

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL ET SCIENTIFIQUE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 66.06.60

**RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE
DES GRÈS ET DES ARÈNES DU MASSIF ARMORICAIN**

Travail collectif du SGR-Bretagne

avec la participation de Ph. DAGUE



Service géologique régional BRETAGNE – PAYS-DE-LA-LOIRE

c/o C.S.T.B. chemin de la Bourgeonnière, 44000 Nantes – Tél.: (40) 74.94.49

73 SGN 002 BPL

*Bureau de Recherches
Géologiques et Minières*

BRGM

Nantes, janvier 1973

RESUME

Ce rapport a été réalisé dans le cadre des travaux d'E.R.H. (Evaluation des Ressources hydrauliques) à la demande de Monsieur l'Ingénieur en Chef de l'arrondissement minéralogique de Rennes.

La présence d'eau dans les formations du socle armoricain, ignorée sinon contestée par divers auteurs, est cependant attestée par de nombreux indices (sources, débits de certains cours d'eau en été, forages miniers, exhaure d'anciennes mines de fer, etc ...). Plus difficiles à capter mais souvent moins coûteuses que les eaux superficielles, les eaux souterraines leur sont toutefois supérieures tant pour les caractéristiques organoleptiques, la qualité chimique et bactériologique que par leur souplesse d'utilisation. Leur exploitation rationnelle en fait une ressource complémentaire des eaux de surface, insuffisante vis à vis des besoins très importants, mais qui peut par contre être très compétitive pour l'alimentation en eau de bonne qualité d'agglomérations de petite ou moyenne importance, d'industries (industries alimentaires, notamment), ou pour apporter un appoint non négligeable aux réseaux déficitaires lors des pointes estivales.

Les formations les plus aptes à contenir et à fournir de l'eau sont les arènes provenant de l'altération des roches plutoniques grenues (granites, gneiss ...) et les grès des épaisses formations sédimentaires infracambriennes et primaires. L'application à ces formations des techniques modernes d'exploitation peut permettre d'obtenir par point de captage des débits très supérieurs à ceux fournis par les émergences naturelles.

Localement, les arènes sont susceptibles d'emmagasiner et de restituer annuellement des volumes de 1 500 à 2 000 m³ d'eau par hectare. L'exploitation de l'eau contenue dans les grès nécessite la réalisation de forages, parfois profonds, dont la productivité peut dans certains cas atteindre 100 m³ par heure.

Ces deux types de formations sont très différents par leur nature, leur texture, leurs modes de gisement. Formations de surface souvent peu épaisses et très hétérogènes, les arènes conservent néanmoins une certaine constance de leurs caractéristiques hydrogéologiques essentielles. La définition des zones favorables à l'établissement de captages et celle des genres d'ouvrages à réaliser demandent une étude allant du plus général (recherche, à l'échelle de la région, des secteurs où l'arénisation est la plus favorable) au particulier (implantation, construction et mise en exploitation d'un ouvrage de captage). L'utilisation de l'eau des grès au moyen de forages profonds procède de méthodes de recherches et de techniques d'exploitation différentes. En raison notamment de la tectonique complexe du Massif Armoricaïn, chaque captage aux grès est un cas particulier dont seule une étude géologique préliminaire très détaillée peut diminuer ou supprimer le caractère aléatoire.

.../...

Les ressources en eaux souterraines du Massif Armoricaïn ont été exagérément minimisées. Les eaux souterraines de bonne qualité constituent pourtant un important facteur de développement économique et social et, à ce titre, elles méritent qu'en leur accorde en Bretagne une attention qu'on p'a eu que trop tendance à leur refuser par le passé.

S O M M A I R E

	Page
INTRODUCTION	1
1 - GENERALITES	4
2 - LES ARENES	9
21 . Le phénomène d'arénisation	9
22 . Profil type d'une zone arénisée	10
23 . L'eau dans les arènes	12
24 . Quantité d'eau contenue dans les arènes	14
241 - Résultats fournis par l'étude des débits de basses eaux	14
241.1 - Comparaison d'un bassin versant à substratum schis- teux et d'un bassin ver- sant à substratum granitique	14
241.2 - Bassins versants contenant des proportions variables en roches granitiques	15
242 - Anciens captages à systèmes de drains	18
243 - Amplitude des fluctuations piézométriques	19
25 . Utilisation des nappes d'arènes	20
26 . Localisation des zones où peuvent exister des nappes d'arènes	21
27 . Travaux de recherche - Etudes à entreprendre	23
271 - Recherche stratégique	23
271.1 - Calcul des débits d'étiage	24
271.2 - Méthode des courbes de tarissement	24
271.3 - Démarche à suivre	24
271.4 - Données à recueillir	25
272 - Recherche tactique	25
272.1 - Etudes sur documents	25
272.2 - Travaux de terrain	26
273 - Reconnaissance	26
273.1 - Géophysique	27
273.2 - Forages de reconnaissance, pompages d'essai	27
274 - Mise en exploitation	27

SOMMAIRE (suite)

3 - LES GRES	30
31 . Classification	30
311 - Grès à ciment silicieux	30
311.1 - Grès à ciment silicieux et à grains quartzeux	30
311.2 - Grès à ciment silicieux et à grains de quartz et de feldspath	31
312 - Grès à ciment pélitique	31
313 - Grès à ciment calcaire	32
314 - Grès à ciment ferrugineux	32
32 . Stratigraphie et facies	33
33 . L'eau dans les grès	36
331 - Utilisations possibles des forages profonds aux grès	37
332 - Réalisations connues	38
333 - Indices fournis par les travaux miniers	40
34 . Localisation des formations gréseuses	42
35 . Contraintes d'exécution	43
36 . Travaux à entreprendre . Réalisations possibles	46
361 - Forage d'eau aux grès armoricains dans le Sud du département d'Ille-et-Vilaine	46
362 - Recherches et implantation d'un forage dans les grès de Toul-Lan (Région de Paimpol - Côtes-du-Nord)	48
4 - CONCLUSION	50

<u>Hors texte :</u>	Orientation des recherches d'eau souterraine - échelle 1/500 000, département
	des Côtes du Nord 52
	du Finistère 53
	d'Ille et Vilaine 55
	du Morbihan 56

INTRODUCTION

Le développement des industries, du tourisme, les aspirations de chacun à un confort en accord avec les possibilités et les exigences de la vie moderne entraînent une augmentation considérable des demandes en eau potable.

La Bretagne a des difficultés certaines pour faire face à cette croissance des besoins : les sources importantes et les cours d'eau "propres" situés à distances raisonnables des lieux d'utilisation sont presque tous exploités ; les réseaux de drains, très à l'honneur au début du siècle, donnent des résultats insuffisants ; les bassins d'effondrement à remplissage perméable - sables et calcaires - paraissent rares. Par ailleurs, en certains secteurs (Ille-et-Vilaine) ils sont déjà systématiquement exploités. On est alors amené, faute d'autres ressources à envisager la création de réalisations importantes destinées à emmagasiner l'eau des rivières : retenues collinaires ou grands barrages réservoirs.

Or, certaines des formations qui constituent le sous-sol du Massif Armoricaïn peuvent contenir en quantité notable de l'eau souterraine d'excellente qualité. Ce sont notamment les grès, abondants à différentes étapes de la géologie armoricaine et les arènes, produits d'altération des granites et gneiss, d'où sont issues la majorité des sources actuellement captées. Ces ressources dont l'exploitation, localement et sous certaines conditions, peut être extrêmement intéressante, ont jusqu'à présent été minimisées, niées ou ignorées.

Il ne nous appartient pas d'analyser ici, en détail, les causes de cet état de fait. Il semble qu'il soit dû pour une part à une ignorance certaine d'une fraction importante des sciences et techniques relatives aux eaux souterraines et pour une autre part à un attachement en quelque sorte inconditionnel aux moyens depuis toujours traditionnels en Bretagne de recherche et de captage des eaux potables. Ces moyens étaient parfaitement adaptés aux besoins et aux possibilités de la première moitié du siècle. Depuis, les connaissances théoriques comme les techniques d'investigation et de captage ont fait des progrès considérables. Leur application devrait permettre de résoudre un certain nombre de problèmes dont la solution paraît, actuellement, difficile ou coûteuse.

Certes, il n'existe pas en Bretagne de grandes nappes d'eau souterraine, capables comme dans le Bassin Parisien ou l'Aquitaine d'alimenter de vastes agglomérations. Les nappes du Massif Armoricaïn sont plus rares, leurs ressources plus limitées et plus morcelées ; leur mise en exploitation nécessite sans aucun doute un effort important à la fois scientifique et technique au niveau de la recherche des gisements et des moyens à mettre en oeuvre pour en capter l'eau de façon rationnelle et efficace. Un tel effort, consenti en Ille-et-Vilaine pour les bassins tertiaires, paraît, pour les grès et les arènes, amplement justifié par les avantages offerts par l'eau souterraine :

- *avantages du point de vue de la qualité.*

Alors que les eaux de surface sont très vulnérables et nécessitent des stations de traitement coûteuses, les eaux souterraines sont naturellement protégées contre les pollutions, accidentelles ou délibérées. Cette protection est d'autant plus grande que l'eau est captée profondément (à cet égard, les sources restent très vulnérables).

- *avantages du point de vue de la disponibilité.*

Les eaux souterraines sont contenues dans des réservoirs naturels possédant une certaine inertie qui leur permet de restituer à la demande les quantités d'eau apportées l'hiver par les pluies. Ainsi, une fois déterminé le volume global exploitable annuellement dans un réservoir aquifère donné (*ressources de la nappe*), on peut à tout moment et sans aucune difficulté ajuster parfaitement la production aux besoins. Une telle *fonction régulatrice*, permettant l'exploitation d'un débit *commandé par la demande* n'existe pas dans le cas de captage de sources, dont le débit diminue en été, alors même que les besoins augmentent ; ce n'est qu'artificiellement, par des aménagements parfois très importants, qu'elle peut être obtenue des cours d'eau de surface.

- *avantages du point de vue économique.*

Un captage d'eau souterraine coûte infiniment moins cher que l'édification d'un barrage ou même d'une simple retenue collinaire et de leurs installations annexes.

A propos des coûts moyens de production, Y. CHERET cite dans "L'eau" (1967) les chiffres suivants (ne comprenant pas les adductions) :

- eau souterraine (pompage et amortissement du forage équipé) : 0,09 F par m³
- eau de surface (captage et traitement, non compris l'amortissement des installations) : 0,14 F par m³

En résumé à cette introduction, on peut dire que, sans être riche en eaux souterraines, le sous-sol du Massif Armoricaïn peut, en certaines zones et dans certaines des formations qui le constituent, les grès et les arènes granitiques notamment, contenir des ressources intéressantes,

vraisemblablement suffisantes pour localement pouvoir assurer les besoins de 1 000 à 10 000 personnes par point de captage.

L'insertion de ces ressources potentielles dans un schéma cohérent et raisonné d'aménagement et d'exploitation nécessite un certain effort de recherches de façon à pouvoir les localiser et les définir avec suffisamment de précisions. Cet effort reste très faible eu égard aux besoins encore non satisfaits des populations et au coût croissant des aménagements hydrauliques de surface.

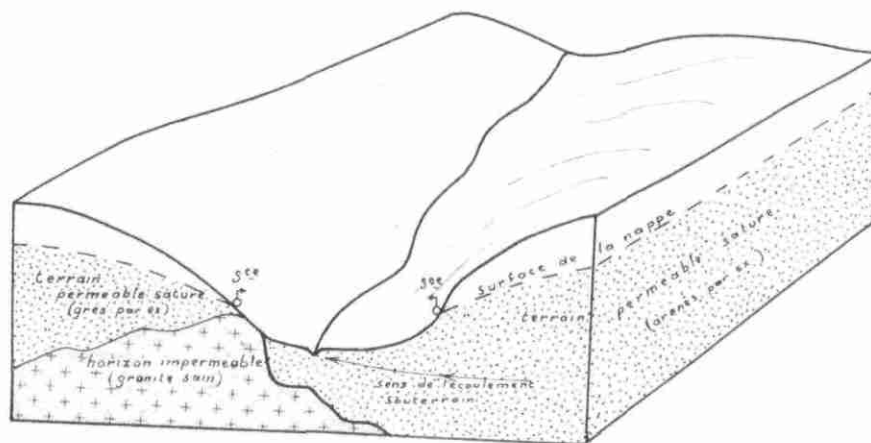
Pour sa part, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Service Géologique National, conscient de l'intérêt des perspectives que peut ouvrir l'utilisation de ces ressources nouvelles a décidé d'affecter en 1973 une part de ses fonds propres (dans le cadre des travaux d'Evaluation des Ressources Hydrauliques) à l'étude plus détaillée de ces problèmes spécifiques du Massif Armoricaïn. Ces travaux concerneront essentiellement les méthodologies de recherche des réservoirs aquifères et les techniques de captage, dont les défauts expliquent un grand nombre des échecs rencontrés jusqu'à présent.

Des réalisations pratiques ne pourront accompagner cette initiative que dans la mesure où elle sera suivie, encouragée et soutenue par les autorités et administrations locales, départementales ou régionales, chargées habituellement des problèmes de l'eau en Bretagne.

1 - GENERALITES

En règle très générale, les sources issues de terrains perméables tels que les grès ou les arènes granitiques sont dues à l'émergence des nappes qu'ils contiennent, provoquée par un phénomène topographique (dépression, rupture de pente) ou lithologique (présence à faible profondeur d'un horizon moins perméable).

L'existence même de sources *pérennes*, qui se présentent rarement sous forme de points isolés, mais plutôt de zones sourceuses, voire d'alignement de zones sourceuses, suffit en elle-même pour démontrer de façon certaine qu'il existe *au-dessus*, des nappes plus ou moins importantes et étendues qui leur ont donné naissance.



Types de sources fréquemment rencontrées dans le Massif Armoricain

Le débit d'une source dépend de la perméabilité des terrains et de la charge hydraulique. La source, à l'endroit où elle sort de terre, abaisse la surface de la nappe, créant ainsi une différence de charge supplémentaire qui provoque à son tour une "aire d'appel" au sein de laquelle les filets liquides, détournés de leur chemin naturel convergent vers l'émergence. Le débit d'une source reste néanmoins limité car :

- les terrains superficiels dont elle sort (terre végétale, limons) ont en général une perméabilité médiocre ;

- la charge hydraulique créée naturellement par la source, éventuellement améliorée par son captage reste très limitée ;

- l'aire d'alimentation (aire d'appel) de la source est elle-même d'extension limitée : la différence de charge qui lui donne naissance est faible, et seuls des filets liquides qui proviennent de l'amont de la source peuvent contribuer à son alimentation. Une source est en effet, très généralement, située à la limite du système aquifère qui l'alimente. Une source issue de terrains poreux ne fournit qu'une faible partie de l'écoulement naturel d'une nappe.

Le débit d'un forage, comme celui d'une source, dépend de la perméabilité des terrains et de la charge hydraulique. La façon dont est conçu et réalisé l'ouvrage est également un facteur extrêmement important.

