes les techniques classiques et éprouvées des investigations hydrogéologiques sont appliquées en France, où elles s'appuient largement sur un état avancé des connaissances géologiques de surface et subsurface : lever des points d'eau et construction de surfaces piézométriques, hydrométrie des sources et des cours d'eau en étiage, analyses de fluctuations de niveau naturelles, essais hydrodynamiques actifs, traçages, analyses hydrochimiques et isotopiques, reconnaissances par forage et prospection géophysique (électrique surtout).

L'inventaire méthodique a priori entrepris en détail à partir des années 50 en plusieurs régions (Nord, Bassin de Paris, Aquitaine occidentale, Alsace) a été ensuite plus extensif ailleurs (Ouest, Sud-Est), sans viser à couvrir tout le territoire, tandis qu'il s'est doublé d'une collecte systématique des données acquises par des opérations d'études à finalité particulière. En domaine karstique l'effort s'est concentré sur l'étude du régime des sources, -certaines sous tous les angles : hydraulique, chimique, thermique et biologique-, et les traçages ont été multipliés, notamment par les groupements spéléologiques dont les résultats d'exploration sont méthodiquement conservés. En domaine de socle -notamment de terrains cristallins et métamorphiques-, comme dans le précédent, les méthodes d'analyse des fracturations, basées sur les matériaux photo-géologiques et les images de télédétection, se sont beaucoup perfectionnées et sont couramment appliquées.

En sus des études hydrochimiques surtout descriptives et appliquées directement à l'évaluation des qualités des eaux souterraines, l'hydrologie isotopique, promue principalement en France par des chercheurs de l'Université de Paris, a contribué par une voie indépendante -mais inégalement coordonnée avec les approches hydrodynamiques- à la génétique et à la cinématique des eaux souterraines d'un certain nombre d'aquifères, notamment de nappes profondes.

Les forages de reconnaissance mettent en oeuvre pour l'essentiel les mêmes ateliers que ceux consacrés aux ouvrages de production, en grande partie communs avec ceux d'études de fondation -pour les faibles profondeurs- ou de prospection géothermique ou pétrolière pour les grandes profondeurs ; aussi le potentiel technique mis en oeuvre en France pour la prospection des eaux souterraines est-il difficile à individualiser (ordre de plusieurs centaines de foreuses, ...). Un rôle primordial est joué par les pompages d'essai pour identifier les paramètres des aquifères -dont les résultats très nombreux sont rassemblés et ont fait déjà l'objet d'analyses statistiques-, couplés parfois avec des traçages pour estimer des dispersivités. Depuis peu, motivées par le développement de l'utilisation des ressources géothermiques de moyenne ou basse enthalpie, voire du stockage d'eau réchauffée ou refroidie en aquifère, des techniques d'identification in situ des paramètres thermiques des aquifères ont été mises au point.

Réseaux d'observation

Le suivi de variables hydrogéologiques a une grande ancienneté en quelques cas, cependant rares, en France : on dispose d'un petit nombre d'historiques de niveau de nappe souterraine -en régime naturel ou influencé- ou de débit de sources (captées pour l'alimentation de villes) d'ordre centenaire. Des réseaux méthodiques d'observation piézométrique, d'abord, ne se sont toutefois développés que depuis les années 50, avec des intensités et des fréquences variées car en vue d'objectifs divers : contrôle d'influence d'exploitation ou d'aménagements hydrauliques -ceux-ci limités à la durée de contentieux possibles- plus souvent que connaissance de base. Aussi le nombre de points suivis a-t-il eu plutôt tendance à décroître au cours des années 70 et 80, malgré des efforts des Services publics pour consolider et pérenniser un réseau général minimal constituant un instrument de contrôle de gestion. Actuellement environ 8 000 stations piézométriques -contre 12 000 recensées en 1967 et 9 000 en 1975- sont en service en France, inégalement réparties (surtout dans différents aquifères alluviaux du bassin du Rhône -80 % du total- et celui d'Alsace, dans le Nord et le bassin de Paris), exploitées principalement par le BRGM, les services régionaux du Ministère de l'Agriculture et divers organismes d'aménagement régional -dont la Compagnie nationale du Rhône-.

Le suivi périodique des qualités chimiques des eaux souterraines -en sus des contrôles réguliers réglementaires aux points de production d'eau potable- s'est développé plus récemment, mais inégalement lui-aussi et sélectivement (contrôle de l'évolution de qualités d'eau souterraine dégradée ou menacée). Environ 2 300 points sont contrôlés et exploités par des organismes variés.

Banques de données

Intégrées dans la "banque de données sur le sous-sol" constituée et entretenue par le BRGM les données hydrogéologiques relatives à environ 200 000 points d'eau -forages principalement, sources, ouvrages souterrains- réunissent des renseignements sur la nature et les paramètres des aquifères, sur les niveaux d'eau, sur les débits naturels ou produits, sur les caractéristiques chimiques de l'eau. Des fichiers particuliers conservent les chroniques de données obtenues par l'exploitation des réseaux piézométriques (de 3 886 piézomètres gérés par le BRGM, en 1985 ; environ 80 000 mesures mémorisées par an) et, en quelques cas (sources, petits cours d'eau) hydrométriques, ainsi que les données sur les aquifères profonds à intérêt géothermique. Des banques de données plus spécialisées -néanmoins connectées au système général et aussi aux banques de données sur l'eau instituées depuis 1981 dans chaque grand bassin -sur les captages publics pour l'alimentation en eau potable et sur les caractéristiques chimiques des eaux souterraines et leur évolution (constitution d'un "observatoire de la qualité des eaux souterraines"). sont en cours de réalisation (avancement par région).

Ces fichiers informatisés sont exploitables par des logiciels de traitement statistiques et cartographiques appropriés et pourront être interrogeables par certains utilisateurs via des réseaux télématiques. En sus de ces bases de données factuelles à référence ponctuelle, des banques de données bibliographiques, en partie analytiques, sont d'une part incorporées à la banque générale couvrant tout le champ des sciences de la terre (PASCAL-GEODE et GEODE) dont le BRGM et le CNRS sont producteurs (bibliographie de la France : 79 000 références, stock 1985), et d'autre part commencent à se développer à l'échelle régionale en s'étendant à la "littérature grise" (Sud-Est).

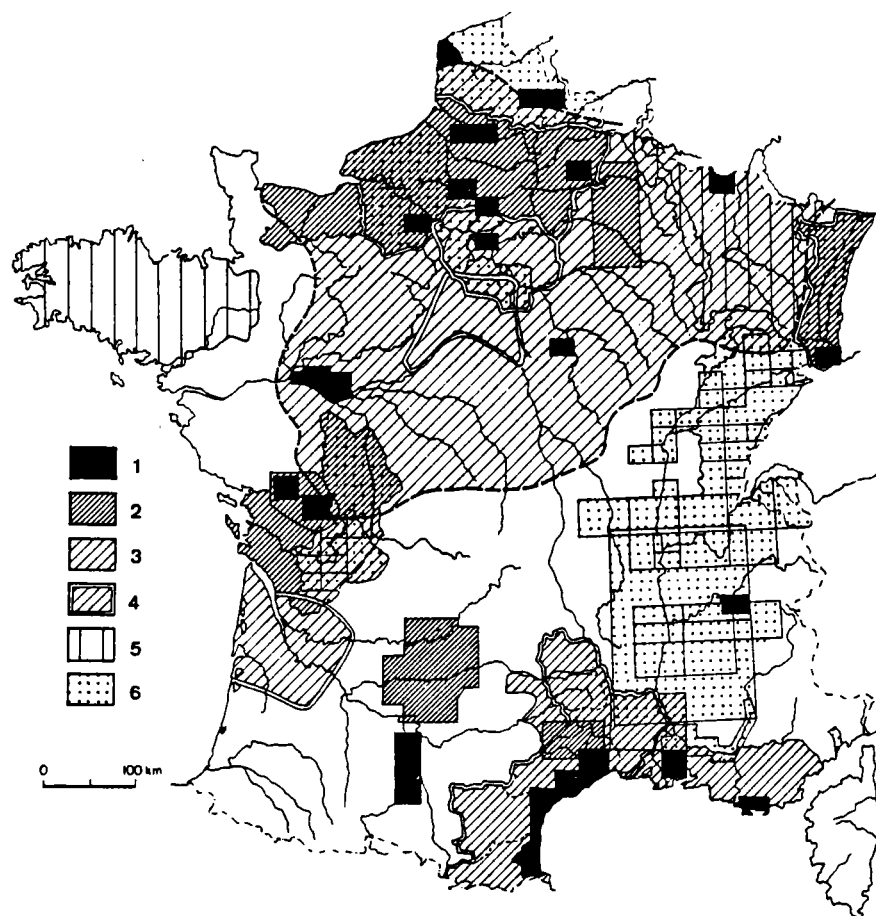


Fig 11 : Couvertures cartographiques relatives aux eaux souterraines.
Etat actuel

1 à 3 : Cartes hydrogéologiques. 1 - 1/50 000, 2 - 1/100 000. 3 - 1/200 000 à 1/500 000. 4 - Atlas hydrogéologiques. 5 - Cartes de productivité*. 6 - Cartes de qualités et/ou de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines (* à l'exclusion de cartes spéciales sur les potentialités en eaux souterraines pour pompes à chaleur).

Cartographie

Forme synthétique privilégiée d'expression et de diffusion des connaissances, la cartographie des eaux souterraines a accompagné précocement les premiers pas des investigations hydrogéologiques. En témoigne la carte hydrogéologique de Paris et ses environs à 1/25 000 (A. DELESSE 1862), probablement la première dans l'histoire. La cartographie hydrogéologique du territoire français n'a pourtant pris son essor que depuis quelques décennies.

Une couverture régulière à grande échelle (1/50 000, 1/100 000) par feuilles topographiques, normalisée suivant la légende internationale, fut d'abord amorcée à partir de 1964 par le BRGM en plusieurs régions (Nord, Bassin de Paris, Sud-Est), comportant plusieurs dizaines de feuilles complétées par des cartes régionales ou départementales à échelles encore grandes (1/100 000) ou moyennes, dont une carte du bassin de Paris à 1/500 000 (1967), par des atlas régionaux démultipliant les cartes structurales et paramétriques par aquifère.