Alors que dans le cas d'un captage de source on doit se contenter de subir les variations naturelles de l'écoulement, dans le cas d'un forage convenablement implanté et réalisé, on peut agir de façon importante sur ces conditions naturelles en choisissant un endroit :

- où les terrains aquifères ont une perméabilité convenable ;

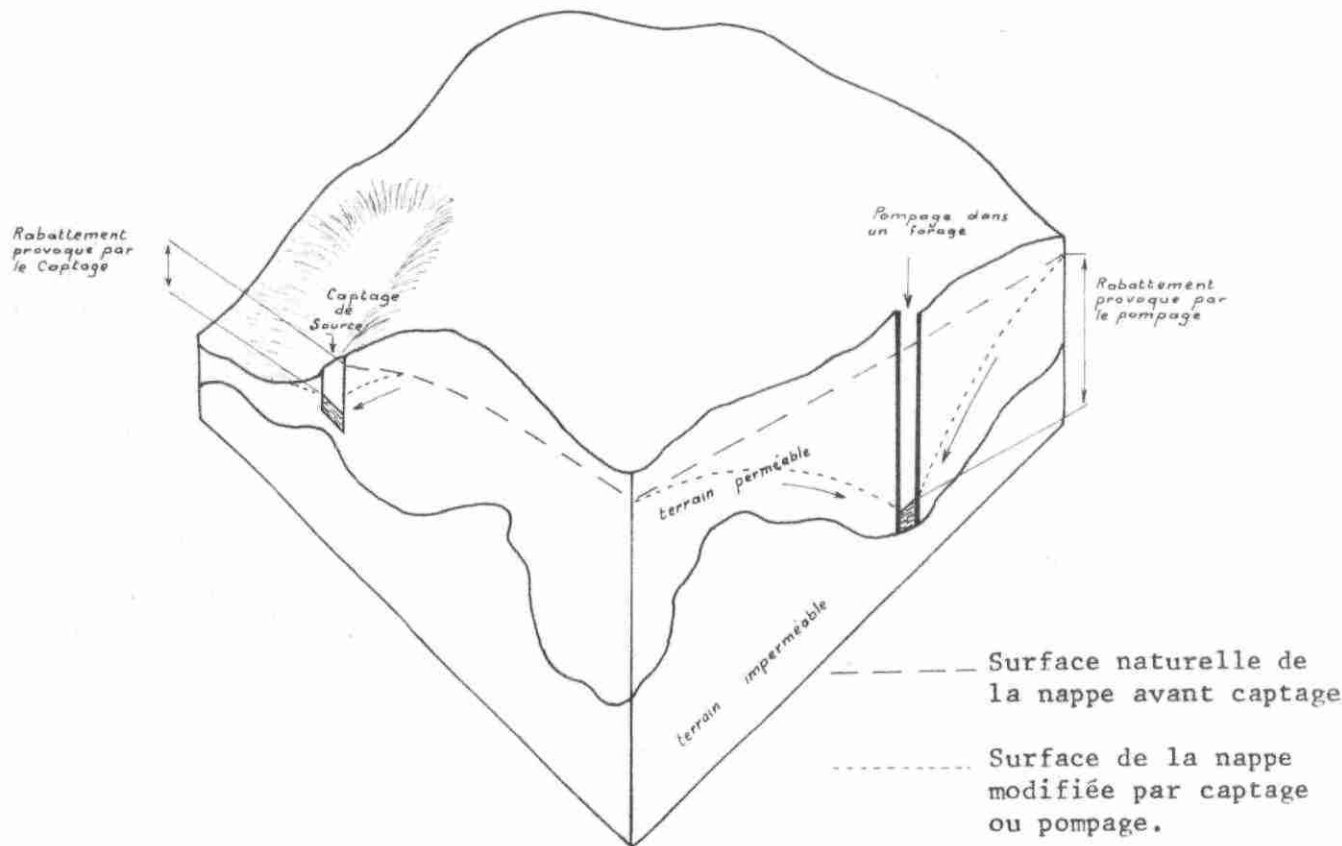
- où ils sont suffisamment épais pour que par pompage dans l'ouvrage on puisse créer un rabattement (charge hydraulique) important ;

- situé loin des limites du système aquifère, de façon à ce que l'alimentation du forage puisse se faire depuis toutes les directions.

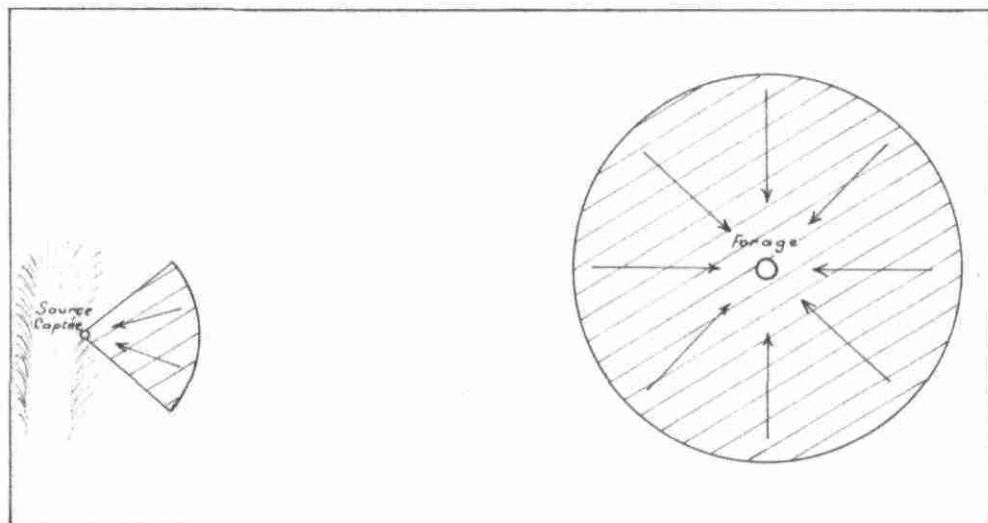
Ajustement des débits aux besoins

Lorsque l'on capte une source, il suffit de connaître son débit d'étiage pour savoir le volume d'eau minimal qu'elle pourra fournir pendant une période donnée.

Comparaison des débits pouvant être fournis par le captage d'une source et par pompage dans un ouvrage convenablement implanté.



1 Coupe - Influences possibles des deux modes de captage sur la charge hydraulique (à laquelle le débit est directement proportionnel).



2 En plan - Aires d'alimentation - limitée pour une source située en limite de système aquifère - étendue et circulaire pour un ouvrage convenablement implanté, où les possibilités de rabattement sont importantes.

Comme on n'est pas maître de son débit, une source ne peut alimenter (s'il s'agit d'un réseau de distribution d'eau potable) que le nombre de personnes dont les besoins maximaux (été) correspondent à son débit minimum d'étiage. En revanche, en hiver, son débit est surabondant.

Par contre, on reste maître du débit d'un captage convenablement implanté, dans les limites comprises entre zéro (débit nul) et un débit maximum, fonction des conditions locales (type de l'ouvrage de captage, perméabilité et coefficient d'emménagement du réservoir aquifère, possibilités de rabattement). Il est donc possible, dans ces limites, de faire varier sa production pour suivre les oscillations de la demande.

Ressources exploitables

Si on envisage d'exploiter directement l'eau d'une nappe, il faut se préoccuper du débit que pourra donner l'ouvrage de captage, mais aussi et surtout de la quantité globale d'eau qui pourra être fournie par la nappe pendant la période d'exploitation.

Seule une partie des pluies d'hiver et de printemps s'infiltre dans le sol et va alimenter les nappes. En dehors de cette période, sauf cas exceptionnel, les précipitations n'atteignent pas les nappes ; elles sont entièrement utilisées pour la saturation du sol agricole et les besoins des plantes (évapotranspiration).

Les nappes acquièrent ainsi en hiver un certain stock d'eau (ce qui se manifeste par une montée assez brutale de leurs niveaux) qui ensuite s'écoule tout au long de l'année, de plus en plus lentement à mesure que les niveaux s'abaissent, vers les sources, les cours d'eau ou les aquifères voisins.

Si chaque année, en moyenne, on n'extraît d'une nappe qu'une quantité d'eau au plus égale à ce stock renouvelable, on ne risque pas de l'épuiser et son exploitation peut se poursuivre indéfiniment. Si par contre on en extrait plus que ce que lui apportent les précipitations, on entame ses réserves et on l'assèche progressivement. Ce type d'exploitation "en épuisement" est d'ailleurs parfaitement concevable en certains cas, dans la mesure où on a pu et su prévoir les possibilités, les ressources, de la nappe utilisée.

Le choix du type d'ouvrage de captage, la détermination de ses caractéristiques techniques optimales, le soin apporté à sa réalisation et à sa finition, sont des opérations essentielles.

Pratiquement, chaque captage est un cas particulier nécessitant un ouvrage parfaitement adapté aux conditions hydrogéologiques locales et à l'usage qu'on en attend. Il existe des lois générales, mais pas de solutions standards.

On ne capte pas de la même façon l'eau contenue dans des sables grossiers, des sables fins, de la roche fissurée, des grès, etc...

Ainsi par exemple :

- dans des sables suffisamment perméables, un simple forage de faible diamètre pourra être suffisant ; encore faudra-t-il que sa crépine soit conçue (longueur, position, dimensions et pourcentage des ouvertures) en fonction exacte de la granulométrie des terrains en place, du débit et du rabattement prévisibles ;

- dans des formations sablo-argileuses, moins perméables, pour obtenir un débit important, on pourra être amené à installer une batterie de plusieurs forages ou de simples crépines à pointe si l'horizon aquifère est situé à faible profondeur ;

- dans des roches fissurées surmontées par des sables argileux, on pourra installer des réseaux de drains, creusés dans la roche en place et aboutissant à un puits d'exhaure ;

- dans des formations compactes, peu perméables mais très puissantes on pourra réaliser un forage de faible diamètre, très profond (jusqu'à plusieurs centaines de mètres) ; la grande hauteur d'aquifère captée et les importantes possibilités de rabattement compensant alors la faible perméabilité du terrain.

Dans tous les cas, il faut très soigneusement *développer* l'ouvrage, par tel moyen mécanique ou chimique qui lui est adapté, *contrôler* sa bonne finition et, par des essais convenablement calculés, déterminer les *conditions optimales de son exploitation*.

En conclusion, exploiter une nappe par des captages réalisés au coeur même de son gisement est plus rationnel et plus efficace que de se contenter de recueillir le trop plein qui s'écoule par les sources. En outre, lorsque les conditions favorables peuvent se trouver réunies, c'est souvent plus économique et plus sûr quant à la qualité que de capter des eaux de surface.

Dans les pages qui suivent, nous allons nous efforcer de montrer que ces *conditions favorables* peuvent exister en Bretagne beaucoup plus fréquemment qu'on l'a jusqu'à présent pensé, dit ou écrit.

Dans la mesure où il nécessite de chercher, mettre en évidence et mesurer des éléments souterrains, donc cachés, ce type d'exploitation ne correspond pas à une solution de facilité - par comparaison avec l'utilisation des eaux visibles, sources ou rivières - ; il faut savoir renoncer aux idées préconçues et consentir à un effort d'imagination, de réflexion et ... d'audace.

2 - LES ARENES

21 - Le phénomène d'arénisation

L'arénisation des roches grenues, granites et gneiss essentiellement, aboutit à la transformation d'une roche compacte et dure en matériaux meubles constitués de sables et d'argiles en proportions variables.

Cette transformation se produit sous l'effet d'une *désagrégation physique* (alternances gel-dégel, variations de température...) combinée à une *décomposition chimique* (hydrolyse, dissolution...) de la roche initialement saine.

Sous un climat chaud et humide (Afrique tropicale actuellement, Europe à l'époque tertiaire), le facteur chimique est prépondérant (décomposition) et aboutit à la formation d'arènes essentiellement argileuses (phénomène de kaolinisation).

Sous climat tempéré humide (Massif Armoricain à des époques récentes et, dans une certaine mesure, actuellement), le facteur physique (désagrégation) est prépondérant. Les grains formant la roche originellement cohérente et dure sont dissociés et constituent des sables feldspathiques. Certains minéraux (quartz, notamment) gardent la forme qu'ils avaient dans la roche compacte, d'autres (feldspaths) sont fragmentés en plusieurs morceaux. Seuls les éléments les plus vulnérables peuvent être décomposés, partiellement ou en totalité, donnant des produits argileux qui peuvent demeurer sur place ou être entraînés par les phénomènes de lessivage dus aux circulations d'eau.

L'agent principal de l'arénisation est l'eau. Une roche grenue, granite ou gneiss, sera d'autant plus altérable que l'action de l'eau pourra s'y manifester facilement. Les facteurs essentiels de l'altérabilité d'une roche grenue sont :

- sa composition chimique et sa teneur en minéraux vulnérables (en particulier plagioclases et biotites) ;

- sa constitution granulométrique - un granite à grain grossier est plus altérable qu'un granite à grain fin ;

- sa fissuration et microfissuration originelle. La microfissuration joue un rôle essentiel en permettant l'imprégnation de la roche par l'eau qui peut alors entamer le double processus de désagrégation physique et d'altération chimique.

L'état de ces facteurs d'altérabilité étant très variable d'un type de roche à l'autre, et même, au sein d'un même massif, d'un endroit à l'autre, l'arénisation peut également être très variable, tant en qualité (granulométrie des constituants, teneur plus ou moins forte en matériel argileux) qu'en intensité.

22 - Profil type d'une zone arénisée

Schématiquement, on observe de bas en haut :

- Au-dessus du *granite sain*, et en contact irrégulier avec lui, une zone de fissuration dont l'épaisseur, généralement inconnue, peut être très supérieure à 5 m.

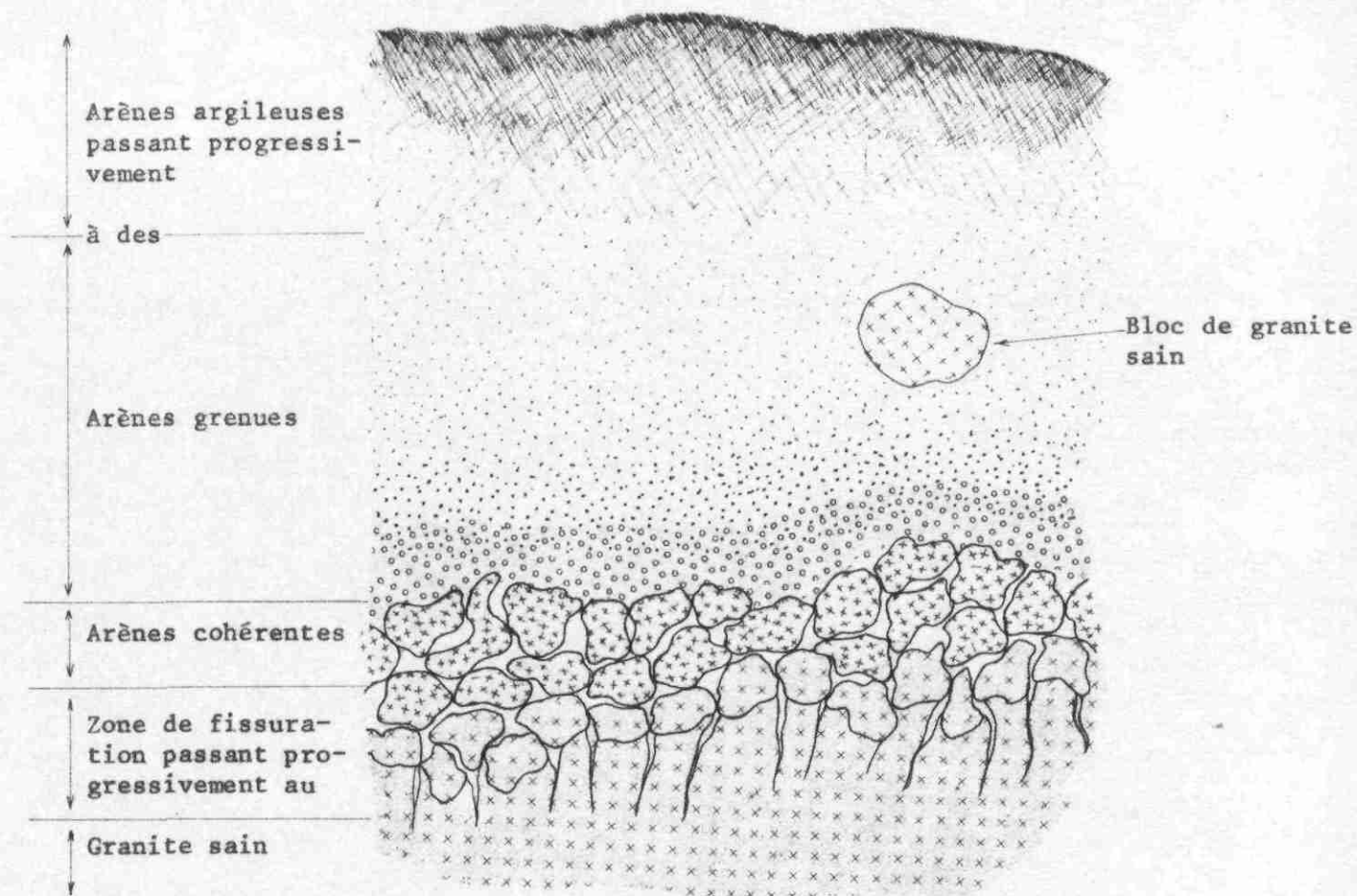
- Une zone d'*arènes cohérentes*. Entre les fissures, la roche garde l'aspect du granite sain, mais s'écrase facilement sous le choc du marteau.