(région parisienne, Beauce, Normandie, région de Bordeaux) et par des premières synthèses nationales à petite échelle (carte puis Atlas des eaux souterraines de la France à 1/1 000 000, 1970) associées à la contribution française à la carte hydrogéologique internationale de l'Europe à 1/1 500 000. La poursuite d'une cartographie hydrogéologique générale détaillée jugée non prioritaire en beaucoup de régions à ensuite été stoppée en tant qu'oeuvre autonome (elle a continué à illustrer des monographies régionales) et relayée par des cartes thématiques plus spécialisées à objectifs plus pratiques : productivités des ouvrages de captage, vulnérabilité à la pollution, qualités des eaux souterraines, potentialités offertes à l'utilisation pour pompes à chaleur. Ces cartes réalisées à des échelles diverses et suivant des modes de représentation variés, dans le cadre de programmations régionales, ont été parfois réunies en atlas régional (Alsace, Languedoc-Roussillon), tandis que des synthèses nationales à petite échelle les ont complété (cf. références) ; de certaines sont dérivées les fig. 7 et 10 ; dernière en date : teneurs en nitrates des eaux souterraines en France (1985). Une carte de synthèse de conception plus scientifique, "hydrogéodynamique", de la France a par ailleurs été réalisée par le BRGM en 1980 (systèmes aquifères, à 1/1 500 000). Enfin dans le cadre de monographies sur les ressources en eau souterraine des pays de la Communauté Européenne, à l'initiative de la CCE, des cartes à 1/500 000 couvrant l'ensemble du territoire, relatives aux conditions hydrogéologiques, à l'état des exploitations, puis aux qualités et aux vulnérabilités des eaux souterraines -compilation et extension des cartes variées antérieures sur ces thèmes- ont été rédigées par ARLAB et sont en cours d'édition par la CCE. La figure 11 schématise l'état présent de couverture du territoire français par les cartes de divers types.

Modélisation

Les modèles de simulation hydrodynamique ont commencé à être mis en oeuvre en France dès les premières années 60. Les techniques analogiques électriques -résistances et capacités- développées en premier (par le Service Géologique d'Alsace et des sociétés d'étude pétrolières) ont été rapidement supplantées par les techniques numériques, servies par les progrès des ordinateurs, dès les années 70. De nombreux logiciels élaborés par les différents opérateurs d'étude et des centres de recherche (centre d'informatique géologique de l'Ecole des Mines de Paris, BRGM), ont permis de simuler des structures et des phénomènes progressivement plus complexes impliquant des progrès concomittants dans l'analyse des systèmes aquifères, tandis que leurs conditions d'emploi se sont perfectionnées et simplifiées. Leur usage s'est aujourd'hui banalisé en hydrogéologie pratique avec l'expansion de la micro-informatique. Plus d'une centaine de modèles d'aquifères régionaux de tailles et de complexité variées ont été réalisés, concourant à l'étude de nombreux problèmes et à l'aide aux décisions de gestion de certaines nappes souterraines dont l'exploitation est réglementée (cf. infra 5). Après la généralisation des modèles hydrodynamiques et sur leur base, des modèles hydrocinématiques et hydrogéochimiques, voire hydrothermiques, commencent actuellement à être construits et employés pour traiter les problèmes de protection et de conservation des qualités des eaux souterraines. Par ailleurs des modèles "globaux", à réservoirs et fonctions de transfert, pouvant se relier à des modèles hydrologiques de bassin similaires, commencent aussi à être appliqués à la résolution de problèmes complexes quantitatifs (comportement d'aquifères karstiques, flux en milieu non saturé) ou qualitatifs (évolution et prévision des teneurs en nitrates) ; les progrès de la modélisation des apports d'eau météorique infiltrée aux aquifères contribuent à affiner la validité des modèles de simulation hydrodynamiques mentionnés ci-dessus.

Evaluation des ressources

L'évaluation des ressources en eau souterraine, à l'échelle pertinente des systèmes aquifères, s'est progressivement distinguée du seul chiffrage des flux d'apport et des capacités régulatrices des réservoirs qui demeure son fondement physique. Elle repose sur deux principes :

- prendre en compte l'interdépendance des eaux souterraines et des eaux superficielles, rarement négligeable en France, d'où procèdent des contraintes croisées imposées aux utilisateurs respectifs de ces deux phases de la ressource en eau ;
- relativiser l'évaluation aux critères économiques des différentes catégories d'exploitants et à l'éventuelle hiérarchisation de leurs objectifs. Ce qui impose une confrontation multidimensionnelle entre les caractères offerts et les paramètres des demandes (flux, conditions d'accès et productivités, coûts conséquents, qualités, répartition spatiale et distribution temporelle de ces variables).

L'évaluation des ressources, conçues comme un ensemble de potentialités ne se réduisant pas à une expression unique, est aujourd'hui inséparable d'une modélisation hydrodynamique des aquifères -évoquée plus haut- qui permet d'abord de vérifier la cohérence des données et des estimations sur leur structure et leur dynamique, puis d'éprouver leur comportement et de mesurer leurs réactions -y compris qualitatives- en réponse à différents projets ou scénarios d'exploitation ou d'influence indirecte, donc de tester leur exploitabilité selon les critères choisis, notamment dans les cas où l'exploitation pourra transformer significativement les conditions initiales et induire une suralimentation (cf. tableau 7). Cette procédure a été appliquée en France, depuis une quinzaine d'années, à un certain nombre de systèmes aquifères intensément exploités, en vue d'éclairer leur gestion : grands aquifères alluviaux à nappes libre d'Alsace, de la plaine de Lyon, de la Crau ; plusieurs aquifères de la craie (dans le Nord, notamment) et celui de la Beauce ; aquifères multicouches complexes d'Aquitaine, de la région de Lille (craie/calcaire carbonifère), du Roussillon ; aquifères profonds des sables verts du bassin de Paris et des grès du Trias inférieur de Lorraine, pour ne citer que les cas les plus notoires (la plupart sont situés sur la figure 9 qui accompagne le tableau 7).

4 - EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES

Conditions et techniques

Le sous-sol français offre on vient de le voir, des eaux souterraines très inégalement abondantes, accessibles -par leurs profondeurs et les probabilités de succès des forages- et mobilisables -par les productivités que les caractères des aquifères permettent-, et par conséquent très différemment compétitives comme source d'approvisionnement en eau face aux eaux superficielles, elles-mêmes irrégulièrement réparties dans l'espace et plus encore dans le temps. Cette variété, face à des demandes en eau elles aussi différenciées -en quantité, en localisation, en qualités- fonde la diversité des modalités et des intensités d'exploitation des eaux souterraines en France. Un rapide parcours suivant l'ordre des régions naturelles qui a servi à décrire les conditions hydrogéologiques, le mettra en évidence.

Dans les **massifs anciens**, où elle fut longtemps délaissée car jugée impraticable, l'exploitation locale des eaux souterraines s'est avérée possible, de préférence par forages moyennement profonds (40 à 60 m) plutôt que par des puits coiffant traditionnellement des sources, ou parfois par galeries drainantes. Elle peut satisfaire des demandes en eau dispersées et limitées, individuelles surtout : des productions d'une dizaine de m³/heure ne sont pas exclues si les ouvrages sont bien implantés. La multiplication de ces forages dans le Massif Armoricain, après la sécheresse de 1976 l'a montré. Même les ouvrages placés sans étude aux sites d'utilisation peuvent fournir pour la plupart plusieurs - m³/h : une statistique opérée sur plus de 4 500 forages a indiqué que 50 % produisaient plus de 0,1 m³/h par mètre foré, donc plus de 5 m³/h en général, et que selon les zones les productivités étaient supérieures à 20 m³/h dans 5 à 20 % des cas. Bien que moins nombreux les forages implantés sur indication d'un géologue ont donné des résultats meilleurs : près de 50 % à plus de 10 m³/h, et plus de 25 % au-dessus de 20 m³/h, sur 70 forages réalisés dans la région de St-Malo par exemple. Servie par la technique de forage par percussion à l'air ("marteau-fond-de-trou") beaucoup développée depuis une dizaine d'années, l'exploitation d'eau souterraine dans les terrains de socle s'est banalisée, surtout dans le Massif Armoricain (Bretagne) où plus de 6 000 forages productifs ont été réalisés en quelques années, tant dans les roches granitiques que dans les schistes où les probabilités de succès et les distributions fréquentielles des productivités ont été constatées du même ordre.

L'exploitation des **aquifères volcaniques** du Massif Central consiste surtout en pratique à récolter les sources nombreuses et d'eau très pure qu'ils dispensent. Ils donnent lieu parfois cependant à des captages gravitaires par de longues galeries, aménagées jusqu'à la base des réservoirs (chaîne des Puys en Auvergne).

. Dans les **montagnes alpines**, les eaux souterraines sont peu directement exploitées, tant à cause des difficultés d'accès et des structures complexes des aquifères, que du fait de la richesse en sources et en eaux superficielles abondantes et de bonnes qualités. Les eaux des aquifères les plus notables, les massifs calcaires karstiques, y sont le plus souvent profondes et d'accès aléatoire par forage. Le captage de leurs sources -adapté à leur débit minimal- est la manière la plus courante de les utiliser. Localement néanmoins des aquifères morainiques

-et naturellement ceux des alluvions fluvio-glaciaires très productifs-peuvent être exploités pour l'alimentation d'agglomérations, notamment celles à forte population saisonnière hivernale, en période d'étiage des eaux de surface (parfois à débit nul en altitude).

. Dans les vastes **plateaux calcaires** intermédiaires entre les reliefs précédents et les plaines sédimentaires, capter en tout ou partie les sources est le principal mode actuel de mobilisation des eaux des aquifères karstiques, dont l'exploitation directe reste difficile (niveau de l'eau profonds, forages hasardeux) et peu développée, sans être cependant exclue dans certains cas. Aussi la protection des eaux de ces réservoirs, vulnérables à la pollution depuis la surface est-elle le principal souci. Trois-quarts de siècle après les campagnes de MARTEL, et malgré une police des eaux bien armée de règlements (cf. infra 5), les gouffres et avens qui parsèment ces plateaux sont encore trop souvent considérés comme des bouches d'égout où il est tentant de se débarrasser de déchets variés, ... Ces réservoirs aquifères ont pourtant de grandes capacités, difficiles à chiffrer certes (car leur fracturation et leurs vides sont très variables en profondeur), mais qui pourraient être mieux employées. Le moyen le plus simple est de faire varier artificiellement le niveau des sources : les faire baisser en période d'étiage (qui correspond souvent à la période de pointe des demandes en eau) pour augmenter leur débit, avec en compensation une atténuation du débit de crue ultérieure. Cela se pratiquait déjà depuis 1965 par pompage dans l'exutoire d'un aquifère karstique du Languedoc, la source du Lèz (0,2 à 20 m³/s, 2 à 3 en moyenne annuelle, en régime naturel), relayé depuis 1982 par l'aménagement de puits forés directement jusqu'au conduit karstique en profondeur, pour alimenter Montpellier (captage de 1 à 1,7 m³/s). Cela pourrait se faire ailleurs (un projet a été étudié à Vaucluse pour fournir un appoint de sécurité en année sèche). Le cas particulier d'aquifères littoraux à conduit karstique noyé au-dessous du niveau de la mer, favorisant les mélanges d'eau douce et d'eau salée, a offert l'occasion d'appliquer expérimentalement une technique d'aménagement spéciale : barrage souterrain et submergé de Port-Miou, à l'Est de Marseille, qui a surélevé de plusieurs mètres la charge d'eau douce.

. C'est dans les grands **bassins sédimentaires** riches en réservoirs aquifères étendus, accessibles et productifs on l'a vu, que se trouve la plupart des exploitations d'eau souterraine en France.

En premier lieu les aquifères étendus à nappe libre "phréatique", présents dans la plus grande partie du bassin de Paris et de son prolongement au Nord, en Artois, comme dans le Nord et l'Est du bassin d'Aquitaine (ceux de la craie au premier chef et de plusieurs aquifères carbonatés tertiaires : Beauce, Brie. ...) dont l'exploitation directe et dispersée est facilitée par plusieurs facteurs :

- le fait que les nappes soient libres, donc que leurs réservoirs aient de fortes capacités d'emmagasinement (ce qui amortit la propagation des répercussions des captages (sur le débit des sources et des cours d'eau),
- l'extension de leur aire d'alimentation, qui équivaut à la majeure partie de leur superficie ;
- leur accessibilité (niveaux de l'eau modérément profonds) ;
- enfin, les productivités moyennes à élevées des ouvrages de captage : presque toujours plusieurs dizaines de m³/h. souvent plus de 100 ou même plusieurs centaines de m³/h.

Dans la craie de Picardie, par exemple, une statistique opérée sur plus de 300 forages a montré que leurs débits de production "spécifiques" (par mètre d'abaissement de niveau) dépassaient 10 m³/h pour 56 %, 50 m³/h pour 15 %, et même 100 m³/h pour certains.

L'exploitation de ces nappes -qui soutire le plus souvent de 5 à 10 % de leur débit moyen global- influence encore peu leur régime en général. En quelques zones assez circonscrites, toutefois, l'intensité et la concentration des prélèvements a déterminé d'amples baisses des niveaux, plus ou moins stabilisées aujourd'hui (nappe de la craie dans la région de Lille). L'idée d'amplifier la fonction régulatrice de soutien des étiages des rivières assurée spontanément par ces aquifères au moyen de pompages saisonniers bien réglés, a commencé à être expérimentée (aquifère de la craie dans la vallée de la Lys, rivière captée pour alimenter la ville de Lille).

Les systèmes multicouches ensuite -principalement ceux des séries tertiaires d'Ile-de-France et d'Aquitaine occidentale- comportent souvent en profondeur des couches aquifères à nappe captive plus conductrices et productives que celles des "premières nappes" libres : aussi sont-elles dans ces régions les mieux exploitables et les plus exploitées. Se comportant comme des drains dans ces systèmes stratifiés ces couches sont réalimentées, lorsqu'elles sont exploitées, par drainance affluant des aquifères supérieurs mieux alimentés mais moins productifs, ou de réservoirs inférieurs qui apportent des capacités complémentaires. Leur exploitation peut donc parvenir à un régime d'équilibre, si les prélèvements ne croissent pas continuellement.

L'exploitation intensive et croissante de ces aquifères en quelques secteurs (région parisienne nord : 6 m³/s pour le système multicouche éocène du Soissonnais ; région bordelaise : 1 m³/s en moyenne entre 1900 et 1960, 1,5 m³/s en 1975 pour l'aquifère des sables éocènes inférieurs) est actuellement en régime déséquilibré. Elle entraîne des dépressions régionales des niveaux qui s'amplifient lentement et que la concentration des forages accuse, au détriment de leurs productions individuelles. Par exemple dans le cas de l'exploitation de la nappe des Sables éocènes inférieurs dans la région de Bordeaux (Gironde) 25 forages seulement, tous jaillissants, produisaient ensemble 1,2 m³/s en 1890, alors que 85 produisaient en 1960. 1 m³/s -dont 40 % encore par jaillissement- et 129 produisaient en 1975 1,5 m³/s entièrement par pompage.

Enfin, l'exploitation des aquifères profonds, des "nappes artésiennes" classiques, a été facilitée par un fréquent jaillissement initial des forages compensant la nécessité de forer profondément (plusieurs centaines de mètres, jusqu'à près d'un millier). Pourtant ce jaillissement a -comme il était normal- rapidement décru et en général disparu depuis l'exécution des premiers forages (seconde moitié du 19e siècle) dans les quelques aires où ils se sont ensuite multipliés (régions de Paris, Lille, Tours).

Les débits prélevés se sont accrus d'autant : de 1.3 m³/s avec 180 forages productifs en 1900, à 10.5 m³/s avec 1 170 forages productifs en 1975 au total pour les quatre nappes captives profondes les plus exploitées en France (en sus des multi-couches précédents), par ordre d'importance actuelle :

- . "Grès vosgiens" (Trias inférieur) de Lorraine.
- . Calcaire carbonifère du Nord.
- . Sables verts (Albien) du Bassin de Paris.
- . sables cénomaniens de Touraine.

Des volumes d'eau importants ont ainsi été extraits de ces aquifères depuis un siècle. On a, par exemple, soutiré plus de 6 milliards de m³ d'eau de l'aquifère captif des grès du Trias inférieur de Lorraine entre 1900 et 1975 (en comptant les eaux d'exhaure des mines), soit près du double de son alimentation naturelle (40 à 50 millions de m³/an) pendant la même période. De la nappe des Sables verts du bassin de Paris environ 1,2 milliard de m³ ont été extraits depuis l'origine de son exploitation -le fameux puits artésien de Grenelle foré en 1841 - jusqu'en 1975 : cette soustraction est inférieure aux apports naturels globaux (ordre de 20 millions de m³ par an), mais ils sont concentrés dans la seule région parisienne.

Ce sont les "chutes de pression" inévitables déterminées localement par les exploitations concentrées dans ces aquifères (baisses de niveau : ordre de 100 m en 100 ans, ...) qui ont motivé les premières mesures conservatoires réglementaires : régime de l'autorisation, à partir de 1935, appliqué initialement dans la région parisienne pour "protéger" la nappe des Sables verts, c'est-à-dire conserver le rendement des forages (cf. infra 5). L'application de ce règlement dans un sens très restrictif a parfois dépassé son objectif. A Paris, par exemple, le niveau de l'eau dans les forages exploitant la nappe des Sables verts a non seulement cessé de baisser, mais il a même remonté depuis 1971. Différentes causes, il est vrai, ont concouru à faire diminuer les prélèvements.

. Enfin les aquifères alluviaux, tout particulièrement ceux soutenus à la fois par des cours d'eau auxquels ils sont subordonnés et par des nappes de plateaux -craie, etc.- réunissent le maximum de conditions favorables à l'exploitation des eaux souterraines : facilité d'accès (faible profondeur), productivités élevées (souvent plus de 100, jusqu'à 1 000 m³/h), rééquilibres dynamique instaurés rapidement par les réactions des cours d'eau limitrophes, proximité enfin des lieux d'utilisation. Ils se prêtent bien parfois à la construction de captage à rendement très élevé (puits à drains rayonnants).

Leur exploitation est intensive en beaucoup de vallées : 15 m³/s dans la plaine d'Alsace, près de 20 dans la vallée du Rhône de Lyon à la mer. Les débits des cours d'eau, auxquels les quelques 70 m³/s prélevés dans les aquifères alluviaux en France portent préjudice, sont en général assez forts pour supporter sans inconvénient ces prises d'eau indirectes ; cela n'exclut pas néanmoins quelques problèmes locaux surtout en période d'étiage (vallées de la Loire, de la Garonne).

La croissance de ces exploitations est toutefois freinée par les risques de colmatage des berges de certains cours d'eau, par les difficultés d'occupation des sols en certaines zones (conflits avec l'urbanisation et les extractions de matériaux : par exemple dans la vallée du Var) et par les difficultés de protection de la qualité des eaux (y compris celle des cours d'eau qui réalimentent).

. Dans l'ensemble, parmi les types d'ouvrages de production construits à l'époque actuelle, les forages prédominent largement. La plupart sont peu profonds et réalisés principalement par de petites ou moyennes entreprises :

- environ 3 000 forages sont réalisés en France bon an mal an pour exploiter l'eau souterraine ;
- moins de 5 % dépassent 100 mètres et 25 % seulement dépassent 50 m ;
- le métrage foré total est de l'ordre de 100 000 à 150 000 m/an.

Coûts de production

Ces coûts varient évidemment, comme partout, en fonction des difficultés d'accès (profondeur à forer, aléas) et des modalités de captage qui déterminent les coûts d'équipement, des durées de leur amortissement choisies, et des dépenses de fonctionnement qui dépendent des hauteurs de relèvement de l'eau et du coût de l'énergie. Une baisse sensible -en monnaie constante- des coûts de forage de moyenne profondeur en terrains durs, grâce à la percussion à l'air déjà citée, est à noter depuis une dizaine d'années.

Suivant les résultats d'une enquête sommaire effectuée en 1971 -basée sur un type d'ouvrage standard et des règles d'amortissement uniformes- les coûts de production brute d'eau souterraine, hors traitement et transport, variaient alors en France entre des minimums de 0,02 à 0,04 F/m³ dans les zones les plus favorables (grands aquifères alluviaux, comme ceux d'Alsace, de la vallée du Rhône ; craie du Nord de l'Artois) et 0,5 F/m³ dans le cas des nappes les plus profondes, de productivité passable et nécessitant un pompage. En actualisant en francs 1983, cela correspondrait à une fourchette de 0.06 à 1.5 F/m³. Antérieurement I. CHERET ("L'eau", 1967) avait estimé les coûts moyens de mobilisation d'eau souterraine et d'eau superficielle (notamment pour la production d'eau potable) respectivement à 0,38 et 0,55 F/m³ -toujours actualisés en F 1983-. Plus récemment une enquête du Ministère de l'Agriculture a encore relevé que le prix moyen de l'eau potable distribuée d'origine souterraine était inférieur de 12 % à celui de l'eau d'origine superficielle (données de 1980, relatives aux "consommations" domestiques, le prix moyen global étant de 3,80 F (1983)/m³) ; cet écart est attribuable principalement aux moindres coûts de traitement et de transport de l'eau d'origine souterraine, malgré l'économie d'échelle qui avantage souvent les prises d'eau superficielle pour les adductions urbaines.