- Une zone d'*arènes grenues*. La structure du granite est détruite et ses éléments dissociés peuvent donner un véritable sable.

- Une zone d'*arènes argileuses*. Les minéraux les plus fragiles (plagioclases et biotites, notamment), sont altérés et transformés en argile.

Une telle coupe-type existe rarement aussi complète. L'un ou l'autre des horizons, surtout au sommet, peut manquer totalement ou se réduire à peu de chose. Des blocs de granite sain peuvent subsister à n'importe quel niveau.

L'épaisseur de la zone arénisée dépend de l'altérabilité de la roche concernée, mais aussi de sa situation topographique. La puissance du manteau d'altération subsistant à un moment donné dans un secteur donné est en effet la résultante de la compétition qui existe entre les phénomènes d'érosion et d'altération. Elle est en général faible (voire nulle) sur les pentes, plus importante dans les zones à relief plat ou peu accentué.



Profil type d'une zone arénisée sous climat tempéré humide

A la faveur d'accidents tectoniques ayant fortement fracturé la roche, l'épaisseur de la zone altérée peut être considérable.

Un forage réalisé à la Foucaudière, dans le massif granitique de la Jalaine (10 km S-SE de Fougères - Ille-et-Vilaine) s'est arrêté à 105 m de profondeur dans des sables granitiques très fins. Il s'agissait d'un forage de recherche minière. Du point de vue qui nous préoccupe ici, il est extrêmement dommage que ce forage n'ait pas été poursuivi jusqu'au granite sain et accompagné de pompages d'essai.

Les sondages (recherche d'eau pour la ville de Lorient) réalisés dans la région de Langonnet et Glomel ont montré que l'épaisseur d'altération pouvait y être supérieure à 45 mètres. Mais cinq sondages seulement ont été poussés jusqu'au granite, aucun n'a traversé la zone de fissuration. Des pompages d'essai ont bien été réalisés, mais dans les endroits a priori les moins favorables : l'épaisseur d'altération n'y était que de quelques mètres, avec d'ailleurs une nette prédominance des arènes argileuses sur les arènes grenues !

De telles épaisseurs d'altération paraissent exceptionnelles dans le Massif Armoricaïn - encore qu'on n'en ait jamais fait de recherche systématique :

Plus généralement on trouve des arènes sableuses et argileuses sur 6 à 15 mètres de puissance (moins sur les pentes). La zone de fissuration n'ayant jamais été traversée, on sait simplement qu'elle peut être supérieure à cinq mètres. Ce sont des épaisseurs très suffisantes pour que les arènes puissent constituer des réservoirs aquifères importants, à condition que les gisements présentent une étendue et une continuité suffisantes.

On sait que l'arénisation est toujours affectée de discontinuités et d'hétérogénéité à différentes échelles. Cette variabilité rend difficile la détermination des ressources en eau d'un gisement et l'implantation efficace des ouvrages de captage, mais seules les discontinuités qui sont à une échelle suffisante pour jouer un rôle hydraulique (limites étanches) peuvent limiter le volume d'eau exploitable.

23 - L'eau dans les arènes

Du point de vue de l'hydraulique souterraine, une arène telle qu'elle est décrite précédemment, correspond à un *aquifère bi-couches* dans lequel les fonctions de *capacité* et de *transmissivité* (perméabilité) sont séparées° :

- les horizons d'arènes argileuses et grenues ont une capacité importante mais leur perméabilité peut être faible ;

- les fissures des horizons inférieurs ont une capacité faible, mais leur perméabilité peut être importante. Elles drainent l'eau contenue dans les couches supérieures.

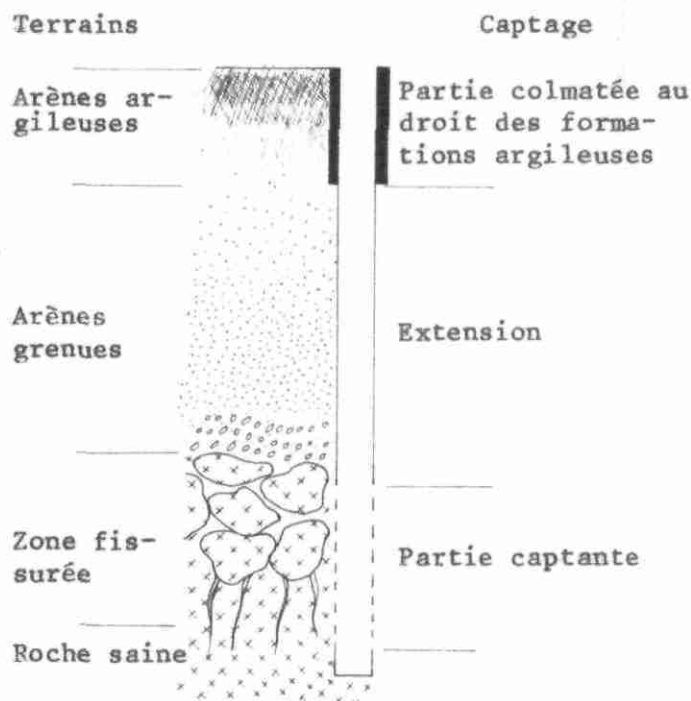
En outre, l'existence d'argiles ou d'arènes argileuses au sommet peut constituer une protection intéressante contre les risques de pollution.

Les arènes, dans la mesure où les ressources en eau du gisement sont suffisantes, constituent donc des systèmes très favorables aux captages : profondeur limitée, protection contre les pollutions issues de la surface, capacité importante, drain individualisé situé à la base du profil.

(°) Capacité : Quantité d'eau exploitable contenue dans un terrain, dépend du volume des vides intergranulaires occupés par l'eau. S'exprime par le coefficient d'emménagement (nappes captives) ou la porosité efficace (nappes libres)

Transmissivité : Produit de la perméabilité par la hauteur d'aquifère concerné. Exprime la facilité de circulation de l'eau et conditionne le débit pouvant être extrait.

Un ouvrage de captage, quel que soit son type (forage, puits, système à drains) devra donc, en principe, être toujours descendu jusqu'à la roche saine. La partie captante de l'ouvrage sera installée au droit de la zone fissurée, la partie supérieure sera soigneusement cimentée (protection contre les risques de pollution).



Remarque : Les fissures peuvent être en partie ou en totalité remplies de sables ou de matériel argileux, ce qui diminue d'autant leurs possibilités de production. C'est alors le rôle des opérations de développement, exécutées lors de la réalisation de l'ouvrage, de décolmater ces fissures et de leur permettre de produire au maximum de leurs possibilités.

Exceptions à ce principe de captage :

- Lorsque les sables constituant la zone d'arènes grenues sont suffisamment épais et perméables pour fournir dans de bonnes conditions le débit demandé, il peut être inutile de chercher à capter la zone fissurée. On fera alors des économies appréciables : ouvrage moins profond et absence de forage dans la roche dure. Cela suppose évidemment qu'on ait fait au préalable un premier ouvrage de reconnaissance accompagné de pompages d'essai correctement menés pour déterminer les qualités aquifères des différents horizons. Des analyses granulométriques des couches sableuses reconnues comme les plus productives sont également indispensables pour calculer le type de crépine qui leur est le mieux adapté.

- Il peut arriver que les arènes ne soient pas "en place", qu'elles aient été transportées et accumulées dans une dépression ou un fond de vallée. Le substratum sur lequel elles reposent peut être quelconque et exempt de toute zone de fissuration. On est alors ramené au problème de l'exploitation de l'eau contenue dans un bassin à remplissage sableux et un forage de reconnaissance accompagné de prélèvements de terrains et de pompages d'essai est indispensable à la détermination efficace des caractéristiques techniques les plus souhaitables pour un ouvrage définitif.

24 - Quantité d'eau contenue dans les arènes

241 - Résultats fournis par l'étude des débits de basses eaux

En été, l'évapotranspiration est très généralement plus importante que les précipitations. Celles-ci peuvent être utilisées entièrement pour la reconstitution de la réserve d'humidité du sol et les besoins de la végétation. Le débit des cours d'eau n'est alors alimenté que par l'écoulement des nappes qu'ils drainent.

Si on définit le *débit de base* d'un cours d'eau comme le plus faible débit moyen de 10 jours consécutifs pouvant être observé au cours d'une année, en dehors de toute perturbation atmosphérique importante, on est sûr que ce *débit de base*, pendant la période considérée (*étiage*), ne peut être fourni que par les nappes d'eau souterraines situées dans le bassin versant du cours d'eau (sauf dans les cas où il existe des barrages réservoirs sur le cours de la rivière). Pondéré à l'ensemble de l'année, ce débit représentera par défaut l'écoulement souterrain total des nappes alimentant le cours d'eau.

Les valeurs de l'écoulement souterrain ainsi obtenues peuvent être exprimées de différentes façons. On pourra, par exemple, connaissant la superficie du bassin versant à la station de jaugeage ayant fourni les données, exprimer l'écoulement souterrain en mètres cubes fournis par hectare de terrain concerné.

Ce type de calculs n'a pas, pour le moment, été appliqué de façon systématique à tous les cours d'eau jaugés en Bretagne. Les résultats obtenus des quelques exemples qui suivent paraissent néanmoins très suffisants pour démontrer l'intérêt des roches arénisables comme réservoirs d'eau souterraine.

241.1 - Comparaison d'un bassin versant à substratum schisteux et d'un bassin versant à substratum granitique.

Le bassin versant du Coët-Organ à Quistinic a une superficie de 48 km² et est constitué pour 94 % de roches grenues (granite à deux micas).

Le bassin versant de l'Evel à Guénin a une superficie de 316 km² et est constitué pour 95 % de schistes.

Ces deux bassins sont géographiquement très voisins, mais les natures différentes des roches qui les composent se traduisent par des écoulements souterrains très différents.

	Superficie du b.v. en hectares	Composition		Ecoulement souterrain annuel en m ³ /ha moyenne 1970-1971
		r. grenues	schistes	
Coët Organ	4 800	94 %	6 %	800 m ³ /ha
Evel	31 600	5 %	95 %	90 m ³ /ha

Une telle variation - d'un bassin à l'autre, ou d'un type de roche à l'autre, l'écoulement souterrain va pratiquement du simple au décuple - ne paraît pas résulter de situations exceptionnelles : l'étude de bassins versants comprenant des roches grenues arénisables (granites et gneiss) en proportions variables, montre que plus la superficie occupée par des roches grenues est importante, plus le débit d'étiage des cours d'eau est soutenu.

241.2 - Bassins versants contenant des proportions variables en roches granitiques.

- Les débits de base de quatre autres cours d'eau, dont les bassins versants sont situés dans des conditions géographiques, géologiques et climatiques comparables, ont été examinés de la même façon :

- l'Odet à Tréodet a un bassin versant de 20 000 ha, dont 6 000 (30 %) constitués de roches grenues. Période considérée : 1958-1967 (10 ans).
- l'Ellé à Pont Ty Nadan a un bassin versant de 57 000 ha, dont 32 000 (56 %) constitués de roches grenues. Période considérée : 1958-1967 (10 ans).
- le Scorff à Pont Kerlo a un bassin versant de 29 000 ha, dont 22 600 (78 %) constitués de roches grenues. Période considérée : 1958-1966 (9 ans).
- l'Isole à Quimperlé a un bassin versant de 25 000 ha, dont 17 800 (79 %) constitués de roches grenues. Période considérée : 1959-1967 (9 ans).

Rapporté à la superficie totale de chaque bassin versant, l'écoulement souterrain qui s'y rapporte (moyennes annuelles pour les 9 ou 10 ans de la période considérée) augmente à peu près comme le pourcentage de roches grenues qui s'y trouvent :

- bassin de l'Odet : 710 m³/ha par an en moyenne
- bassin de l'Ellé : 830 " " " "
- bassin du Scorff : 1 270 " " " "
- bassin de l'Isole : 1 080 " " " "

Ces chiffres sont importants, ils signifient que sur l'ensemble des 4 bassins considérés, totalisant une superficie de 128 500 ha (1 285 km²), les nappes souterraines fournissent en moyenne chaque année plus de 120 millions de mètres cubes d'eau. En supposant que seulement un dixième de cette quantité puisse être utilisée pour l'alimentation des populations, cela représenterait encore, pour cette seule région (moins de 5 % de la superficie totale des quatre départements) 12 millions de m³, soit de quoi satisfaire aux besoins en eau de bonne qualité d'environ 150 000 personnes.

Nous avons considéré que les ressources en eau souterraine étaient également réparties sur l'ensemble de chaque bassin versant. Or les résultats obtenus montrent qu'il n'en est rien et que les roches grenues peuvent en fournir jusqu'à 10 fois plus que les schistes.

Si on suppose qu'à superficie égale, les terrains à dominante schisteuse fournissent 5 à 20 % de ce que peuvent fournir les terrains formés de roches grenues arénisables, on obtient les valeurs suivantes :

- ressources en eau souterraine des roches grenues
du bassin de l'Odé : 1 610 à 2 130 m³/ha
- ressources en eau souterraine des roches grenues
du bassin de l'Ellé : 1 280 à 1 410 m³/ha
- ressources en eau souterraine des roches grenues
du bassin du Scorff : 1 540 à 1 600 m³/ha
- ressources en eau souterraine des roches grenues
du bassin de l'Isle : 1 280 à 1 350 m³/ha

L'expérience montrant que l'arénisation est toujours très inégalement répartie, hétérogène et discontinue, on est conduit à penser qu'il existe des zones particulièrement favorables où ces ressources se trouvent en quelque sorte concentrées. Il ne paraît nullement exagéré d'espérer trouver localement plus de 1 500 à 2 000 m³/ha.

Bassin de	Superficie en ha totale du bassin versant	des roches grenues arénisables comprises dans le b.v.	Ecoulement souterrain annuel en m ³ /ha rap- porté à la superficie totale	Ressources en eau souterraine minimales des roches grenues (granite, granulite et gneiss) - en m ³ /ha
L'ODET à Tréodet	20 000	6 000	710	1 610 à 2 130
L'ELLE à Pont Ty Nadan	57 000	32 000	830	1 280 à 1 410
Le SCORFF à Pont Kerlo	29 000	22 600	1 270	1 540 à 1 600
L'ISOLE à Quimperlé	22 500	17 800	1 080	1 280 à 1 350
TOTAL	128 500	78 400		
Moyennes			950 m ³ /ha	1 400 à 1 530 m ³ /ha

Tableau récapitulatif

Ressources en eaux souterraines (valeurs *par défaut*) des roches grenues arénisables.

242 - Anciens captages à systèmes de drains

Les systèmes de drains fournissant de l'eau par gravité ont été assez largement utilisés à la fin du siècle dernier et au début de celui-ci : Brest - Rennes - St Brieuc - Vitré - Lorient - Quimper - Pontivy - Fougères ...

Ces drains n'ont pas toujours été installés dans les meilleures conditions. Il est en particulier extrêmement rare qu'ils aient été descendus jusqu'à la zone de fissuration. Quoiqu'il en soit, il est intéressant d'examiner les résultats que nous en connaissons :

Réseaux de drains	Rendement connu en m ³ /ha/jour	Valeur précédente pondérée à une année complète en m ³ /ha/an
RENNES	3	1 095
PONTIVY	3 à 3,6	1 095 à 1 314
QUIMPER	4,8	1 752
ST BRIEUC		
valeurs d'étiage : Vallon de Flageolet (granite p.p. seulement)	2,81	1 025
Vallon de Launay	6,91	2 422
FOUGERES		
mini observé 1 semaine de 1961 à 1964	5,2	1 898
moyenne 1961-1964	7,5	2 737

Ces valeurs sont parfaitement cohérentes avec celles issues de l'examen des débits superficiels. Elles confirment l'hypothèse selon laquelle il peut exister localement des *concentrations de ressources* (réseaux de Quimper et de Fougères, vallon de Launay à St Brieuc).

Les systèmes de drains tels qu'ils ont été conçus, présentent les mêmes avantages et surtout les mêmes inconvénients que les captages de sources plus ponctuelles : ils se contentent d'intercepter le *débit naturel* des portions de nappes qui y aboutissent. Ils fournissent par conséquent beaucoup moins d'eau en été (période des besoins maximaux) qu'en hiver.

Il ne fait pas de doute que conçus de façon quelque peu différente, les drains auraient pu, et pourraient encore rendre des services considérables : au lieu de les installer à flanc de thalweg, en limite des systèmes aquifères, il faudrait les implanter dans des secteurs à relief plat ou peu accusé, les descendre systématiquement jusqu'à la *zone de fissuration*, même si celle-ci ne se trouve pas à une profondeur constante sous le sol. Ils devraient, par ailleurs être reliés à des *puits d'exhaure* où il serait alors possible de *rabattre* la nappe par pompage. Le débit pourrait ainsi être *modulé* et ajusté à chaque instant aux besoins.

243 - Amplitude des fluctuations piézométriques

L'amplitude des fluctuations de nappe qui peuvent être observées dans les puits et forage dépend, toutes choses égales par ailleurs, du *coefficient d'emmagasinement* des formations constituant le réservoir aquifère. En particulier, les nappes rechargées en hiver se vident pendant la période qui va en général du printemps à l'automne ou au début de l'hiver, d'une quantité Q qui est une fonction du temps pendant lequel dure l'écoulement souterrain, de la transmissivité des formations aquifères et du gradient hydraulique. Ce départ d'eau se traduit par un abaissement de la nappe, dont l'amplitude est inversement proportionnelle au coefficient d'emmagasinement. Pour un même volume d'eau évacué, on observera un abaissement important dans les zones à faible coefficient d'emmagasinement et inversement.

A. Rampon (thèse de doctorat d'état, soutenue à Paris en 1971) a suivi et mesuré pendant un certain temps les variations de niveau dans 18 puits creusés dans le granite de Quintin-Magoar (Côtes du Nord, haute vallée du Blavet). De début Mai (hautes eaux) à Septembre (étiage) 1963, la surface de l'eau s'est abaissée en moyenne d'environ 2 m dans ces 18 ouvrages. Les valeurs extrêmes sont 0,5 m et 6,3 m. Si on considère que le coefficient d'emmagasinement de formations telles que les arènes est en général compris entre 5 et 15 %, *un abaissement moyen de 2 m de la surface de la nappe correspond à l'écoulement de volumes compris entre 1 000 et 3 000 m³ d'eau par hectare de terrain*. Il faut remarquer que, bien qu'obtenues par des moyens très différents, ces valeurs sont à nouveau absolument cohérentes avec les estimations précédentes.

25 - Utilisation des nappes d'arènes

De nombreux auteurs ont reconnu que l'existence de granites et gneiss alteres sur des profondeurs variables était très fréquente dans le Massif Armoricaïn et que les arènes pouvaient contenir des volumes d'eau importants. Aucun n'a poussé le raisonnement hydrogéologique jusqu'à préconiser la recherche systématique des nappes d'arènes. On continue en Bretagne à ignorer cette possibilité, pourtant riche de promesses et à lui préférer le traditionnel captage des *eaux visibles* (sauf en ce qui concerne l'exploitation des bassins tertiaires). Le captage des eaux visibles représente certes une solution de facilité : il ne nécessite que des recherches très réduites. Mais c'est souvent une solution onéreuse : dispersion des points de captage (sources), édification d'ouvrages importants (barrages réservoir, stations de traitement, stations de relèvement) longueur des conduites d'amenée ... C'est également une solution peu sûre du point de vue de la qualité du produit livré : les caractéristiques organoleptiques (saveur, odeur, aspect) des eaux superficielles laissent souvent à désirer - le prodigieux essor des industries d'eaux minérales ou de table enregistré ces dernières années est là pour en témoigner -. Par ailleurs, les stations de traitement sont sans défense devant une pollution accidentelle (hydrocarbures, pesticides, mercure...) qui se propagerait extrêmement rapidement dans les eaux de surface.

Les eaux souterraines ne sont pas à l'abri des pollutions, mais elles disposent toujours d'une protection naturelle plus ou moins prononcée, suffisante pour arrêter, limiter ou retarder la progression de tel ou tel type de produit polluant. Les sables d'arènes ont un pouvoir filtrant important qui permet à l'eau qu'ils contiennent d'obtenir ou de conserver des qualités organoleptiques toujours très supérieures à celles des eaux de surface.

L'utilisation des nappes d'arènes par captages directs ne peut certainement pas résoudre tous les problèmes, mais elle peut, en certains secteurs à déterminer, assurer certains types de besoins : alimentation ou renforcement de l'alimentation de petites ou moyennes agglomérations, alimentation d'industries (laiteries, industries alimentaires ...), renforcement saisonnier de certains réseaux côtiers ... etc.

Il faut cependant être bien conscient que l'exploitation de l'eau contenue dans les arènes n'est pas une chose aisée. Les difficultés existent essentiellement au niveau des recherches préalables :

- *recherche des zones arénisées ;*
- *au sein des zones arénisées, recherche des réservoirs aquifères dont les caractéristiques géométriques et les paramètres hydrauliques sont suffisants pour déterminer des ressources convenant aux besoins locaux ;*
- *au sein des réservoirs aquifères, recherche des meilleures possibilités d'implantation permettant l'édification d'ouvrages capables de fournir, dans des conditions économiques satisfaisantes, les débits correspondant à la fois à la demande et aux ressources ;*

- recherche enfin du type d'ouvrage le plus économique en même temps que le mieux adapté aux conditions locales et aux services qui lui seront demandés.

Les travaux de recherche coûtent cher, mais ils sont indispensables à partir du moment où les solutions plus faciles sont épuisées. Si, par ailleurs, on le compare aux avantages apportés, ce coût peut être considéré comme négligeable.

Pour fixer les idées : imaginons que l'exploitation d'une nappe d'arène puisse satisfaire à une demande de 1 250 m³/jour (de quoi assurer l'alimentation d'environ 5 000 personnes). Selon les difficultés particulières à la région, le montant de l'investissement recherches aura pu être de 50 000 à 100 000 francs. Après 20 ans d'utilisation, cette nappe aura fourni près de 10 millions de m³ d'eau. L'incidence des travaux de recherches sera alors, en francs constants, de seulement 0,5 à 1 centime par m³ extrait. Il s'agit là d'un calcul extrêmement simpliste qui ne tient pas compte d'avantages tels que la fourniture d'eau de bonne qualité dans une région qui pouvait s'en croire dépourvue, l'économie réalisée par un dimensionnement exact du ou des ouvrages de captage... etc.

26 - Localisation des zones où peuvent exister des nappes d'arènes

Sur les cartes d'orientation à petite échelle (1/500 000), qui se trouvent en fin de rapport, ont été reportées les roches susceptibles d'arénisation (granites et gneiss). C'est dans ces zones que devraient être entreprises les études destinées à rechercher les réservoirs aquifères utilisables qui ne peuvent manquer d'y exister.

Les roches arénisables couvrent :

- dans le département du Finistère, une superficie d'environ.....	2 950 km ²
- dans le département des Côtes-du-Nord, une superficie d'environ...	2 700 km ²
- dans le département du Morbihan, une superficie d'environ.....	3 100 km ²
- dans le département d'Ille-et-Vilaine, une superficie d'environ...	1 050 km ²
Dont, pour l'ensemble des 4 départements.....	9 800 km ²

En se reportant au tableau de la page 17 et en supposant que les résultats en sont extrapolables à l'ensemble de la région (ce qui reste à démontrer), admettons, à titre d'hypothèse, que les ressources en eau souterraine des roches grenues sont de l'ordre de 1 000 m³/ha et par an (c'est là une valeur très pessimiste par rapport aux résultats de la dernière colonne du tableau, eux-mêmes obtenus par défaut). On obtient alors, par département, les possibilités de ressources annuelles globales suivantes :

- Finistère : 295 millions de m^3
- Côtes du Nord : 270 millions de m^3
- Morbihan : 310 millions de m^3
- Ille-et-Vilaine : 105 millions de m^3

Au total, près d'1 milliard de m^3 .

Il est évident que la totalité de ces ressources n'est pas récupérable, du fait de l'hétérogénéité des arènes, de la fragmentation des nappes, de l'éloignement des centres de besoins. Mais il ne paraît pas exagérément optimiste d'espérer qu'au moins 5 % de ces volumes proviennent de réservoirs "utilisables". Ce sont ces 5 % (au moins) qu'il faut s'efforcer de localiser. Ils représentent un potentiel de 50 millions de m^3 par an, soit des ressources nouvelles capables d'alimenter plus de 500 000 personnes.

Ces chiffres n'ont aucune prétention à l'exactitude. A chacune des hypothèses ayant conduit à ces estimations, on s'est efforcé de ne retenir que les valeurs pessimistes, de façon à tenter de rester en deçà de la réalité. La marge d'erreur, due surtout à l'extrapolation de résultats locaux (quoique portant sur 1 285 km^2) à l'ensemble d'une vaste région, peut cependant être considérable.

Les quelques considérations qui précèdent nous paraissent néanmoins importantes. Elles montrent :

- que les granites et gneiss peuvent retenir dans leurs zones d'altération des volumes d'eau importants (vraisemblablement localement jusqu'à 2 000 m^3 par ha, et plus).;

- que les captages de sources, traditionnels en Bretagne, se contentent "d'écrémer" les nappes, sans entamer leurs ressources ;

- que l'application de techniques plus modernes permettrait une mise en exploitation aisée de ces ressources jusqu'ici parfaitement ignorées, quand elles n'étaient pas niées, vraisemblablement à cause d'un certain manque d'information sur les progrès réalisés par les sciences et techniques liées à l'hydraulique souterraine.

Cette mise en exploitation est subordonnée à la réalisation d'études et de recherches destinées à localiser et définir les gisements utilisables et déterminer les modalités de captage. Les volumes en jeu (50 millions de m^3 par an d'eau de bonne qualité) sont trop importants pour être ignorés, même si, pour le moment, ils ne proviennent pour une bonne part que d'hypothèses restant à vérifier, même si leur utilisation risque de bouleverser les habitudes régionales.

La perspective de disposer d'une nouvelle ressource de cette importance justifie qu'on tente au moins de vérifier, en les confirmant ou en les infirmant, les hypothèses émises. Ceci nous semble particulièrement important, et urgent, en cette époque où la Bretagne essaie d'organiser et de planifier la distribution d'eau potable à la totalité de ses ressortissants.

27 - Travaux de recherche - Etudes à entreprendre

Pour être effectués dans les meilleures conditions d'efficacité, de rapidité et d'économie, de tels travaux de recherche doivent être entrepris, au moins aux stades initiaux, avec une envergure suffisante pour couvrir les quatre départements et éviter ainsi qu'on ne perfectionne sur une situation particulière des méthodes d'étude qui ne seraient pas répétitives ailleurs. Une telle étude doit, à notre avis, être envisagée en plusieurs étapes successives et enchaînées, allant du plus général (reconnaissance des zones arénisées) au particulier (implantation et construction d'ouvrages de captage).

Le concours des autorités et administrations responsables des problèmes d'eau sur le plan local, départemental ou régional, est indispensable, pour éviter la dispersion des efforts, faciliter le recueil des données, tenir compte des priorités possibles et, d'une façon générale, coordonner les différentes actions qui peuvent être entreprises par ailleurs.

Le plan de travail qui suit doit évidemment être considéré comme un schéma type indicatif et susceptible d'être modifié, au gré des nécessités, des techniques ou des idées.

271 - Recherche stratégique - à l'échelle de la région (Bretagne)

Ce stade de l'étude doit permettre par une évaluation globale par bassin versant des écoulements souterrains de sélectionner rapidement les régions paraissant les plus intéressantes. Les méthodes mises au point à cette occasion pourront être utilisées ultérieurement dans des secteurs différents.

Etude des données d'hydrologie de surface

Diverses méthodes peuvent fournir une évaluation de l'écoulement souterrain à partir de l'analyse des hydrogrammes des cours d'eau. A priori, nous en retiendrons deux :

271.1 - Calcul des débits d'étiage

Cf. in texte.

271.2 - Méthode des courbes de tarissement

Cette méthode donne en général les résultats les plus valables à condition que la décrue annuelle atteigne le tarissement, ce qui n'est pas toujours le cas. Elle nécessite le tracé de l'hydrogramme à partir des mesures quotidiennes du débit en m^3/s , sur graphique arithmétique et sur graphique semi-logarithmique.

271.3 - Démarche à suivre

Quelle que soit la méthode employée, il est impossible de tirer de conclusion valable à partir d'une seule année de mesure. L'analyse de plusieurs années prend d'autre part beaucoup de temps. On pourra alors procéder en deux temps :

. Choix d'un nombre limité de stations types, possédant des mesures continues sur des périodes de 10 ans. On appliquera systématiquement sur ces stations les deux méthodes d'analyses.