Enfin, les coûts dépendent de trop de variables locales pour que des dominantes régionales apparaissent. Quelques analyses à l'échelle d'un aquifère ont montré une dispersion des coûts du même ordre que celle indiquée par une enquête nationale : 0.035 à 0.40 F (1983)/m³ dans un aquifère alluvial du Languedoc, par exemple. Ces coûts sont, c'est à noter, peu sensibles aux débits de production au-dessus d'un certain seuil, dans une gamme assez large (75-350 m³/h dans le cas cité).

Tableau 11 - Prélèvements en eau souterraine en France en 1981

Bassin	Prélèvements en M m ³ /an et en % des prélèvements en totaux (valeurs arrondies)												
	Prélèvements par secteur d'exploitation										Total	% des prélèvements en eau totaux	
	Alimentation des collectivités en eau potable		Industries non raccordées (auto-approvisionnées)		Centrales thermo-électriques		Agriculture (irrigation)		Mines (exhaure)	Divers (pompes à chaleur, etc)		de tous secteurs	en excluant les centrales thermiques
	(1)	%		%		%	(2)	%					
Adour-Garonne	230	35	80	8	ε	ε	100	20	ε	ε	410	20	31
Artois-Picardie	310	93	200	45	0	0	60	60	5	10	525	73,5	74
Loire-Bretagne	530	55	80	25	ε	ε	100	15	10	5	725	33,5	60
Rhin-Meuse	260	78	440	35	20	0,4	40	100	370	25	1125	17	49
Rhône-Méditerranée- Corse	1200	67	580	48	5	0,1	800	25	5	15	2605	15	27
Seine-Normandie	970	62	320	32	ε	ε	200	70	0	30	1520	23	49
Total France	3500(4)	63	1700	33	25	0,15	1300	27	390	85	7000	20	39

(1) Pour usagers domestiques, industries et entreprises raccordées et services publics
(inclut les prélèvements d'exploitants domestiques autonomes)

(2) Chiffrages corrigés par rapport aux états de redevances présumés sous-estimés

(3) A l'exclusion des prélèvements d'eau superficielle pour les canaux de navigation et l'hydro-électricité
(cas de déversement en mer)

(4) Dont 900 : captages de sources

Statistiques de prélèvements

En l'absence de recensements complets et périodiques. l'assujettissement des exploitants d'eau souterraine -comme d'eau superficielle- à des redevances perçues par les Agences de l'Eau est. depuis une quinzaine d'années, la principale source de données sur les prélèvements, complétée et précisée seulement en quelques secteurs. Les dernières statistiques complètes, relatives à l'année 1981. sont résumées par le tableau 11 qui décrit la répartition des prélèvements d'eau souterraine (captages de source compris) par bassin et par secteur économique d'utilisation et qui permet de mesurer leur importance relative dans les prélèvements en eau totaux :

- la plus grande partie des prélèvements est répartie entre trois secteurs d'exploitation principaux :
 - . 50,0 % pour la production d'eau potable.
 - . 25,0 % pour l'industrie (non raccordée).
 - . 18,5 % pour l'agriculture (irrigation).
- les plus grands volumes d'eau sont prélevés dans deux bassins : Rhône-Méditerranée-Corse (37 % du total) et Seine-Normandie (22 %);
- la proportion des demandes en eau couverte par l'exploitation d'eau souterraine est la plus forte dans le secteur de l'alimentation en eau potable (63 %. jusqu'à 93 % en Artois-Picardie). et appréciable pour les industries non raccordées (33 %). ainsi que pour l'irrigation (environ 27 %) ; l'irrigation de complément. qui s'est beaucoup développé en France hors des régions méditerranéennes d'irrigation ancienne -notamment dans le bassin de Paris comme en Aquitaine et en Alsace- fait principalement appel à l'eau souterraine ;
- l'exhaure des mines, globalement modeste (6 %) est notable dans le bassin Rhin-Meuse (30 %).

Au total environ 7 milliards de m³ d'eau souterraine seraient prélevés actuellement (année 1980) en France : 1/5 de tous les prélèvements en eau bruts (hormis ceux des canaux de navigation et de l'hydro-électricité, dans le cas particulier de rejet en mer) ; ce ratio s'élève à près de 40 % si l'on exclut les prélèvements d'eau de surface presque intégralement restitués des centrales thermiques (refroidissement).

Près de la moitié de ces volumes (40 %) est tirée des aquifères alluviaux -et soutirée de ce fait aux rivières en bonne partie-, tandis que plus du tiers est prélevé dans les nappes libres des bassins sédimentaires (dont au moins un milliard et demi de m³/an. soit 20 % du total, dans les seuls aquifères de la craie) et près d'un cinquième est extrait des nappes captives des systèmes multicouches et des aquifères profonds.

Une grande partie des prélèvements est concentrée dans un petit nombre d'aquifères et de champs d'exploitation assez intensive. signalés pour la plupart dans le tableau 7.

Les prélèvements dépassent une centaine de Mm³/an dans dix aquifères, qui à eux seuls fournissent ensemble plus du tiers des productions d'eau souterraine en France, énumérés ci-dessous par ordre de prélèvements décroissants (estimations se référant aux années 1975-1980) :

	en Mm ³ /an
1 - Alsace, aquifère alluvial du Fossé rhénan	480
2 - Basse vallée de la Seine, craie + alluvions	400
3 - Ensemble des systèmes aquifères coalescents de la craie de la région du Nord, au N du seuil de l'Artois (secteurs de Calais à Lille, Cambrai, Valenciennes)	380
4 - Plaine de Lyon, aquifère alluvial (vallée du Rhône)	275
5 - Côte-de-Moselle, aquifère calcaire jurassique	240
6 - Sables du Soissonnais + calcaire grossier. aquifère multicouche éocène, région parisienne et N d'Ile-de-France	190
7 - Vallée de l'Isère, secteur de Grenoble, aquifère alluvial	180
8 - Grès du Trias inférieur en Lorraine (aquifère captif)	164
9 - Beauce, aquifère du Calcaire de Beauce et des sables de Fontainebleau	110
10 - Vallée du Rhône. secteur de Vienne à St Rambert d'Albon, aquifère alluvial	100

Une fraction notable des autres prélèvements est répartie entre quelques dizaines d'aquifères, où ils sont souvent supérieurs à 30 M m³/an, soit environ 1 m³/s (cf. figure 12). Le reste est beaucoup plus disséminé.

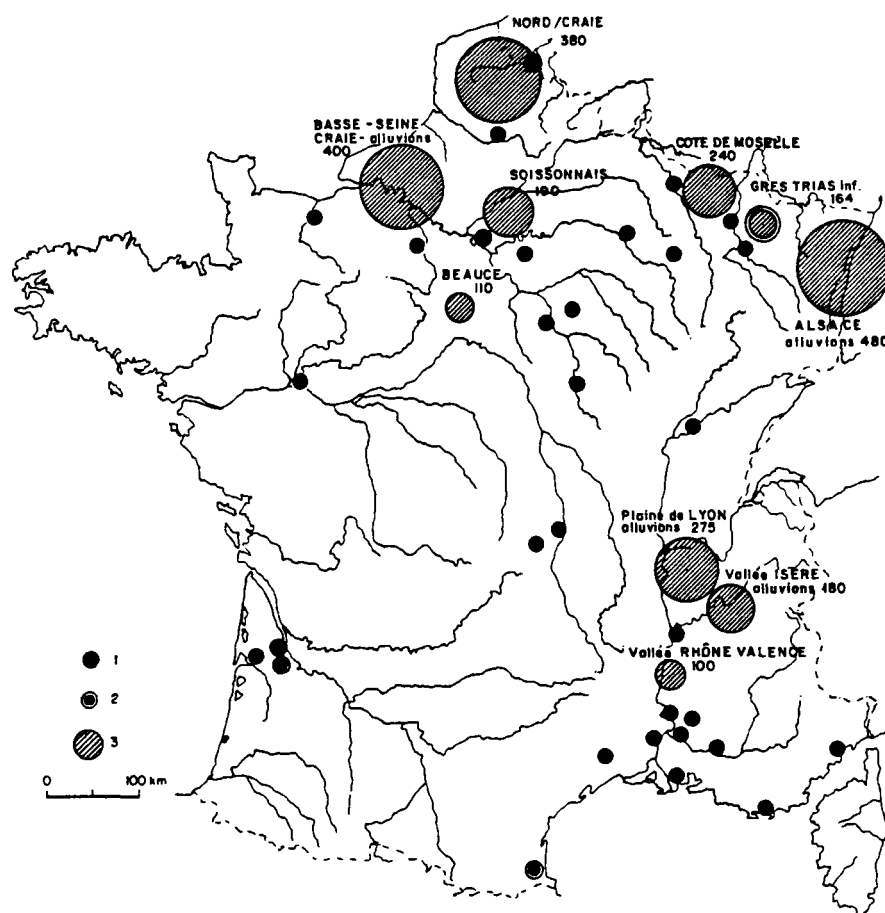


Fig 12 : Principaux champs d'exploitation d'eau souterraine en France (1975-1980).

1. Foyer de champ d'exploitation de 30 à 100 Mm³/an (aquifères libres).
2. id./aquifères captifs.
3. Champ à prélèvement ≥ 100 Mm³/an

Historique des exploitations

L'évolution des prélèvements d'eau souterraine est imparfaitement connue. Ils ont probablement doublé trois fois depuis le début du siècle. L'exploitation des nappes captives -la mieux connue du fait du moindre nombre des forages et de leur réglementation progressive depuis 1935- a eu deux phases d'essor (1920-1940 puis 1945-1970) et s'est stabilisée depuis les années 70.

Après une croissance assez rapide déterminée par celle des demandes en eau au cours des décennies 50 et 60, les tendances observées depuis que le système des redevances permet de dresser des statistiques (premières années 70) montre un net infléchissement global et des évolutions sectorielles différentes : croissance lente, linéaire ou décélérée des prélèvements pour la production d'eau potable, décroissance régulière des prélèvements industriels (conséquences conjointes des mesures de dissuasion des agences de l'eau et du ralentissement des activités économiques), sauf en Rhin-Meuse, croissance irrégulière -et assez mal identifiée- des prélèvements agricoles. Le tableau 12 indique les jalons de ces évolutions de 1970 à 1981 pour les prélèvements des deux secteurs les mieux connus (production d'eau potable, industries non connues (production d'eau potable, industries non raccordées) dans les trois bassins les mieux contrôlés :

Tableau 12 - Evolutions des prélèvements d'eau souterraine en Mm3/an

Bassins (Agence de l'eau)	Production d'eau potable			Industrie non raccordées		
	1970	1975	1981	1970	1975	1981
Artois-Picardie	234	257	293	326	248	201
Rhin-Meuse	198	246	251	557	624	709
Seine-Normandie	721	853	917	545	417	322
Total	1 153	1 356	1 461	1 428	1 289	1 232
%	100	118	127	100	90	86

A l'échelle moins globale d'aquifères définis des évolutions peuvent toutefois s'écarter de ces tendances générales.