. Sur les autres stations, on appliquera la méthode des étiages de façon systématique, et l'autre méthode lorsque cela sera possible, sur 3 années de mesures consécutives seulement. Cette période de 3 années devra théoriquement être commune à toutes les stations et être comprise dans la période de 10 ans précédemment choisie afin de pouvoir la situer (période sèche de préférence, pour se placer dans un cas défavorable). Les périodes de 10 ans, si elles ne peuvent être identiques, devront avoir en commun ces 3 années.

En tenant compte à chaque fois de la composition géologique des bassins versants, on obtiendra ainsi un classement par ordre d'intérêt (valeur de l'écoulement souterrain) des différents massifs de roches arénisables. Les valeurs d'écoulement souterrain les plus fortes (compte tenu de la proportion de roches grenues contenues dans le bassin) en même temps que les moins variables d'une année sur l'autre (inertie du réservoir) auront toutes les chances de correspondre aux arénisations les plus importantes et les plus continues.

271.4 - Données à recueillir

. Liste et localisation des stations de jaugeages existant en Bretagne, avec leurs dates de mises en service et leurs périodes d'activité.

. Caractéristiques géométriques, morphologiques et géologiques des bassins versants correspondants.

. Valeurs du débit journalier en m^3/s sur les périodes retenues (3 ans ou 10 ans).

272 - Recherche tactique - à l'échelle du massif ou de la portion du massif.

Cette phase doit permettre de reconnaître et délimiter approximativement les réservoirs aquifères possibles à l'intérieur des régions définies comme étant a priori les plus intéressantes par la phase précédente. Les recherches devront être menées dans un ordre défini par les priorités (importance des besoins) affectées aux différents secteurs possibles.

Techniques à mettre en oeuvre

272.1 - Etudes sur documents

L'examen détaillé des cartes géologiques et topographiques, ainsi que des *photographies aériennes* fournira des renseignements sur :

- le type de roches ;
- le relief :

Un relief accusé peut découper un réservoir aquifère en unités de petites dimensions dont l'exploitation est alors beaucoup moins intéressante. Pour être utilisables, les gisements devront donc posséder des dimensions au sol (largeur des interfluves) minimales, définies par le volume des besoins et les valeurs de l'écoulement souterrain dans le secteur considéré.

- les coefficients de drainage :

La longueur totale de cours d'eau drainant une superficie donnée est en relation, toutes choses égales par ailleurs, avec la perméabilité des terrains drainés.

- l'emplacement et la taille des affleurements (d'arènes ou de rochers sains), dont les principaux seront décelables sur photographies aériennes.
- la végétation, dont le type et la répartition peuvent fournir des indices précieux.

On pourra ainsi, en procédant surtout par élimination, cerner assez rapidement le ou les gisements possibles et de dimensions convenables susceptibles d'exister dans le secteur étudié.

272.2 - Travaux de terrain

Ces travaux seront entrepris sur l'emplacement des gisements possibles définis par les études sur documents.

a) *Inventaire hydrogéologique* : reconnaissance des affleurements, recensement des points d'eau, des puits et ouvrages souterrain existants pouvant fournir des indications sur l'épaisseur d'arénisation et le régime des eaux souterraines, renseignements auprès des entrepreneurs locaux (puisatiers, notamment), mesures piézométriques (détermination du sens de l'écoulement des nappes et de la valeur du gradient hydraulique).

b) *Jaugeage des ruisseaux* : en période de basses eaux (août - septembre) on entreprendra des jaugeages systématiques des cours d'eau. On fera en sorte, dans chaque secteur, pour que tous les jaugeages soient faits en peu de temps (cliché) et s'adressent à des portions de cours d'eau de longueurs comparables. On pourra ainsi obtenir une première *estimation chiffrée* de la perméabilité des terrains drainés.

c) *Mesures physico-chimiques* : en même temps que les jaugeages on mesurera la résistivité (et on dosera éventuellement la silice) des eaux de surface ainsi que des puits et sources voisins. On vérifiera ainsi la provenance souterraine (à cette époque de l'année) des eaux de surfaces, pour justifier les estimations chiffrées précédentes.

273 - Reconnaissance - à l'échelle du gisement

Les "recherches stratégiques" doivent permettre de définir les régions où les ressources en eaux souterraines des roches grenues

sont les plus abondantes. A l'intérieur de ces régions, les "recherches tactiques" doivent permettre de délimiter les gisements d'arènes dont la taille est suffisante pour qu'ils puissent constituer des réservoirs aquifères utilisables (compte tenu des besoins qui peuvent se manifester à proximité). A ce stade, les connaissances ne sont pas suffisantes pour envisager une mise en exploitation rationnelle et efficace. Il faut encore préciser la structure du réservoir aquifère retenu, déterminer ses caractéristiques géométriques et hydrauliques, reconnaître les implantations les mieux appropriées à la réalisation de captages (épaisseur et perméabilité des horizons aquifères, éloignement des limites...)

Techniques à mettre en oeuvre

273.1 - Géophysique

Les techniques géophysiques, en particulier les méthodes sismiques et électriques coupées, sont très bien adaptées aux problèmes de la détermination de l'épaisseur des couches d'arènes et des zones de fissuration. L'emploi simultané des deux méthodes permet de lever la plupart des indéterminations laissées par chacune d'elles et de définir avec une bonne approximation la profondeur du niveau hydrostatique. Ces méthodes nécessitent un étalonnage préalable, soit sur un ouvrage existant (puits ou forage) dont on connaît la coupe géologique, soit, de préférence, sur un forage réalisé à cette occasion et dans ce but.

273.2 - Forages de reconnaissance, pompages d'essai

Des forages de reconnaissance accompagnés de pompages d'essai sont nécessaires, notamment aux emplacements que l'interprétation des données géophysiques indique comme les plus favorables, afin de vérifier ces données, reconnaître avec précision les terrains en place (granulométrie des arènes grenues, état des fissures...), mesurer les caractéristiques hydrodynamiques des horizons aquifères. Pour pouvoir être interprétables sur le plan mathématique, les pompages d'essais doivent être conçus, réalisés et contrôlés avec le maximum de rigueur.

274 - Mise en exploitation - à l'échelle de l'ouvrage de captage

Une fois reconnu le réservoir aquifère et vérifié que ses ressources sont suffisantes pour assurer les besoins, il reste à déterminer le type d'ouvrage de captage capable de fournir le débit demandé dans les meilleures conditions économiques.

Le débit d'un ouvrage de captage correctement réalisé dépend de son diamètre, des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère (emmagasinement et surtout transmissivité), des possibilités de *rabattement* de la nappe et de ses conditions aux limites. Les différents paramètres, à l'exception du diamètre, sont déterminés pendant la phase "reconnaissance". Connaissant les débits nécessaires, on peut alors définir le type d'ouvrage adapté, et calculer ses caractéristiques techniques. On pourra ainsi, suivant les cas envisager :

- "*Conditions hydrauliques*" (association paramètres hydrauliques - possibilités de rabattement) bonnes vis-à-vis des débits demandés : ouvrages classiques, du forage de petit diamètre (250 ou 300 mm) au puits de 3 à 4 m de diamètre.

- Conditions hydrauliques insuffisantes pour que les débits puissent être fournis à partir d'un seul ouvrage : *batterie de forages*, les éloignements des différentes unités devant alors être soigneusement calculés. A titre d'exemple, sous certaines conditions, 6 forages de 0,6 m de diamètre, également répartis sur un cercle de 200 m de rayon sont équivalents d'un puits (théorique) de 90 m de diamètre. Un tel puits est évidemment impossible à réaliser. Par contre, il est facile de faire 6 forages à un coût très acceptable. D'une façon générale, il faut se souvenir que plusieurs forages de faible diamètre peuvent être plus économiques et plus efficaces qu'un seul ouvrage de grandes dimensions. Une batterie de forages peut être exploitée à l'aide d'autant d'unités de pompage qu'il y a d'ouvrages. Elle peut aussi être exploitée par un seul groupe de pompage adjoint à un ouvrage central et auquel les différents forages sont reliés par siphonage.

Si la zone de fissuration est à faible profondeur (moins de 10 m) on peut envisager de réaliser des *drains* (dont le développement est calculable) qui aboutiront à un *puits d'exhaure* muni d'un groupe de pompage.

A chaque fois, il y a une étude économique à faire : un ouvrage coûteux (drains de grandes longueurs, batteries de nombreux forages) peut être tout à fait compatible avec l'extraction de volumes importants, incompatible avec des volumes plus faibles. Toutefois, à partir d'une certaine taille de réseau, le coût du captage (du moins en matière d'eau souterraine), même additionné avec les recherches préalables, est souvent négligeable vis-à-vis du reste de l'infrastructure (canalisation, château d'eau ...). Si on considère un amortissement des investissements sur 20 années, l'incidence de ce coût peut être inférieure à 1 centime par m^3 d'eau extrait. Il ne dépassera pas quelques centimes par m^3 d'eau extrait dans les cas les moins favorables.

Ce programme peut paraître ambitieux, voire disproportionné avec le sujet considéré. Nous pensons qu'il n'en est rien, l'eau souterraine

est une richesse certaine pour la région qui la possède, un facteur essentiel de développement. A ce titre, elle mérite qu'on y consacre un minimum d'attention.

Le B.R.G.M., Service Géologique National, conscient de l'intérêt des perspectives qui s'ouvrent en même temps que de l'importance que peut présenter la première ouverture d'une voie nouvelle, a décidé de prendre à sa charge, dans le cadre de ses travaux propres d'Evaluation des Ressources Hydrauliques et de Méthodologie, la partie "*Recherche stratégique*" définie plus haut. A l'issue de cette étude, la phase "*Recherche tactique*" sera appliquée à un ou plusieurs *secteurs pilotes* choisis pour les indices favorables qu'on y aura rencontrés et pour l'intérêt immédiat que peut présenter pour la région concernée la mise en évidence de ressources en eau souterraine de bonne qualité, jusque-là ignorées.

L'intérêt pratique de ces travaux pourra être concrétisé dans la mesure où leur relai (phases *reconnaissance et mise en exploitation*) pourra être assurée par les groupements ou collectivités directement concernés. Le choix des secteurs pilotes tiendra compte de cette possibilité.

3 - LES GRES

31 - Classification(°)

Sous le terme général de GRES, on désigne des roches détritiques formées par des *grains de sable*, enrobés dans un *ciment*.

Selon la nature des grains (qui peuvent être soit uniquement quartzeux, soit pour partie quartzeux et pour partie feldspathiques, soit encore, mais plus rarement, faits de minéraux fragiles, tels que la hornblende, le pyroxène ou l'olivine) et la nature du ciment (siliceux, pélitique, calcaire, ferrugineux...), on peut distinguer plusieurs types de grès.

311 - Grès à ciment siliceux

311.1 - Grès à ciment siliceux et à grains quartzeux

Bien qu'ils ne soient jamais totalement dépourvus de grains de feldspaths, ils sont généralement appelés *grès siliceux*.

D'après leur structure, on les classe en :

- *grès quartzeux* : les grains de quartz détritiques les plus gros sont unis par un ciment fait de grains de quartz plus petits, les uns détritiques, les autres de néoformation, simplement engrenés les uns dans les autres.

- *grès quartzites* : les grains primitifs sont "nourris" par de la silice secondaire qui s'oriente sur leur réseau. La roche devient cohérente lorsque les cristaux de quartz, en grossissant, se collent les uns contre les autres.

(°) Jean JUNG - in Précis de Pétrographie

Les grès quartzeux et les grès quartzites sont des roches à cassure rugueuse, toujours plus ou moins poreuses et friables et dans lesquelles les anciens grains de sable peuvent toujours être distingués, à l'oeil nu ou à la loupe.

- *quartzites* : les quartzites, par contre, sont des roches à cassure conchoïdale, extrêmement tenaces et d'une porosité pratiquement nulle. Les grains de quartz sont si fortement engrenés les uns dans les autres qu'il ne subsiste plus d'espaces vides entre eux.

311.2 - Grès à ciment siliceux et à grains de quartz et de feldspath.

Ces grès sont analogues aux précédents mais ils contiennent, par définition, plus de 20 p. 100 de feldspath. L'usure de leurs grains est moindre et leur calibrage est plus grossier.

L'arkose est une variété remarquable de grès feldspathique qui renferme jusqu'à 50 p. 100 de feldspath et dans laquelle ce minéral se présente en grains dont la taille est analogue à celle des feldspaths du granite commun.

Certains grès feldspathiques contiennent de nombreuses paillettes de mica blanc. Dans les *grès micacés communs*, ces lamelles de muscovite sont disposées d'une manière quelconque par rapport au litage.

Dans le *psammite*, par contre, les micas blancs sont couchés dans certains lits régulièrement espacés de la stratification. La roche se débite alors en plaquettes ou en dalles.

312 - Grès à ciment pélitique

Les grains et le ciment sont contemporains. Les uns et les autres sont des matériaux détritiques qui étaient simplement, à l'origine, les premiers sableux et les seconds pulvérulents.

D'une façon générale, les grains de grès à ciment pélitique peuvent être de natures très diverses. A côté des grains de quartz, on trouve de nombreux grains de feldspaths, ainsi que des grains microconglomératiques de roches dures (schistes siliceux, quartzites...), appelés *grains lithiques*. Le mica blanc et la chlorite se présentent en grandes lamelles, parfois visibles à l'oeil nu et répartis d'une manière désordonnée.

Le ciment est fait d'une poussière de particules de quartz, de feldspath, de mica, de chlorite, de kaolinite, etc..., le tout étant obscurci par une pigmentation ferrugineuse et durci par de la silice secondaire.

Les *grauwackes* s.s. sont des grès péliques grossiers alternant avec des lits à grain plus fin. Leur composition minéralogique est très variable (éléments habituels des grès feldspathiques, mais aussi, débris de roches volcaniques).

313 - Grès à ciment calcaire

Les grains de sable se sont déposés en même temps que le carbonate précipitait par voie chimique. Les grès calcaires peuvent avoir une structure à *grains jointifs* ou à *grains dispersés*. Lorsque la teneur de la roche en calcite dépasse 50 p. 100, on dit que l'on a affaire à un *calcaire gréseux*.

- Grès calcaires proprement dits :

Ces grès se rencontrent dans les formations lacustres ou marines des régions stables, à relief aplani. Les grains de sable sont en général noyés dans une matrice calcaire où on peut trouver en outre des grains de glauconie et des débris d'organismes divers.

- Grès à ciment calcaire-pélique :

Il s'agit en ce cas de grès microconglomératiques, riches en grains de feldspath et en matière pélique. Ce sont des sédiments de régions orogéniquement actives. Leur variabilité de composition et de structure est très grande.

314 - Grès à ciment ferrugineux

Les grès ferrugineux peuvent avoir un intérêt économique certain mais leur importance géologique est assez limitée. Ils ne doivent leur existence qu'à des concentrations accidentelles de fer.

Tous ces types de grès existent dans le massif armoricain, soit en lits de faibles épaisseurs, mais souvent nombreux, intercalés dans des schistes, soit en formations puissantes et bien individualisées (les "grès armoricains inférieurs", par exemple, peuvent en certains secteurs avoir une épaisseur supérieure à 300 m). Comme tout matériel détritique, les grès sont très variable tant en puissance d'un endroit à un

autre, qu'en faciès au sein d'une même formation. Dans un même sondage, on peut trouver de multiples alternances de grès quartzeux, grès quartzites, quartzites francs

32 - Stratigraphie et faciès

Les formations anciennes qui constituent le socle sédimentaire du Massif armoricain forment un ensemble complexe, profondément plissé et souvent métamorphisé. La description qui suit est volontairement sommaire et limitée pour l'essentiel (Briovérien à Silurien) à la région qui s'étend au Sud de Rennes dans la zone bien connue des synclinaux ferrifères. Elle est donnée à titre d'exemple. On s'efforcera, plus loin, de préciser la localisation et le faciès des formations gréseuses dans chaque département.