Prélèvements et ressources : degrés d'exploitation des eaux souterraines

La comparaison comptable des prélèvements aux flux naturels moyens des nappes -en s'en tenant à cette seule composante physique et quantitative de la ressource en eau souterraine (cf. supra 3)- fait ressortir des taux d'exploitation très variés. A l'échelle de chaque aquifère, ce taux est encore très faible pour beaucoup de nappes libres étendues (quelques %) mais il peut être assez ou très élevé en quelques cas que le tableau 7 a mis en évidence : aquifère de la Beauce 24 %, aquifère des Côtes de Moselle 40 %, aquifère alluvial d'Alsace 48 % ; aquifères de la craie du Nord : 44 % entre la Lys et Dunkerque (compte tenu d'une alimentation artificielle), 97 % entre la Deule et la Scarpe (compte tenu d'apports induits par drainance).

Dans certains aquifères alluviaux des taux d'exploitation très élevés correspondent à des régimes en grande partie artificialisés avec suralimentation induite par les prélèvements : 100 % des apports sont ainsi prélevés dans la plaine de Lyon. C'est également le cas des aquifères multicouches où une exploitation intensive induit des afflux par drainance : taux de 42 % dans l'aquifère des sables inférieurs éocènes du Soissonnais où ce déséquilibre traduit un déstockage. Des taux supérieurs à 100 % correspondent aussi à des diminutions de réserve d'aquifères profonds captifs : le cas le plus notable est celui des grès du Trias inférieur en Lorraine, 328 % (tous ces taux sont relatifs à l'état des prélèvements de la période 1975-1980).

A une échelle plus globale mais moins significative cette comparaison a été tentée par grands bassins, en rapprochant les données des tableaux 8 et 11 : le tableau 13 indique des taux d'exploitation moyens supérieurs à 15 % dans quatre bassins sur six, et de 14 % pour la France entière, ce qui n'est pas négligeable à ce niveau d'intégration.

Tableau 13 - Taux d'exploitation des eaux souterraines par bassin

Bassins	Ratio prélèvements/flux moyens naturels des aquifères régionaux %
Adour-Garonne	4,5
Artois-Picardie	17,5
Loire-Bretagne	12
Rhin-Meuse	16
Rhône-Méditerranée	17,4
Corse	
Seine-Normandie	15,2
Total France	14

Problèmes

Différents problèmes d'ordre quantitatif sont d'abord les conséquences des exploitations elles-mêmes, qui rendent celles-ci plus difficiles ou ont des incidences externes sur d'autres activités :

- Tout d'abord l'exploitation de quelques aquifères ou secteurs d'aquifères, peu nombreux ni étendus mais à rôle notable dans l'économie de l'eau régionale, plafonne en pratique et il y devient difficile d'augmenter les prélèvements -voire de les maintenir- même en multipliant les ouvrages ou en accroissant artificiellement les apports (pratique encore restreinte en France à une dizaine d'opérations locales). Par ailleurs une modulation pertinente -saisonnière, voire interannuelle- des prélèvements s'avère souhaitable dans certains cas d'aquifère à capacité faible ou mal déterminée dont l'exploitation se développe, comme ceux des terrains de socle ; des méthodes de réglage et de prévision s'esquissent. Les situations de "surexploitation" caractérisée, avec déséquilibre non imputable à la seule croissance des prélèvements, sont néanmoins rares en France. Le problème de la stabilisation des prélèvements se pose en quelques cas, moins pour instaurer un rééquilibrage non nécessairement menacé à l'échelle de l'aquifère que pour conserver des niveaux dynamiques convenables pour les appareils de production.
- Les amples abaissements de niveau déterminés localement, parfois à l'échelle régionale, par des exploitations intensives, et non stabilisés en certains cas, qui affectent quelques aquifères à nappe libre (craie dans le Nord) et plus généralement des aquifères à nappes captive (Calcaire carbonifère dans la région de Lille, Soissonnais au Nord de la région parisienne, Sables verts dans le centre du bassin de Paris, grès du Trias inférieur en Lorraine particulièrement) ont en effet affaibli les productivités et grèvent les coûts de production. Le jaillissement des forages a en général disparu. Ces rabattements n'ont, par contre, pas eu de répercussions sensibles sur la stabilité du sol : des cas de "subsidence" ayant cette cause n'ont pas été observés en France.
- La concentration des ouvrages en plusieurs zones, notamment urbaines, a provoqué ou laisse prévoir des conflits d'usage (notamment si les utilisations thermiques se développent).
- En quelques régions le vieillissement des forages profonds, souvent assez anciens, nécessite le diagnostic de leur état et leur restauration ou leur remplacement.
- Des réductions de prélèvements locaux, notamment industriels, dans des aquifères de sub-surface anciennement exploités -comme dans la région parisienne- ou la fermeture de mines avec arrêt de l'exhaure, provoquent depuis quelques années des remontées de niveaux de nappes libres qui gênent l'occupation du sous-sol et engendrent de nouveaux genres de conflits.

Plus généralisés et plus amples, des problèmes de qualités posés aux utilisateurs d'eau souterraine sont davantage dus aux impacts de diverses activités des occupants du sol qu'aux effets des exploitations :

- . L'expansion de la pollution diffuse des nappes libres, notamment dans les domaines d'agriculture intensive par les fertilisants, tout particulièrement les nitrates -dont les teneurs dépassent déjà 50 ppm en divers secteurs localisés et peuvent approcher de 100 ppm- est le fait le plus préoccupant. En 1985, 1 200 000 habitants étaient alimentés en France par de l'eau à teneur supérieure à 50 ppm, dont les 2/3 d'origine souterraine. En outre une croissance de ces teneurs est prévisible jusqu'en 1990 et 2000. même si des réductions assez amples des intrants étaient opérées.
- . De manière plus ponctuelle et plus aléatoire, diverses pollutions chimiques d'eau souterraine de subsurface surviennent chaque année, à la suite d'accident de transport de matière nocive, de défaillance de processus industriel ou de conséquence d'accident (incendie, etc.), de défaut de confinement de dépôt de déchets superficiel ou souterrain, ou encore de déficience de système d'assainissement et d'épuration d'eau usée. Leurs durées sont très variables ; certaines ont une origine ancienne et ne se résorbent que très lentement. Exemple : la pollution saline de la nappe des alluvions de la plaine d'Alsace, qui a commencé en 1910, à partir des terrils des mines de potasse, et qui s'étend sur 70 km.
- Les eaux souterraines captées pour l'alimentation en eau potable, souvent exposées à des risques de pollution, sont insuffisamment protégées du fait du retard de mise en place des périmètres de protection sanitaire des captages, définis et légalisés complètement en France dans moins de 10 % des cas seulement.
- Des altérations de qualités induites par l'exploitation ayant provoqué le déplacement d'eau salée -aquifères littoraux à interface avec l'eau de mer surtout, certains aquifères profonds- sont rares et localisées en France. Le risque d'en provoquer limite, néanmoins les possibilités d'exploiter certains aquifères.

5 - ADMINISTRATION ET GESTION

Le droit des eaux souterraines en France

Principe général : le **droit d'accession** et **d'appropriation de l'eau souterraine** est attaché à la propriété foncière (Code civil). Aucune eau souterraine n'est **domaniale**, sauf dans les départements d'Outre-Mer (depuis une loi de 1973), ni "res communis" à l'instar des eaux de surface non domaniales.

La législation française a institué toutefois plusieurs régimes spécifiques aux eaux souterraines qui réglementent et restreignent en partie les actes à leur endroit dans un but de conservation et de protection des ressources :

- **Déclaration** obligatoire des prélèvements (au-dessus de 8 m³/h) par les exploitants -et des désaffectations d'ouvrage-, similaire à un état-civil, instituée par la loi sur l'eau de 1964 (art. 40).
- Régime d'**autorisation** des forages de production d'eau institué par un décret de 1935 et ses extensions ultérieures (dernière en date : 1985) dans plusieurs départements. au-dessus d'un "débit escompté" et au-delà d'une profondeur variant selon les zones (2 à 80 m) : restriction du droit d'accession à objectif conservatoire ("protection" quantitative des eaux souterraines).
- **Interdiction** de tout déversement et rejet d'eau usée susceptible d'altérer la qualité d'eau souterraine (loi sur l'eau de 1964, art. 40), concurremment avec la réglementation relative aux "établissements classés" (décret de 1977).
- Assujettissement légal des exploitants à des redevances de prélèvement fixées et perçues par les agences financières de bassin. dites plus communément agences de l'eau.

Des régimes particuliers, similaires aux concessions minières, s'appliquent aux eaux thermales et minérales et à la géothermie.

Les acteurs

Des agents économiques nombreux, de catégories variées et à objectifs différents, ont la capacité juridique et le pouvoir économique d'exploiter directement l'eau souterraine :

- La plus grande partie des 14 000 unités de gestion de production-distribution d'eau potable qui alimentent les populations et les entreprises des 36 000 collectivités locales (communes) exploite. à cette fin, l'eau souterraine : 85 % des communes, groupant 60 % de la population française sont approvisionnées par eau souterraine (captée par puits ou forage) ou par eau de source.
- Près de 30 % des agriculteurs irrigants (= 38 400 exploitants agricoles) utilisent l'eau souterraine, pour arroser environ 1/3 de la superficie irriguée totale (selon le recensement agricole de 1970).

- Des milliers d'entreprises industrielles ou tertiaires non raccordées s'auto-alimentent en eau par prélèvement direct d'eau souterraine (cf. tableau 11).
- Les industries extractives (mines, carrières) sont également préleveuses d'eau souterraine (exhaure) plus localement, mais de manière notable, on l'a vu.
- Depuis quelques années des utilisateurs de l'énergie géothermique de moyenne ou basse enthalpie exploitent l'eau souterraine chaude profonde sans guère empiéter sur les champs d'action des précédents. Toutefois les quelques 25 000 pompes à chaleur sur eau souterraine "ordinaire" peu profonde installées depuis les années 70 pour le chauffage, indiquent le développement d'une nouvelle catégorie d'agents exploitants, individuels ou collectifs.

D'autres agents, également nombreux, ne sont pas exploitants mais génèrent par leur activité des impacts chroniques ou accidentels sur l'eau souterraine, sur ses quantités et son régime et surtout sur ses qualités : agriculteurs (par le drainage et l'emploi de fertilisants), gérants de stocks superficiels ou souterrains de matières utiles mais dangereuses pour l'environnement ou de déchets, divers occupants du sol et transporteurs (cf. supra 4).

Tous ces acteurs sont nombreux et différenciés, même dans le cadre de la plupart des systèmes aquifères régionaux individualisés, où les incidences de leurs actions peuvent interférer et parfois se contrarier. Leur harmonie, la conciliation d'intérêts variés parfois contraires et la primauté des objectifs d'intérêt général ne s'instaurant pas spontanément, ni ne résultant du seul jeu du marché -peu efficient dans ce domaine-, des interventions sur la **gestion** des eaux souterraines émanant d'autorités publiques sont communément jugées nécessaires et pratiquées en France, en particulier pour résoudre ou atténuer les problèmes signalés plus haut (4).

Les objectifs de gestion

Des objectifs de gestion des eaux souterraines diffèrent selon les situations régionales, tant selon les états actuels des ressources en quantités et en qualités que selon les finalités socio-économiques d'utilisation des eaux souterraines et selon les modes et degrés de leur liaison avec les eaux superficielles. Les objectifs les plus courants, eux-mêmes à concilier, sont soit de l'intérêt commun des utilisateurs, soit de l'intérêt collectif plus général. Il s'agit de :

- satisfaire les demandes en eau des agents qui utilisent l'eau souterraine -en quantité comme en qualité- en les protégeant tant contre eux-mêmes (prévention des excès d'exploitation nuisant à la conservation de la ressource, prévention et arbitrage des conflits d'usages), que contre des tiers générateurs d'impacts préjudiciables : donc résoudre les problèmes énumérés plus haut (4) ;
- allouer la ressource en eau souterraine à des utilisations prioritaires du point de vue de l'intérêt général, principalement l'alimentation en eau potable des populations (en partie pour contribuer à assurer la sécurité des approvisionnements) ;

- intégrer dans certains cas l'utilisation des aquifères dans des aménagements de maîtrise des eaux, en tirant parti de leur capacité régulatrice ;
- concilier l'utilisation des eaux souterraines et diverses formes d'occupation du sous-sol valorisantes ;
- préserver certains rôles naturels des eaux souterraines, notamment comme facteur du régime des cours d'eau de surface (étiage) ou de la permanence de plans d'eau superficiels.

Bien souvent la gestion des eaux souterraines ne peut donc être abstraite de la gestion des eaux dans leur ensemble, ni parfois de la gestion de l'espace souterrain.

Les intervenants et les instruments de gestion

Deux sortes d'autorités de gestion coexistent en France et disposent chacune en propre de l'une des deux catégories d'instrument d'intervention sur les comportements des acteurs directs cités :

- La puissance publique a d'abord le pouvoir et la charge de faire appliquer les réglementations en vigueur indiquées plus haut (régimes de déclaration et d'autorisation, surveillance administrative, sanctions des contrevenants). L'administration compétente principale est, depuis 1976, le Ministère de l'Environnement, qui délègue toutefois l'exercice décentralisé de ses responsabilités de police des eaux souterraines aux services extérieurs, départementaux ou régionaux, des ministères de l'Industrie, de l'Agriculture ou de l'Équipement, selon une règle de répartition assez complexe. Ces autres ministères à compétences sectorielles, ainsi que celui de la Santé publique, ont en outre des responsabilités particulières (Police des "établissements classés", générateurs possibles de pollution, réservation et protection sanitaire des ressources utilisées pour l'alimentation publique en eau potable, réglementation des captages d'eau minérale ou thermale). Une réglementation spéciale vise à protéger les qualités d'eau souterraine exploitée pour produire de l'eau potable, par des servitudes imposées aux occupants du sol dans un périmètre approprié dans chaque cas, conseillé par un hydrogéologue expert officiel puis institué par une Déclaration d'utilité publique.
- Les six agences financières de bassin -instituées par la loi sur l'eau de 1964- sous la tutelle du Ministère de l'environnement mais dotées d'une large autonomie, interviennent par des instruments financiers, notamment pour ce qui concerne l'eau souterraine, pour contribuer à la protection et à l'allocation des ressources. Deux formes d'incitation "économique" sont pratiquées : dissuasion par les redevances, ou stimulation par des aides (crédits).

Des redevances sur les volumes d'eau souterraine prélevée (au-dessus d'un certain seuil horaire ou annuel) et dans certains cas sur les volumes consommés nets (non restitués), variables selon les bassins, les zones, parfois les saisons, sont perçues par les agences.

La fixation de leur montant -notamment leur différence par rapport à la redevance sur les prélèvements (ou les consommations) d'eau superficielle, ou leur variations selon les utilisations (par le jeu de dégressivité)- en font un moyen indirect d'allocation de ressource. Le montant de ces redevances, qui reste faible (gamme de 0.008 à 0.35 F/m³ pour les prélèvements, 0 à 0,17 F/m³ pour les consommations. en 1985) pèse peu sur les coûts de production d'eau, accrus seulement de un à quelques %.

Réciproquement des incitations par aide financière, pratiquées par les agences, et aussi par certaines administrations, visent à stimuler une plus grande "mise en valeur" de l'eau souterraine dans les zones où son exploitation est négligée et où la ressource est abondante. par prise en charge du "risque géologique" d'échec des forages (en terrain difficile, ...) ou au contraire, à favoriser le recours de certains agents à une ressource de substitut (superficielle) afin de réserver l'eau souterraine à des utilisations prioritaires. Ces aides s'appliquent aussi aux études et aux mesures de protection sanitaire des captages publics d'eau potable.

Ainsi des intervenants publics généraux -ou "régionaux" à l'échelle des grands bassins- conjuguent des responsabilités partagées de gestion d'utilisations d'eau sectorielles (alimentation en eau rurale ou urbaine, agriculture, industries et mines, transport, ...) et de gestion des ressources en eau par milieu -notamment celle de l'eau souterraine incluse en partie dans la gestion des ressources du sous-sol. Une division "horizontale" des compétences et des pouvoirs entre ces intervenants, qui agissent chacun par une voie propre, l'emporte de fait sur une répartition "verticale" entre des "autorités de gestion" spécifiques à chaque champ territorial de ressource en eau souterraine, qui interviendraient dans tous les secteurs d'utilisation et seraient dotées chacune de l'ensemble des instruments de gestion.

Les aides aux décisions de gestion

Pour éclairer les prises de décision -les opportunités et les modalités d'application des instruments de gestion passés en revue-, les administrations et organismes qui interviennent dans la gestion des eaux souterraines s'appuient sur des connaissances et des prévisions qui résultent elles-mêmes d'études générales, de suivis des situations évolutives et de calculs.

Les inventaires méthodiques, les accumulations de données de base dans des banques informatisées et leur synthèses structurées périodiques -notamment cartographiques-, les suivis de variables par des réseaux d'observation piézométriques et hydrochimiques, mentionnés plus haut (3) concourent tous à entretenir et actualiser l'état des connaissances hydrogéologiques qui permettent des analyses de situation pertinentes. Néanmoins dans certains cas des études particulières sont entreprises à la demande des autorités de gestion pour traiter des problèmes spécifiques, notamment en matière de prévision.

Comme on l'a signalé (3), des modèles de simulation numérique, soit hydrodynamiques, soit globaux ou stochastiques, de nombreux systèmes aquifères sont couramment employés en France pour prévoir les influences de prélèvements supplémentaires projetés -objets de demande d'autorisation ou de programmes de développement- ou bien pour pronostiquer à court terme des évolutions de variables naturelles (niveau de

nappe, débit de source, teneur de l'eau en substance déterminante pour ses qualités -nitrates- ou température, ...). Ces outils de prévision sont devenus des instruments d'aide aux décisions de gestion de toute première importance.

Une grande partie des investigations, des oeuvres de synthèse, des exploitations de réseaux d'observation, de la constitution de banques de données et de leur maintenance, de l'élaboration et de l'emploi de modèles de simulation dits "de gestion", relève de la mission de Service public "Eaux souterraines" confiée au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Service géologique national), établissement public opérateur des Ministères de l'Industrie et de l'Environnement, et assistant technique -non exclusif toutefois- des administrations et organismes qui interviennent dans la gestion des eaux souterraines en France.

En conclusion

La gestion des eaux souterraines en France, au sens d'orientations et d'encadrement par la puissance publique, par l'administration et ses instances régionales, des actes des multiples agents qui utilisent ou influencent l'eau souterraine :

- repose sur la reconnaissance d'une réalité : l'unité des ressources en eau. La gestion des eaux souterraines n'est pas séparée de celle des eaux superficielles ; elle tend à s'intégrer dans la gestion des eaux en général ;
- se fonde sur un principe : protéger les droits et les intérêts particuliers des utilisateurs en les subordonnant néanmoins à l'intérêt général ;
- s'efforce de concilier plusieurs objectifs : satisfaire autant que possible les différentes demandes en atténuant les conflits d'usage, privilégier et développer les utilisations prioritaires, conserver et protéger la ressource en quantité et en qualités pour réserver l'avenir ;
- s'adapte à une nécessité : ajuster le niveau des décisions de gestion aux cadres régionaux naturels, qui englobent les champs d'action locaux, parfois interférant, de nombreux agents individuels dont il faut policer la cohabitation ;
- procède d'une volonté : décentraliser les interventions de gestion et éviter d'imposer aux usagers des contraintes ou contrôles administratifs prématurés ou inutiles ; favoriser la prise de conscience par les agents usagers qu'ils ont la ressource en partage et que les conditions naturelles les solidarisent, afin de les responsabiliser et de leur faire accepter une discipline commune ;
- cultive une ambition : coordonner les voies et moyens d'intervention de natures et de portées variées qui relèvent des compétences de diverses autorités ;
- se fixe pour règle : d'appuyer les décisions de gestion sur des bases et démarches scientifiques et sur des connaissances entretenues des situations.

6 - FORMATION ET COOPERATION :

Formation :

La formation des hydrogéologues professionnels est assurée en France principalement par l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie Appliquée de Nancy et par plusieurs universités (Besançon, Bordeaux, Montpellier, Paris -en plusieurs centres- et d'autres) qui dispensent leur enseignement surtout à des étudiants ayant reçu d'abord une formation générale en géologie. L'école de Nancy comporte en 3ème année une option "hydrogéologie" et a formé près de 200 ingénieurs-géologues dans cette spécialité depuis une quarantaine d'années.

Les enseignements universitaires sont en partie compris dans des programmes de formation plus larges soit dans le champ de la géologie appliquée, soit dans celui des sciences et techniques de l'eau, et sont souvent associés en fin de cursus à des actions de recherche (thèses de doctorat). Une réforme récente (1985) a fédéré, pour délivrer un unique "diplôme d'études approfondies" (D.E.A.) en hydrologie, plusieurs de ces centres universitaires et le Centre d'Informatique géologique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, qui conjuguent ainsi leur spécialités complémentaires.