- *Le Briovérien.*

Sous ce terme, créé par Charles Barrois, on désigne un faciès correspondant à des terrains d'âge mal défini, mais dont on a pu localement observer qu'il était sous-jacent aux premières formations de l'ère primaire.

Il est principalement représenté par des schistes de couleur foncée, verte, bleue ou noirâtre. Les *passées détritiques* n'y sont pas rares, et en certains points il s'agit franchement d'*alternances schisto-gréseuses*, voire même *arkosiques* ou *conglomératiques* ("Poudingue de Gourin").

L'altération superficielle argileuse masque le plus souvent ces formations, ce qui a empêché qu'on puisse en dresser une stratigraphie quelque peu précise. A bien des égards l'appellation de "Briovérien" est un moyen commode d'exprimer une ignorance quasi-totale de la géologie de ces terrains.

- *Le Primaire.*

Au contraire du Briovérien, la stratigraphie de ces dépôts est assez bien connue. Elle est d'ailleurs certainement beaucoup plus simple. Le Primaire d'ailleurs affleure assez largement. En outre il renferme des substances d'intérêt économique (ardoises, minerais de fer, charbon, calcaires) et de ce fait il a suscité des études de géologie appliquée qui ont permis d'en acquérir une bonne connaissance.

STRATIGRAPHIE DE LA SERIE CAMBRO-SILURIENNE

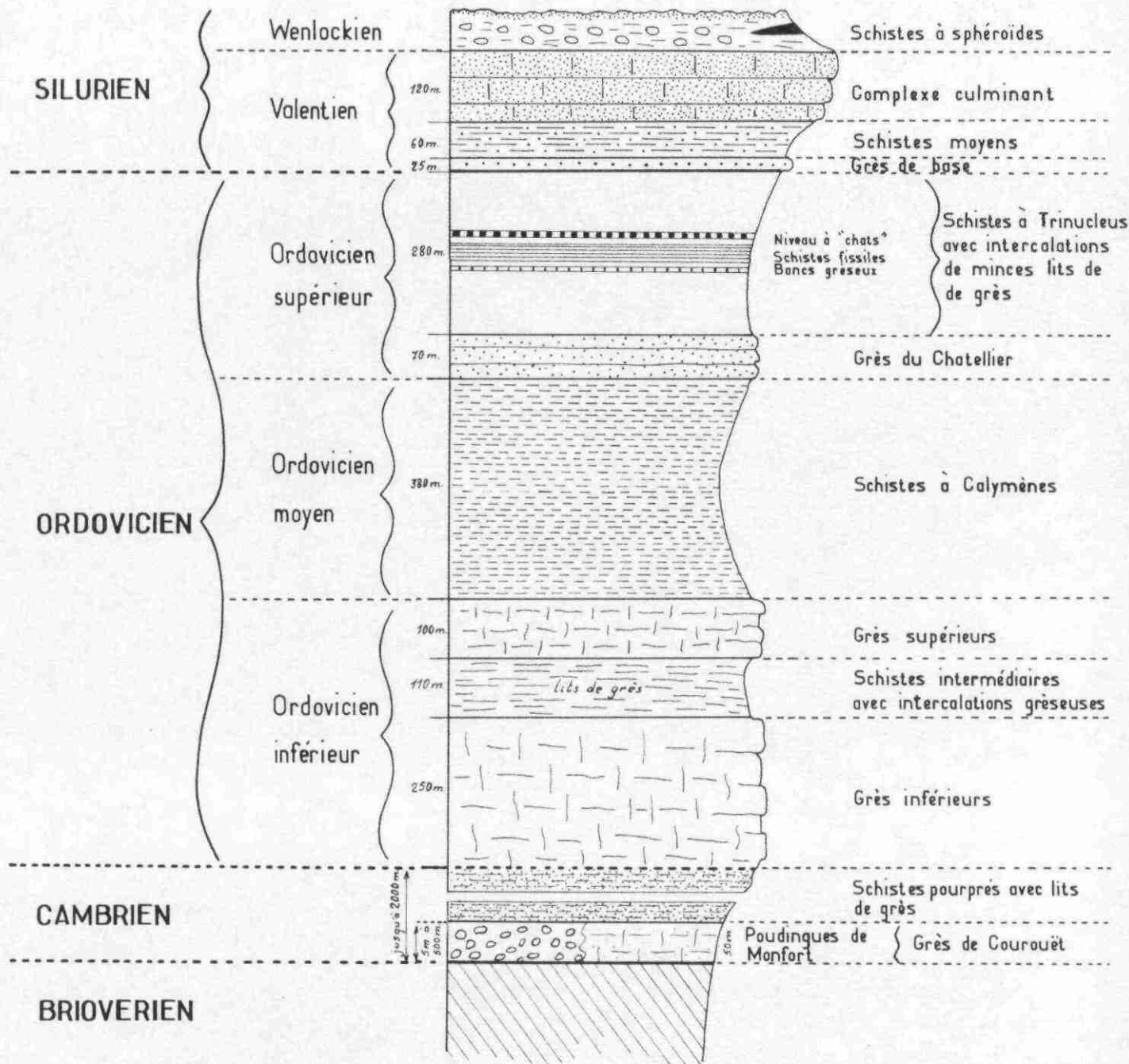


Schéma de la succession normale des couches
(Secteur Bain de Bretagne, Martigné-Ferchaud)

- *Le Cambrien.*

Il est généralement transgressif sur le Briovérien. A la base une *série détritique*, poudingues de Montfort et grès de Courouët, présente de grandes variations de puissance et de granulométrie. Elle est surmontée des Schistes Pourprés, constitués par des alternances de schistes verts et lie-de-vin, en général durs et massifs. Le sommet du Cambrien est parfois constitué de faciès volcaniques, tufs, andésites quartzifères et roches effusives.

- *L'Ordovicien.*

Il comprend :

- les "schistes et *arkoses* de Bains" ;
- les "*grès armoricains*", au milieu desquels s'intercalent les "schistes intermédiaires". Ces formations représentent l'Ordovicien inférieur. C'est dans les *grès armoricains* que se trouvent les couches de minerai de fer encore exploité à Segré.
- l'Ordovicien moyen, constitué des "Schistes à Calymènes".
- l'Ordovicien supérieur, représenté par les "Schistes à Trinucleus", séparés des précédents par les "*Grès du Chatellier*". C'est dans ce niveau que se trouvent les veines ardoisières exploitées dans la région d'Angers.

- *Le Silurien.*

Des alternances de grès et de schistes surmontent les terrains ordoviciens. Ils ont un développement relativement restreint, mais peuvent, localement, présenter un intérêt certain.

- *Le Dévonien* est concordant sur le Silurien. Il est constitué de séries contenant des calcaires, des grès et des schistes.

- *Le Carbonifère.*

Mis à part quelques lentilles ou passées calcaires, le Carbonifère de Bretagne est détritique : schistes, mais aussi grès feldspathiques, *arkoses*, *psammites*, poudingues.

Les niveaux gréseux sont donc loin d'être exceptionnels dans le Massif armoricain, il s'en rencontre pratiquement à tous les étages de la géologie armoricaine.

Mais le socle briovérien est mal connu. L'absence de stratigraphie complète, d'étude sédimentologique fine et de cartographie structurale est un obstacle certain aux tentatives de mise en production des réservoirs possibles. Il n'est pas possible de préciser sans études complémentaires les structures qui pourraient présenter un intérêt hydrogéologique.

Les formations moins anciennes sont mieux connues et les grandes structures synclinales qui affectent en particulier les grès armoricains sont cartographiées depuis Ch. BARROIS tandis que dans certaines zones, les travaux entrepris dans le domaine des concessions d'exploitation du minerai de fer permettent d'accéder aux détails de la tectonique.

33 - L'eau dans les grès

- Les arkoses, grès feldspathiques, grès quartzeux, et à un degré moindre, les grès quartziques, plus ou moins bien consolidés, aux grains plus ou moins grossiers, peuvent avoir un coefficient d'emmagasinement notable, mais leur perméabilité est en général faible à très faible. Ils constituent cependant souvent des masses très puissantes. Un ouvrage qui les traverserait sur une épaisseur importante pourrait alors bénéficier d'une transmissivité notable (la transmissivité est le produit de la perméabilité par l'épaisseur de terrain aquifère). Si on ajoute à cela que les possibilités de rabattement sont d'autant plus grandes que le forage est profond, on voit que l'on peut extraire des débits non négligeables d'une formation en moyenne peu perméable.

Exemple pour fixer les idées :

Soit un forage de diamètre 300 mm, profond de 200 m, ayant traversé 100 m de grès dont la perméabilité moyenne est de 3.10^{-6} m/s (soit 1 000 fois plus petite que la perméabilité rencontrée dans les bassins tertiaires). Dans ces conditions, la transmissivité de l'aquifère (grès) serait de 3.10^{-6} m/s x 100 m = 3.10^{-4} m²/s (environ 1 m²/heure). Un rabattement de 100 m serait obtenu après un pompage ininterrompu de 720 heures (1 mois) à un débit de l'ordre de 65 m³/heure (1 560 m³/jour).

- Les grès quartziques très consolidés et les quartzites peuvent avoir une porosité pratiquement nulle. Mais ils peuvent être découpés par des réseaux de fissures favorables à la circulation de l'eau et présenter de ce fait une perméabilité appréciable permettant de drainer l'eau emmagasinée dans les formations sus et sous-jacentes, moins perméables mais plus poreuses.

Il faut remarquer que la présence de couches de faible épaisseur, dures et massives intercalées dans des formations moins rigides est une situation favorable à la fissuration de ces horizons durs, sous l'action des contraintes tectoniques. Les quartzites fissurés ne seront donc nullement exceptionnels, pour peu qu'on ait tenu compte du contexte tectonique pour implanter un ouvrage.

Quelle que soit la façon dont l'eau peut être produite : grès poreux, peu perméables mais épais, ou alternances de minces lits de grès durs fissurés, son captage ne peut être réalisé que par *forages profonds* (plus de 100 m, et pouvant même dépasser 500 m en certains secteurs). La réalisation de tels ouvrages nécessite des dépenses importantes, bien que très inférieures au coût d'une simple usine de traitement des eaux de surface. L'implantation, la mise en chantier d'un forage profond, ne peuvent être envisagées sans de très sérieuses études préliminaires destinées à supprimer ou diminuer le caractère aléatoire de l'opération.

331 - Utilisations possibles des forages profonds aux grès

- Suivant les conditions géologiques locales, la profondeur de l'ouvrage, la façon dont il est réalisé, et le degré de réussite de l'opération, la productivité d'un forage "profond" aux grès devrait être comprise entre 300 et 2 000 m³/jour, ce qui reste assez limité.

- Son coût élevé lui fera préférer toute autre solution plus compétitive pouvant exister à proximité des besoins à satisfaire.

- Encore qu'assez répandues, les formations gréseuses susceptibles d'être aquifères n'existent pas partout.

Au total, au niveau des collectivités, une solution "forage profond" ne peut être retenue que pour un nombre limité de cas : réseaux de petites ou moyennes importances (1 000 à 8 000 personnes desservies si on considère une consommation journalière de 250 l/hab.) à créer ou renforcer dans un secteur dépourvu d'autres ressources et situé, pour un certain temps encore, à l'écart des grands réseaux d'adduction programmés.

On peut être effrayé par le caractère de nouveauté du type de solution envisagé ici et craindre qu'il nécessite des investissements disproportionnés et contienne des risques d'échecs importants. On doit se souvenir cependant que dans l'Est de la France (pour ne citer que cet exemple), on n'hésite pas à réaliser des forages profonds de 800 à 900 m pour capter la nappe des grès vosgiens, ce qui tend à démontrer la rentabilité d'une telle opération :

Le coût d'un ouvrage ayant les caractéristiques de celui imaginé dans l'exemple de la page 35 peut être de l'ordre de 200 000 F. S'il est exploité en moyenne à 1 200 m³/jour pendant 20 ans (durée de vie normale pour un forage réalisé selon les règles de l'art), son incidence sur le prix de l'eau extraite est de l'ordre de 2 à 2,5 centimes par mètre cube (en francs constants).

En outre :

- Si les conditions géologiques sont favorables, le forage aura pu être réalisé à proximité immédiate des lieux d'utilisation de l'eau. L'économie ainsi réalisée sur les longueurs de canalisations d'amenée peut à elle seule compenser le coût élevé du forage.

- L'eau extraite aura besoin d'un minimum de traitement : soit déferrisation seule, soit déferrisation et neutralisation. En revanche, elle sera parfaitement à l'abri de toute pollution, chimique ou bactériologique. Les populations y gagneront en sécurité, et les contraintes liées à l'existence de périmètres de protection (achat de terrains, interdiction de certaines activités) pourront être extrêmement réduites.

Du point de vue d'un industriel, une telle opération peut être financièrement exceptionnellement intéressante :

Si l'ouvrage précédent peut être réalisé sur les lieux mêmes de l'utilisation de l'eau et si seul un traitement de déferrisation est nécessaire, on obtiendra de l'eau à environ 20 centimes le mètre cube (frais de pompage et de traitement - voir plus loin l'exemple du forage de Derval) ; soit, par rapport à une eau de distribution publique qui serait achetée 80 centimes le mètre cube (prix bas), une économie annuelle de :

$$(0,80 - 0,20) \times 1200 \text{ m}^3/\text{jour} \times 300 \text{ jours} = \underline{216\ 000 \text{ Francs}}$$

Cependant un tel ouvrage ne peut être envisagé n'importe où, ni réalisé n'importe comment. La recherche d'eau par forage profond présente un caractère aléatoire certain qui ne peut être réduit que par une étude géologique préliminaire détaillée et une exécution (forage, équipement, développement) parfaitement adaptée aux conditions locales.

332 - Réalisations connues

- Forage d'AEP de Marcillé-Raoul

La commune de Marcillé-Raoul est alimentée, ainsi qu'une laiterie, par un forage de 70 m de profondeur réalisé dans le Briovérien.

Coupe sommaire :

- de 0,00 à 2,60 : argile molle avec passages de quartz
- de 2,60 à 13,80 : schistes plus ou moins gréseux avec passages de quartz
- de 13,80 à 41,00 : grès schisteux avec nombreuses veines de quartz
- de 41,00 à 70,00 : grès francs avec veines de quartz, fissurés ou fracturés de 47,00 à 48,50, de 50,00 à 51,50 et à 65,00 m.

L'ouvrage est équipé d'un tubage crépiné de 40,00 à 46,00 et de 62,30 à 66,30.

Un pompage d'essai a été réalisé en 1967 pour la réception du forage. Il a eu lieu au débit moyen de 40 m³/heure et le rabattement au bout de 48 heures était de 32,80 m.

La transmissivité déduite de cet essai est d'environ 10^{-3} m²/s ce qui, pour une hauteur d'aquifère captée de 10 m seulement représente une perméabilité moyenne de 10^{-4} m/s.