Plusieurs autres grandes écoles d'ingénieur mettent aussi à leur programme quelques matières relatives aux eaux souterraines, adaptées à leur vocation propre, mais pouvant en outre contribuer à la spécialisation d'hydrogéologues, principalement en hydrodynamique, applications de l'informatique, connaissance et gestion des ressources en eau, techniques d'exploitation : Ecole Nationale Supérieure du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique et d'Hydraulique (Toulouse), Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique (Grenoble), Institut de mécanique des fluides de l'Université Louis Pasteur (Strasbourg), Conservatoire national des Arts et Métiers.

Enfin, des sessions de "formation continue" ou de "recyclage" sont organisées par plusieurs de ces établissements d'enseignement supérieurs -notamment l'Ecole des Mines de Paris, l'Ecole des Ponts et Chaussées- ainsi que par des organismes spécialisés, comme le Centre de formation international à la gestion des ressources en eau (CEFIGRE, à SOPHIA-ANTIPOLIS) ou la Fondation de l'Eau (à LIMOGES)- dans le cadre de programmes diversifiés-, et par des établissements d'études et de recherches spécialisés tels que le BRGM.

Tous ces enseignements et formations sont largement ouverts à des étrangers, principalement francophones, notamment des pays en développement.

La coopération*

La coopération française en matière d'hydrogéologie ne se limite pas au seul champ des pays francophones en développement. Elle y est toutefois particulièrement active pour diverses raisons :

- parce que les organes de la recherche scientifique et technique française ont tissé des liens qui ont largement dépassé les anciennes relations officielles de l'ex-Communauté, en ouvrant leurs laboratoires et leurs missions aux acteurs africains de la recherche pour le développement ;
- parce que le champ traditionnel d'action de la coopération française est dans une large mesure situé en zone aride et semi-aride : la recherche hydrogéologique française s'est développée au Maghreb, au Sahel, à Djibouti, toutes régions où l'eau souterraine revêt une importance vitale, et où sa recherche pose de difficiles problèmes ;
- parce que la conception française du recours à l'eau souterraine est solidement fondée sur des concepts sanitaires pastoriens, sur des soucis de technologie appropriée le moins possible différents des moyens traditionnels, sur des entreprises de forage d'eau particulièrement dynamiques et novatrices.

La coopération française s'exerce de diverses manières :

- par le soutien -exclusif ou partagé avec d'autres états et organisations internationales- de grands programmes d'aides à la création de points d'eau : de nombreuses équipes d'hydrogéologues (organisations publiques, privées et non gouvernementales) pratiquent l'hydraulique villageoise en Afrique de l'Ouest.
- par la mise en place d'assistants techniques conseillers et experts auprès de divers Ministères de l'Hydraulique de la plupart des Etats francophones, ainsi que de structures régionales telles que le Comité inter-africain d'études hydrauliques aux activités opérationnelles.
- par une recherche, étroitement liée à la formation, qui permet de développer des programmes sur des thèmes majeurs tels que la recharge des nappes souterraines sous climat aride. l'hydrogéologie des roches fracturées.

La coopération scientifique, avec des pays développés sujets aux contraintes et aux nuisances d'une civilisation à technologie avancée est aussi activement soutenue par le Ministère des Affaires Etrangères. Les objectifs de ces recherches sont la gestion de la qualité des eaux, la prévention de leur pollution, la gestion des déchets à haut risque ; ils donnent lieu à des coopérations aussi bien avec les Etats Unis et le Canada qu'avec la plupart des pays européens de la CEE, la Suisse, ou encore divers pays d'Europe de l'Est. Les principaux thèmes méthodologiques concernent des modélisations, des migrations des solutés, le comportement hydraulique exposé à des contraintes et à des effets thermiques, les phénomènes d'échanges eau/roche, la dénitrification. etc...

* rédigé en collaboration avec JJ COLLIN

REFERENCES

1 - Généralités - Géographie, climatologie, hydrologie générale, géologie

- ARLERY R. (1979) - Les climats de la France. (La Météorologie. n° 16, mars, p. 121-1 256, Soc. Météor. Fr., Boulogne).
- BEAUJEU-GARNIER (1953) - Le relief de la France (Paris).
- CASTANY G. (1977) - Bilan d'eau de la France. Evaluation des ressources en eau. Evolution des prélèvements et prévisions pour l'an 2 000. (UNESCO-O.M.M., 2e réunion probl. eau Europe, Bruxelles. sept. 1977).
- DEBELMAS J. (1974) - Géologie de la France (Doin, 2 vol.. Paris).
- DOTTIN O., GOGUEL J. et al. (1980) - Carte géologique de la France. et de la marge continentale à 1/1 500 000 et notice explicative. 102 p. (Bur. Rech. Géol. Min., Orléans).
- MARTONNE (De) E. (1947) - Géographie physique de la France. (A. COLIN. 2e éd. Paris).
- MARTONNE (De) E. (1955) - France physique. Chap. XVI - L'Hydrographie. généralités (in Géographie Universelle, VI. La France, p. 358-390. A. COLIN, 3e éd. Paris).
- POMEROL C. et al. (1980) - Géologie de la France, grands itinéraires (et "Geology of France") - (Masson, Paris).

2 - Hydrogéologie

a - Sur l'ensemble de la France

- ALBINET M. (1970) - Carte de vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine de la France à 1/1 000 000. (Ed. DATAR-BRGM. Paris, Orléans).
- ANONYME/BRGM (1970) - Atlas des eaux souterraines de la France. (DATAR. éd. BRGM, Orléans).
- ARLAB (1982) - Bilan des ressources en eau souterraine de la France. (Comm. Commun. Eur. - EUR 7943 FR.. 268 p + annexes. Publ. Th. Schäfer Druckerei GmbH, Hannover).
- BODELLE J., MARGAT J. (1980) - L'eau souterraine en France (Masson. 208 p., Paris).
- DELAROZIERE-BOUILLIN O., FORKASIEWICZ J., MARGAT J. (1977) - Variations de l'alimentation des nappes en France : une donnée importante pour la gestion des nappes d'eau souterraine. (Coll. nat. "Eaux souterraines et approvisionnement en eau de la France", BRGM. Nice, oct. 1977, T.I., p. 203-22, Orléans).

- LAFFITTE P., RICOUR J. (1956)** - La recherche minérale la plus importante de la France métropolitaine : l'eau. Rôle de l'hydrogéologue (Rev. industrie minérale, janv. Paris).
- LANDREAU A., LEMOINE B. (1977)** - Carte de la qualité chimique des eaux souterraines de la France (à 1/1 000 000) et notice explicative. (Minist. Envir. Cadre de vie/BRGM, doc. 77 SGN 606 HYD, Orléans).
- MARGAT J., EMSELLEM Y. (1970-1971)** - Collecte et stockage des informations sur les caractéristiques hydrodynamiques des réservoirs aquifères et l'état des réserves d'eau souterraine (Soc. hydrot. Fr., Paris, oct. 1970, C.R. XIe journée hydraulique. BRGM. Bull., 2e série, III, 1971, n° 3, p. 3-10.)
- MARGAT J. (1977)** - Définition des principaux systèmes aquifères du territoire français. (Coll. nat. eaux sout. approv. eau Fr. Nice. T. II, p. 371-378, BRGM, Orléans).
- MARGAT J. (1979)** - Carte hydrogéologique de la France à 1/1 500 000 et Notice (éd. BRGM 1980, Orléans).
- MARGAT J. (1982)** - Bilans des nappes d'eau souterraine en France. (Coll. intern. "Calcul du bilan des eaux souterraines". Com. bulg PHI/UNESCO, Varna, sept.-oct. / et note BRGM, 11 p.).
- POINTET T. (1982)** - Les réseaux piézométriques et la situation des ressources en eau souterraine en France. (C.E.M.P.E., 4e conf. intern. planif. et gest. eaux, Marseille, mai. Doc. BRGM 43, I. pp. 133-140, Orléans).
- RISLER J.-J. (1973)** - Carte des eaux minérales et thermales de la France, à 1/1 000 000. (BRGM, Orléans).

b - Bibliographie régionale essentielle

Articles, cartes et documents de synthèse modernes.

- ALBINET M. et al. (1967)** - Carte hydrogéologique du Bassin de Paris à 1/500 000. (BRGM, Orléans).
- ASTIE H. et al. (1969)** - Synthèse des études sur le système multicouche des nappes tertiaires du Nord de l'Aquitaine. (La Houille blanche, p. 907-918, Grenoble).
- ASTIE H., CHAMAYOU J. et al. (1977)** - Les eaux souterraines en Gironde. Cartes à 1/500 000. (Doc. BRGM, 26 cartes, 55 p.. Pessac. Orléans).
- BABOT Y., MAIAUX Cl., RICOUR J. (1962)** - Le réservoir des grès du Permo-Trias en Lorraine. Utilisation actuelle et perspectives de valorisation. (Tec. Sc. municip. - L'eau, n° 3, mars. p. 123-140. Paris)

- BESBES M., De MARSILY G., PLAUD M. (1978) - Bilan des eaux souterraines dans le bassin aquitain (Mém. Assoc. intern. hydrogéol.. Vol. XI, conf. de Budapest, pp. 294-303. Budapest).
- CAOUS J.Y., COMMON D., ROUX J.C. et al. (1976-1980) - Atlas hydrogéologiques départementaux des régions de Picardie et de Haute-Normandie. Aisne, Eure, Oise, Seine-Maritime, Somme. Avec cartes hydrogéologiques à 1/100 000 et notices (BRGM, Amiens, Rouen).
- CAOUS J.Y., ROUX J.C. (1980) - Ressources en eau souterraine de la Picardie (Bull. BRGM(2), III, hydrogéologie-géol. de l'ing. 1.1980-1981, p. 19-52, Orléans).
- CASTANY G., MEGNIEN Cl. et al. (1974) - Les bassins de la Seine et des cours d'eau normands. T1 - Ressources d'eau et données hydrologiques. Fasc. 4 - Eaux souterraines. (Miss. dél. bass. Seine-Normandie/Ag. fin. bass. Seine-Normandie. Paris).
- CAZAL A., PLAUD M., POUCHAN P., VOUVE J. (1969) - Esquisse hydrogéologique des nappes profondes de l'Aquitaine orientale. (Mém. BRGM. n° 76, p. 795-819, Orléans).
- DESPREZ N., MEGNIEN Cl. et al. (1975) - Atlas hydrogéologique de la Beauce. Cartes (à 1/250 000) et Notice explicative. (Doc. BRGM. 2 cartes, 135 p., Orléans).
- DIFFRE P. (1972) - Hydrogéologie de Paris et de sa banlieue. (La Houille Blanche, n° 8, p. 665-671. Grenoble).
- DROGUE C., LATY A.M., PALOC H. (1983) - Les eaux souterraines des karsts méditerranéens. Exemple de la région pyrénéo-provençale (France méridionale). (Hydrogéologie - Géol. de l'ing.. 4. p. 293-312. Ed. BRGM Orléans).
- DUPRAT A., SIMLER L., VALENTIN J. (1979) - La nappe phréatique de la plaine du Rhin en Alsace. (Thèse Et. Univ. Louis Pasteur. Strasbourg et Doc. Cons. Europe, Groupe trav. Nappe phréatique rhénane).
- FLANDRIN J., PALOC H. (1969) - Contribution à la connaissance du réservoir aquifère de la Fontaine de Vaucluse. (Mém. BRGM. n° 76, p. 611-642, Orléans).
- MANIA J. (1978) - Gestion des systèmes aquifères. Application au Nord de la France. (Mém. Soc. Géol. Nord., T. XV - 228 p., Villeneuve d'Ascq).
- MARCHAL J.P. et al. (1977-1983) - Atlas des eaux souterraines départementaux de la Région Languedoc-Roussillon. Aude, Gard, Hérault, Lozère, Pyrénées-Orientales (Minist. Industrie. BRGM. Serv. Géol. rég. Languedoc-Roussillon, Montpellier).

- MEGNIEN Cl. et al. (1970)** - Atlas des nappes aquifères de la région parisienne (cartes à 1/200 000) et Notice explicative. (Minist. dev. indust. scient. Préfect. et District. rég. paris. éd. BRGM Paris).
- MEGNIEN Cl. (1976)** - Hydrogéologie du Centre du bassin de Paris. (Thèse état. Univ. Paris VI, Mém. BRGM n° 98, 1979, 532 p. Orléans).
- PALOC H. (1967)** - Carte hydrogéologique de la France, région karstique nord-montpelliéraine. Notice explicative (Mém. BRGM n° 50. 205 p. + planches et carte à 1/80 000).
- PHALOC H. et al. (1972)** - Carte hydrogéologique de la région des Grands Causses à 1/200 000 et Notice explicative. (CERGA - BRGM. Montpellier - Orléans).
- VOUVE J., CAZAL A., PLAUD M., POUCHAN P. (1969)** - Introduction à l'étude hydrogéologique du bassin d'Aquitaine (Centre d'hydrogéol. Fac. Sc. Univ. Bordeaux, A.F.B. Adour-Garonne. 54 p. + annexes - Talence).
- ANONYME (1975)** - Les ressources en eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse. Carte hydrogéologique à 1/500 000 et Notice explicative. (Miss. dél. bass. Rhin-Meuse, septembre 1975, Moulins-les-Metz).
- COLLECTIF (1969)** - Congrès national d'hydrogéologie. Journées Henri - SCHOELLER (Bordeaux, mars-avril, mém. BRGM, n° 76, 896 p. Orléans).
- COLLECTIF (1971-1976)** - Hydrologie en pays calcaire (1er colloque Besançon, oct. 1971, 2e colloque, Besançon, oct. 1976. 435 p., Besançon).
- COLLECTIF (1977)** - Les eaux souterraines et l'approvisionnement en eau de la France (Colloque national, Nice, Oct. 2 vol., 698 p.. BRGM, Orléans).
- COLLECTIF (1978)** - Hydrogéologie de la craie du Bassin de Paris (Rouen, mai, doc. BRGM 1 & 3, 2 vol. 627 et 155 p., BRGM, Orléans).
- COLLECTIF (1986)** - Le karst de France ("Karstologia", n° sp., Assoc. fr. karstol. - Fédér. spéléo.).

3 - Exploitation et gestion
(en sus des références citées en 2)

- ALBINET M., TIRAT M. (1978)** - Premier essai de recensement des prélèvements d'eau souterraine dans les divers systèmes aquifères du territoire français. (Doc. Minist. Envir. Cadre de vie, BRGM 78 SGN HYD. Orléans).

- BABOT Y., VANCON J.P. (1982)** - Gestion des ressources en eau souterraine par modèles hydrodynamiques, hydrochimiques et hydrothermiques. Exemple de la plaine d'Alsace (C.E.M.P.E., 4e Conf. intern. planif. et gest. eaux, Marseille, mai. Doc. BRGM 43. I pp. 361-366. Orléans).
- BECKELYNCK J. et al. (1983)** - Gestion intégrée des ressources en eau souterraine et superficielle. Le cas de l'alimentation en eau potable de la Métropole lilloise (Proc. intern. Symp. Ground Water Resources Planning. UNESCO, AIH, AISH. Coblentz - août-sept. II. pp. 685-696).
- BODELLE J., TIRAT M. (1977)** - Utilisation des eaux souterraines en France. (Coll. Nat. Eaux sout. approv. eau France - BRGM. Nice. Oct. 1977 - rap. général - thème 2, Orléans).
- BRACHET J. (1975)** - L'action des Agences financières de bassin dans la protection des eaux souterraines. (Association nat. prot. eaux. journées Protection nappes souterraines. Paris, p. 28-37).
- BOURGUET L., DELAROZIERE-BOUILLIN O., DREYFUS A. (1971)** - Etude et cartographie du coût de l'eau souterraine en France. (Minist. Protect. Nature Environnement, BRGM-BURGEAP, avec carte à 1/1 000 000, Orléans, Paris).
- CHERET I. (1972)** - Le système français de tarification pour la gestion de l'eau (in "Gestion de l'eau", O.C.D.E., p. 435-442, Paris).
- CRAMPON N., OLIVIER D. (1975)** - Contrôle de gestion des eaux souterraines en France. Coordination administrative et para-administrative. Exemple de la Moselle. (Comm. intern. irrig. drain., 9e congr. Moscou, R9, question 31, p. 106-134).
- EMSELLEM Y. (1971)** - Modèle mathématique et gestion des ressources en eau souterraine des nappes tertiaires du nord de l'Aquitaine occidentale (Symp. Sci., Intern. Informatique et problèmes de l'eau, Montpellier, I.B.M., p. 149-164).
- ERHARD-CASSEGRAIN A. (1979)** - Comportements socio-économiques et utilisations de la ressource en eau. Cas pratique de l'agglomération tourangelle (Doc. BRGM, 79 SGN 506 HYD, Orléans);
- GERENTE M. (1977)** - Réflexions sur l'action de l'Administration dans le domaine de la gestion et de la police des eaux souterraines. (Colloq. nat. Eaux sout. approv. eau Fr., BRGM. Nice. oct. 1977. T. I, p. 299-306, Orléans).
- LEVY-LAMBERT H. (1965)** - L'utilisation optimale des nappes souterraines (La Houille Blanche. 3. pp. 231-237. Grenoble).
- MARGAT J. (1986)** - La gestion des eaux souterraines en France (Doc. - BRGM, 86 SGN 169 EAU. Orléans).

- MARGAT J., ROUX J.C. (1986)** - Interaction des impacts des aménagements et des exploitations sur les eaux de surface et les nappes souterraines (cas historiques en France). (Soc. hydrot. Fr.. XIX journée Hydr., Paris, sept. III.14, pp. 1-10).
- NICOLAZO-CRACH J.L., LEFROU CL. (1977)** - Les Agences financières de bassin. (Ed. P. JOHANNET, 211 p., Paris).
- OLLAGNON H. (1979)** - Propositions pour une gestion patrimoniale des eaux souterraines : l'expérience de la nappe phréatique d'Alsace (Minist. Agric., RCB n° 36, Mars - Paris).
- PANIER J. (1977)** - La police des eaux souterraines. ("Géologues", Un. fr. géol., n° 41, p. 9-15, Paris).
- RICOUR J. et al. (1983)** - Intégration de la mise en valeur du réservoir des grès du Trias inférieur dans l'aménagement de la Lorraine (Proc. intern. Symp. Ground Water in Water Resources Planning. UNESCO, AIH, AISH. Coblenz août-sept. I. pp. 171-188).
- ROUX J.C. (1985)** - Les hydrogéologues agréés en matière d'hygiène publique ("Géologues", Un. fr. géol.. n° 74-75. pp. 33-42. Paris).
- COLLECTIF (1977)** - Protection des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine (colloq. nat., BRGM. Mars. 4 vol.. Orléans).
- COLLECTIF/PIREN/EAU (CNRS) (1983)** - Aspects économiques et sociaux liés à la gestion des eaux souterraines en milieu alluvial. Le cas de la nappe phréatique d'Alsace. (Proc. intern. Symp. Ground Water in Water Resources Planning. UNESCO, AIH, AISH. Coblenz - Août-sept. I, pp. 223-232).

TABLE DES TABLEAUX

Chapitre 1 : Tableau 1. Les grands bassins fluviaux français

Tableau 2. Climats, températures et précipitations en France

Tableau 3. Budget en eau de la France en année moyenne

Tableau 4. Les trois principaux bassins sédimentaires français

Chapitre 2 : Tableau 5. Caractéristiques des principales formations
aquifères du territoire français

Tableau 6. Productivités des formations aquifères

Tableau 7. Données sur les budgets en eau de quelques systèmes
aquifères en France

Tableau 8. Flux souterrains globaux

Tableau 9. Classification hydrochimique des qualités d'eau
souterraine selon des critères d'usage

Tableau 10. Qualités chimiques des eaux souterraines des
principales formations aquifères

Chapitre 4 : Tableau 11. Prélèvements en eau souterraine en France en 1981

Tableau 12. Evolutions des prélèvements en eau souterraine

Tableau 13. Taux d'exploitation des eaux souterraines par bassin

TABLE DES FIGURES

- Figure 1 : Principaux bassins fluviaux et circonscriptions des agences de l'eau
- Figure 2 : Précipitations moyennes annuelles
- Figure 3 : Evapotranspiration réelle moyenne annuelle
- Figure 4 : Structure géologique de la France
- Figure 5 : Carte hydrogéologique structurale de la France
- Figure 6 : Principaux aquifères à nappe captive du territoire français
- Figure 7 : Répartition des productivités probables des forages d'exploitation d'eau, relatives à la première nappe accessible, en France
- Figure 8 : Situation des systèmes aquifères auxquels se réfèrent les données du tableau 7
- Figure 9 : Alimentation moyenne annuelle des aquifères à nappe libre
- Figure 10 : Qualités chimiques des eaux souterraines (schéma simplifié)
- Figure 11 : Couvertures cartographiques relatives aux eaux souterraines.
Etat actuel
- Figure 12 : Principaux champs d'exploitation d'eau souterraine en France
(1975-1980)