- Remarques :
- a) l'analyse de pompage d'essai fait nettement apparaître que l'ouvrage est affecté de pertes de charges parasites qui doivent au moins doubler le rabattement (défaut d'équipement ou/et de développement).
 - b) seulement 10 m d'aquifère sur 70 sont captés. En particulier, les zones fracturées situées entre 47,00 et 48,50 et entre 50,00 et 51,50 ne sont pas captées.

- Forage de la laiterie de Derval (Loire-Atlantique)

Ce forage, profond de 241 m fournit de l'eau ferrugineuse, qui après traitement (aération et permanganate) alimente l'ensemble de l'usine.

Coupe sommaire :

- de 0,00 à 13,00 : sables argileux
- de 13,00 à 71,80 : schistes sableux et argile
- de 71,80 à 95,30 : "Sable"
- de 95,30 à 106,00 : schistes
- de 106,00 à 116,30 : "Sable"
- de 116,30 à (168,00) : schistes
- de (168,00) à 241 : "marnes métamorphiques" (= schistes bleus)

L'ouvrage fournit régulièrement depuis plusieurs années 250 à 350 m³/jour d'une eau qui, déferrisation comprise, revient à moins de 20 centimes le mètre-cube.

- Remarques :
- a) La plus grande partie du fer contenu dans l'eau extraite doit provenir de la corrosion des conduites d'exhaure qui doivent être changées environ tous les trois ans.

- b) Sous la dénomination de "sable", le sondeur a sans doute voulu désigner des grès tendres, formations a priori perméables et favorables à la production d'eau. Malheureusement, ces quelques 34 m de "sables" gênaient pour la suite du forage entrepris avec des techniques assez archaïques. Ils ont donc été soigneusement cimentés (!)

Ces deux ouvrages paraissent extrêmement intéressants :

- ils ont été réalisés dans des formations (Briovérien à Marcillé-Raoul, schistes et arkoses de Bains à Derval) a priori peu favorables, en tous cas moins favorables que les grès armoricains.
- ils ont été équipés de façon déplorable surtout dans le cas du forage de la laiterie de Derval.

Malgré cela, ils fournissent des résultats intéressants.

- Sondage dans la région de Château-Gontier

Un des sondages exécutés en 1971 par le BRGM (Division des Recherches Minières) dans la région de Château-Gontier a fait l'objet d'un essai sommaire à l'air comprimé. Profond de seulement 70 m, cet ouvrage qui recoupe le Briovérien grés-schisteux, a ainsi fourni une quinzaine de m³/heure. Il ne fait pas de doute qu'un forage d'eau réalisé à cet endroit avec tout le soin nécessaire pourrait fournir plusieurs dizaines de m³/heure.

333 - Indices fournis par les travaux miniers

- Exhaure des mines

Il est bien connu que certaines mines, notamment celles qui se trouvent dans les grès armoricains peuvent avoir des débits d'exhaure très importants. Ainsi les mines de la Bruz devaient sortir de 600 m³/heure (en étiage) à 1 300 m³/heure (en période de hautes eaux).

Remarques : Les exemples fournis par l'exhaure des mines paraissent devoir être traités avec prudence :

Le développement des galeries est souvent considérable, mais si on faisait un rapport entre la longueur totale des galeries d'une exploitation minière et la profondeur

d'un forage pour en estimer les possibilités de production, on sous-estimerait gravement celles-ci. En effet, les galeries suivent en général une couche, ou un nombre restreint de couches de minerai qui, pour être exploitable, doit être peu ou pas altéré donc, par définition, le siège de circulations d'eau très réduites.

Au contraire, un forage d'eau, pour être efficace dans ce type de formation, doit recouper le maximum d'horizons, bénéficiant ainsi des zones productives évitées par les mineurs.

- Sondages de recherche

Dès 1922, F. KERFORNE (B.S.G.M. de Bretagne - Tome III - Fascicule 2 - p. 124) signalait à propos des grès, qu'il classait parmi les roches perméables

"Dans les recherches pour minerai de fer qui ont été instituées au sud de Rennes avant la guerre, un sondage a atteint à 173 m une source artésienne ayant à l'orifice un débit de plus de 30 l par minute ; les grès avaient été rencontrés à 145 m ; ...

"Un autre a rencontré à 80 m de profondeur une source donnant 60 l par minute.

Enfin un troisième, profond de 175 m a rencontré une source remontante qui a débordé au-dessus d'un tubage de 8 m de haut, placé sur l'orifice".

De nombreux sondages exécutés plus récemment par les Sociétés des Mines de St Pierremont, Lorraine-Escaut et Minières de Rougé fournissent des indices positifs. Les informations ainsi recueillies sont très sommaires, mais encourageantes. Pratiquement chaque sondage a rencontré à plusieurs reprises des niveaux perméables et aquifères, comme l'attestent les pertes d'injection et dilutions de boues constatées.

Plusieurs de ces ouvrages ont été artésiens. Les débits naturels étaient en général assez faibles, de l'ordre de 1 à quelques m³/heure. Malheureusement, aucun essai n'y a été réalisé, ce qui empêche de conclure quant à leur productivité possible.

Il serait fastidieux d'énumérer tous les sondages qui se sont révélés artésiens (ils ne nous sont d'ailleurs pas tous connus pour le moment). Par exemple, l'un, à Teillay a trouvé plusieurs m³/h au contact des schistes intermédiaires et du grès armoricains ; plusieurs ont été jaillissants sur le territoire de la commune de St Sulpice des Landes, un en particulier a fourni un débit suffisant (plusieurs m³/h) pour alimenter la circulation d'eau nécessaire au forage de trois autres ouvrages...

Il faut encore regretter que ces très importants travaux de recherches minières n'aient pas été accompagnés systématiquement d'observations relatives aux eaux souterraines rencontrées et complétés par des essais spécifiques. Pour un supplément de dépenses négligeable, on aurait ainsi obtenu des informations détaillées permettant, à défaut de fer, d'exploiter l'eau contenue dans les grès. Néanmoins, l'examen attentif des archives détaillées de ces sondages peut permettre, localement, d'implanter des forages d'eau avec le maximum de chances de succès.

Pour être objectif, il convient de signaler qu'au cours des dernières décennies un certain nombre de forages ont été tentés dans diverses formations du Massif armoricain. La plupart ont abouti à des échecs. Pratiquement tous ces ouvrages ont été implantés sur les conseils de sourciers qui, par l'intermédiaire de leurs baguettes ou leurs pendules "voyaient", à des profondeurs parfois importantes (et bien sûr sans tenir compte de la structure des couches ni de la nature des roches), des "rivières souterraines" venant des Alpes, du Massif Central, voire d'Irlande, d'Ecosse ... ou d'ailleurs.

Dans ces conditions, il faut plutôt s'étonner que certains de ces forages se soient, malgré tout, révélés productifs. C'est, semble-t-il, une preuve supplémentaire de ce que le Massif armoricain n'est pas aussi pauvre en eau souterraine que le veut la tradition.

34 - Localisation des formations gréseuses

Sur les cartes départementales "d'orientation des recherches d'eau souterraine" présentées en fin de rapport ont été reportées de façon schématique, outre les régions granitiques, susceptibles de contenir de l'eau dans leurs parties arénisées (cf plus haut, chapitre 2),

- les régions où l'on trouve des formations en moyenne pauvres en eau souterraine (en blanc sur les cartes). Il s'agit pour l'essentiel des terrains pré-cambriens (Briovériens) formés surtout de schistes. Il y existe des horizons gréseux, voire conglomératiques, parfois même très importants, mais extrêmement mal connus. De ce fait, leur utilisation comme réservoirs d'eau est très problématique et il serait impossible, dans l'état actuel des connaissances, d'extrapoler à un autre secteur les résultats obtenus localement.

- les régions où l'on trouve les formations qui peuvent être aquifères. Il s'agit des terrains post-Briovériens. Ils sont de natures diverses, mais les grès y sont fréquents et parfois très puissants. Surtout, la structure des couches, en vastes synclinaux orientés W.N.W.-E.S.E., est assez bien connue, et les différents horizons possèdent une

continuité qui permet de les retrouver d'un point à un autre. Quand ils affleuraient assez largement pour être représentables à l'échelle des cartes, on a distingué les "grès armoricains", formations particulièrement propices à l'implantation de forages profonds.

Tous les points des surfaces grisées ou hachurées des cartes présentées ne sont pas également favorables. Il s'en faut de beaucoup puisque, aussi bien, y sont incluses des formations stériles comme les "schistes à Calymènes" (schistes ardoisiers) de l'Ordovicien moyen. Les grès eux-mêmes sont variables d'un endroit à un autre, tant en puissance qu'en nature.

Si on envisage la réalisation d'un captage profond, il est nécessaire de procéder à une étude soigneuse et approfondie de la géologie du site envisagé de façon à réduire le plus possible le facteur d'incertitude. L'examen sur photos aériennes et au sol, les observations relatives à la nature des terrains, à leur géométrie, à la direction et au pendage des couches sont indispensables pour pouvoir préciser les profondeurs à atteindre, l'épaisseur et l'état des formations à capter. En certains cas, des sondages de reconnaissances préalables pourront être souhaitables. Ces sondages pourront être peu profonds et de faibles diamètres, mais, répétés à différents niveaux de la formation affleurante et accompagnés de pompages d'essai (par émulsion d'air, par exemple), ils permettront de mieux connaître la structure et la géométrie des couches, de définir l'horizon le plus perméable, de préciser les relations entre la tectonique et la fissuration...

35 - Contraintes d'exécution

L'expérience acquise par les sondeurs dans certains terrains bien connus (Secondaire du Bassin Parisien, par exemple) peut se révéler pratiquement inutile lorsqu'ils seront en face des formations primaires armoricaines. Les grès ordoviciens ne se forment pas comme les sables du Perche ou le tuffeau de Touraine. Il est donc nécessaire de définir a priori, avec précision, les modalités de leur intervention.

Trois paramètres essentiels sont à prendre en considération pour réaliser avec succès un forage profond dans le socle armoricain. Ce sont :

- La dureté inhabituelle des terrains rencontrés allant du grès massif à grain fin aux quartzites ;
- La perméabilité relativement faible des aquifères, perméabilité de fissures, peu ouverte liée à la fracturation tectonique qui s'est développée jusqu'à l'époque alpine;
- L'agressivité des eaux.

Dureté des terrains :

Les méthodes rotary classiques ne sont pas adaptées au

forage des terrains durs et abrasifs, en raison de l'usure rapide des outils. On peut toutefois envisager l'emploi de ces techniques, avec des outils spéciaux (rock-bits à billes de carbure, procédé Hughes), à la condition de pouvoir assurer sur l'outil une charge suffisante (deux tonnes/pouce) à l'aide de masses-tiges ou de vérins.

Le recours au battage peut également être envisagé, mais si cette solution peut s'avérer techniquement praticable, son intérêt économique sera limité à cause des très faibles vitesses d'avancement obtenues^o. On pourra également considérer l'emploi des méthodes de forage au diamant. Ces techniques peuvent fournir des vitesses d'avancement relativement élevées, mais on devra prendre garde à leur prix de revient, eu égard au coût des outils et à la fréquence des manoeuvres en cas de carottage.

En tout état de cause, il faudra pouvoir disposer de matériels permettant la mise en oeuvre successive de plusieurs de ces techniques, un forage dans les terrains variés du Primaire Armoricaïn étant difficilement justiciable d'une seule d'entre elles.

Perméabilité des aquifères :

La mise en production d'un forage et son débit définitif dépendent en grande partie du colmatage des terrains pendant la foration c'est-à-dire de la qualité du fluide de forage employé. Il ne semble pas indiqué d'utiliser des boues lourdes classiques à la bentonite qui, si elles donnent satisfaction dans le domaine pétrolier, risquent fortement de colmater définitivement les fractures fines productives d'eau.

L'emploi de fluides de forage moderne dont les caractéristiques rhéologiques variables dans le temps sont susceptibles d'être programmées dès le début du chantier semble la solution la mieux appropriée au problème posé : la boue utilisée dans ce cas est à base de produits organiques, elle présente les mêmes qualités qu'une boue bentonitique classique, mais un catalyseur judicieusement dosé ajouté au mélange dès le début des opérations permet à la boue de retrouver une fluidité voisine de celle de l'eau au bout d'une durée fonction de la concentration du catalyseur. Dans ces conditions et en faisant coïncider la perte des propriétés caractéristiques de la boue avec la mise en production, on facilite largement le développement du puits.

Agressivité des eaux :

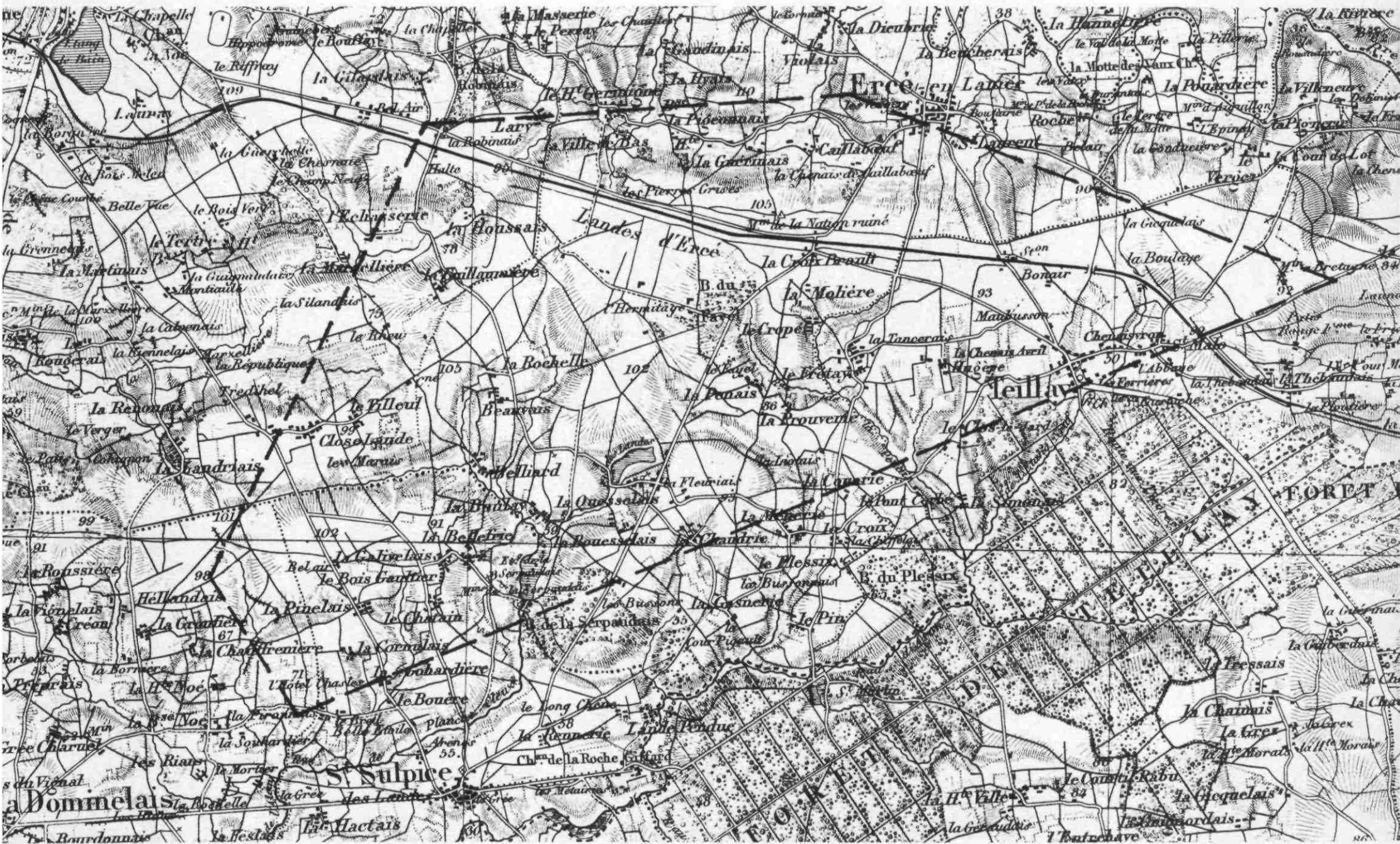
Beaucoup d'eaux connues dans le Massif Armoricaïn sont caractérisées par un pH acide, souvent même inférieur à 6 et par une teneur en gaz carbonique libre supérieure à 30 ou 50 mg/l. Dans ces conditions, les aciers utilisés habituellement en forage (J 55, par ex.) ne sont pas aptes à résister à la corrosion. La mise en place de tubages en aciers spéciaux (chromesco 3, APS 20, etc) semi inoxydables permet d'éviter la mobilisation du fer et la détérioration rapide des ouvrages.

* Toutefois, les méthodes par battage rapide ("marteau fond de trou") peuvent être particulièrement intéressantes au niveau des sondages de reconnaissance. Ces méthodes de forage permettent des avancements très rapides (plusieurs dizaines de mètres par jour) à des prix de revient extrêmement bas. Mais, actuellement, le battage rapide est limité en diamètre et en profondeur par la puissance des compresseurs disponibles sur le marché. On peut toutefois descendre assez facilement jusqu'à 70 ou 100 m de profondeur dans un diamètre suffisant pour permettre un pompage à l'émulleur.

ZONE D'IMPLANTATION D'UN FORAGE D'EAU AUX GRES ARMORICAINS

Ille-et-Vilaine

Echelle 1/50000



De plus, la teneur en fer dissous de l'eau produite se trouve réduite d'autant. A titre d'exemple, le forage de Derval décrit précédemment produit environ 100 000 m³ d'eau par an. A raison de 10 mg/l de fer, cela représente environ une tonne de fer chaque année. Ce poids est comparable à celui du métal enlevé par la corrosion à la colonne de production qui doit être changée tous les deux ou trois ans. Il apparaît donc avec certitude que dans ce cas précis, une grande partie du fer trouve son origine non dans l'eau de la nappe mais dans un équipement défectueux de l'ouvrage.

L'investissement correspondant à la mise en place de tubes en aciers spéciaux sera rapidement récupéré ne serait-ce que par la diminution des frais qu'entraîne la déferrisation.

36 - Travaux à entreprendre - Réalisations possibles

Les recherches d'eau dans les grès ne sont pas justiciables de programmes généraux comme pour les nappes d'arènes. Chaque cas est particulier et nécessite une adaptation particulière des principes généraux de reconnaissance et de forage. Mais chaque réalisation, si elle est suivie et contrôlée avec suffisamment d'attention, fournira une expérience utile aux travaux ultérieurs.

Nous avons envisagé ici, parmi les différents cas possibles, deux types de programmes dans des secteurs géographiquement et stratigraphiquement très distincts. Leur réalisation nécessiterait des investissements relativement importants (comparés à ceux nécessités par le captage d'une source), mais permettrait sans aucun doute de fournir de l'eau de bonne qualité à des régions actuellement déficitaires.

361 - Forage d'eau aux grès armoricains dans le Sud du département d'Ille-et-Vilaine.

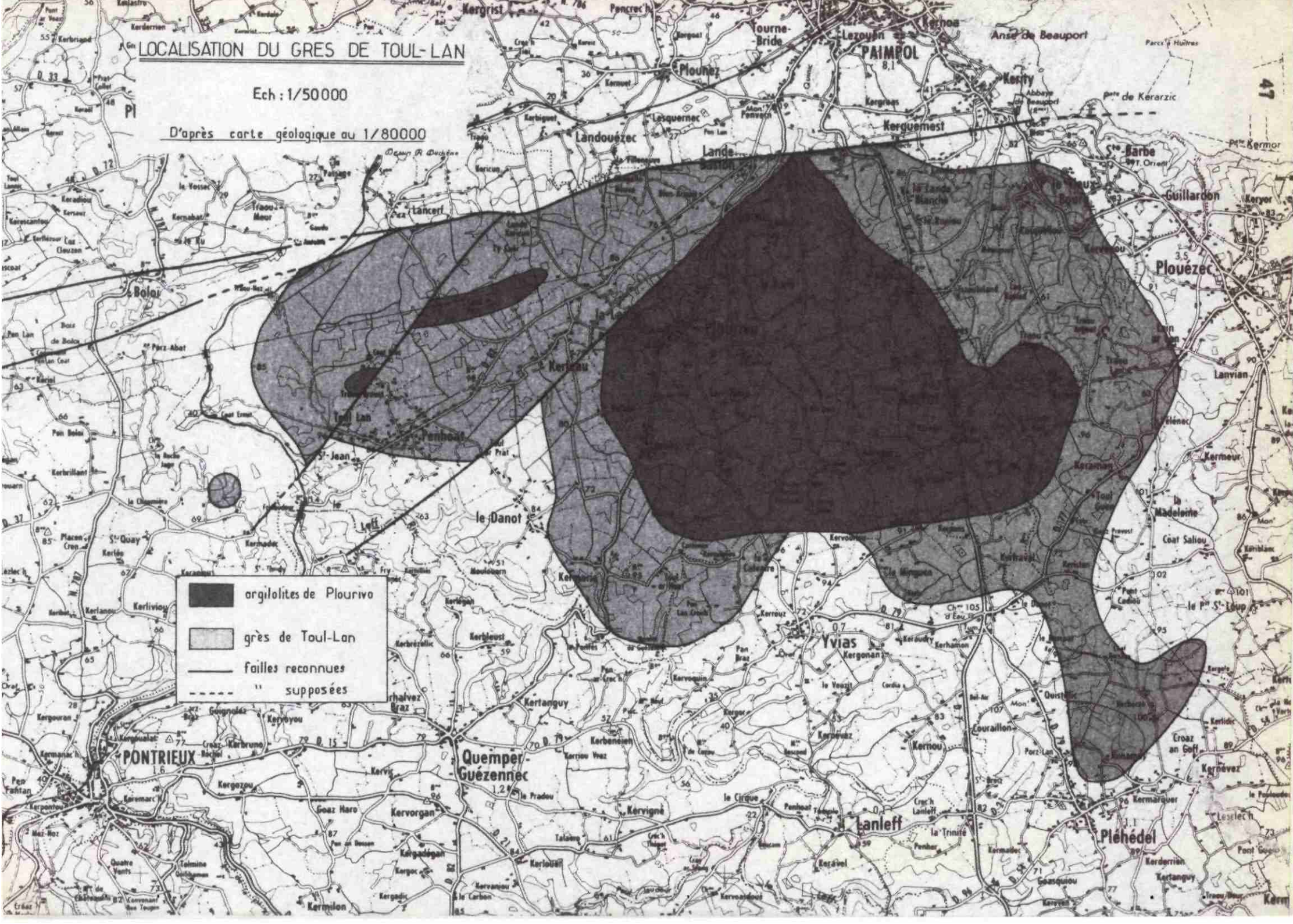
Dans le Sud d'Ille-et-Vilaine, les "grès armoricains" (Ordovicien inférieur) ont été explorés par un grand nombre de sondages miniers (une quarantaine, profonds de 100 à 400 m à l'intérieur du périmètre retenu). L'eau souterraine n'entraîne pas dans les préoccupations des sondeurs qui ont réalisé ces travaux, aussi, les observations qui s'y rapportent sont-elles succinctes. Elles sont néanmoins suffisantes pour témoigner du caractère aquifère des grès (cf. plus haut, § 333). En outre, nous disposons ainsi de coupes suffisamment précises pour implanter un ouvrage en connaissance de cause.

Un forage, d'une profondeur de l'ordre de 250 à 300 m, pourrait être réalisé dans le périmètre délimité par la Dominelais, Saint Sulpice des Landes, Teillay et Ercé en Lamée (cf. extrait de carte joint).

LOCALISATION DU GRES DE TOUL-LAN

Ech : 1/50000

D'après carte géologique au 1/80000



Ce secteur est encore relativement vaste, mais l'implantation, qui doit tenir compte d'impératifs tels que les facilités d'accès, la proximité des lignes électriques et des stations de relèvement ... etc, peut très rapidement être précisée.

L'existence des sondages miniers, les indices qu'ils ont fournis sont des atouts précieux qui doivent permettre, dans la mesure où ils sont correctement utilisés, de pratiquement supprimer les risques d'échec.

362 - Recherches et implantation d'un forage dans les grès de Toul-Lan (région de Paimpol, Côtes-du-Nord)

D'âge mal déterminé en raison de l'absence de fossiles, le grès dit "de Toul-Lan" est interprété comme étant dévonien (1) dans la dernière édition (1970) de la feuille au 1/320 000 Rennes-Cherbourg. Il est transgressif sur les terrains (également dévoniens) sous-jacent : porphyrites de Plourivo, grès rouges de la Roche-Jagu, grès et argilolites de Port-Lazo.

C'est un grès grossier, feldspathique, généralement rose, alternant avec des bancs de grès plus fin, de couleur rouge ; on y observe des niveaux conglomératiques. A l'extraction, il donne un matériau d'empierrement de qualité médiocre, car trop friable.

Au Sud de Paimpol, le grès de Toul-Lan dessine ce qui paraît être un brachy synclinal assez peu penté (de l'ordre de 30°) - cf. extrait de carte joint - limité au Nord par la faille du Trégorrois. Il est en outre découpé par des failles de tassement orientées du NE au SW. Cette formation couvre une superficie d'environ 40 km², dont 15 sous les "argilolites de Plourivo". Sa puissance est inconnue, mais doit, au moins en certains points, être supérieure à 300 m.

On trouve donc réunies dans cette région, des conditions qui, a priori, devraient être très favorables à la présence d'eau souterraine : grès grossier sur une épaisseur et une superficie importante, découpé en panneaux, par des failles susceptibles d'influer favorablement sur les conditions de fissuration des horizons plus durs intercalés dans l'ensemble.

Si on veut envisager le captage de cette eau (pour l'instant hypothétique), il convient, bien entendu, de confirmer son existence et de déterminer la situation la plus favorable à l'implantation d'un forage. Les travaux préliminaires indispensables devraient alors être réalisés en deux phases distinctes :

1° - *Reconnaissance géologique et hydrogéologique de surface.*

Cette première reconnaissance effectuée à partir de photographies aériennes et sur le terrain doit viser à préciser les limites des formations, leurs pendages, la place et la direction des

(1) Certains auteurs, et la carte au 1/20 000 de Tréguier (2^e édition, 1966), le datent au contraire du Houiller.

failles, ainsi que l'allure de la surface piézométrique (sources et puits particuliers existants). En tenant compte des données ainsi recueillies, elle doit, enfin, implanter les sondages de la deuxième phase.

2° - Sondages de reconnaissance

Ces sondages pourront être réalisés au battage rapide (marteau fond de trou), méthode particulièrement économique. Chacun sera complété par un pompage d'essai (à l'émulseur) destiné à déterminer les qualités aquifères des horizons traversés. Ils devront être implantés à différents niveaux du grès, de façon à ce que, en tenant compte du pendage des couches et de la largeur d'affleurement, il puisse être exploré sur toute son épaisseur. Enfin, des sondages de reconnaissance devront être réalisés de part et d'autre des failles pouvant exister dans le secteur prospecté, pour reconnaître leur influence sur la fissuration du grès dans chaque compartiment (abaissé ou relevé).

On connaîtra ainsi le niveau stratigraphique, la position structurale les plus favorables, et par les pompages d'essai, la productivité des différents horizons gréseux. Un forage d'exploitation pourra alors être implanté avec le maximum d'efficacité et le minimum de risques.

Il ne saurait être question d'explorer l'ensemble du massif gréseux, mais seulement les cinq à dix kilomètres carrés les plus proches du lieu à alimenter.

Grâce à la reconnaissance de première phase (reconnaissance de surface), le nombre des sondages nécessaires pourra être assez limité. Dépendant des conditions locales (épaisseur des grès, pendage des couches, absence ou présence et nombre de failles;..) ce nombre ne peut être défini a priori. Pour fixer les idées, on peut penser que cinq à dix sondages de 50 à 70 mètres de profondeur seraient très suffisants. Compte tenu du faible prix de revient du battage rapide (de l'ordre de 100 francs par mètre linéaire), l'ensemble de l'opération pourrait être réalisé à un coût très acceptable, parfaitement justifié par la perspective de pouvoir fournir de l'eau de bonne qualité à une région actuellement déficitaire.

Par ailleurs, les résultats obtenus seront, dans une certaine mesure, extrapolable à d'autres secteurs du grès de Toul-Lan, à proximité desquels des besoins pourraient également se manifester.

CONCLUSION

Il n'existe pas en Bretagne de grands réservoirs aquifères tels qu'on peut en trouver dans le Bassin Parisien ou en Aquitaine.

Mais, sans être très riche en eaux souterraines, le Massif Armoricaïn est loin d'en être dépourvu. Ses ressources, contenues principalement dans les formations gréseuses et dans les arènes provenant de l'altération des roches plutoniques grenues, sont actuellement vierges de toute exploitation, puisqu'en captant les sources qui en sortent, on s'est contenté jusqu'à présent d'en utiliser les trop-pleins.

La mise en exploitation des réservoirs armoricains, souvent fragmentés et difficiles à atteindre est malaisée. Elle nécessite, surtout au niveau de la recherche, un effort particulier, mais qui semble parfaitement justifié par les résultats qu'on est en droit d'en attendre. L'évolution récente des connaissances théoriques, des techniques d'investigation et de captage, dont la Bretagne s'est tenue quelques temps à l'écart, permet maintenant de surmonter ce genre d'obstacle.

Il n'y a pas concurrence, mais complémentarité entre les réservoirs aquifères et les cours d'eau de surface. En définitive, le choix, quand un choix est possible, se fera surtout à partir de critères économiques : coût du mètre cube distribué, compte tenu des impératifs de qualité et des possibilités de satisfaire aux besoins maximaux des périodes de pointe.

Il apparaît donc extrêmement souhaitable que les possibilités offertes par les arènes et les grès du Massif Armoricaïn soient largement diffusées auprès des organismes et personnalités se préoccupant des problèmes posés en maints secteurs par le déficit en eau de bonne qualité. Des solutions "eau souterraine" devraient alors pouvoir être envisagées de façon systématique et ce, sur des bases techniques aussi bien que théoriques, modernes et adaptées au problème breton.

ORIENTATION DES RECHERCHES
D'EAU SOUTERRAINE

Cartes à l'échelle du 1/500 000 pour les départements de :

COTES DU NORD
FINISTERE
ILLE ET VILAINE
MORBIHAN

CARTE D'ORIENTATION DES RECHERCHES D'EAU SOUTERRAINE

CÔTES-DU-NORD

ILE BRÉHAT



Granites (sens large) possibilité de réserves importantes dans zones altérées



Formations schisto-grésseuses parfois aquifères (possibilité d'exploitation de réserves profondes par forages)



Formations surtout schisteuses souvent pauvres en eau souterraine

LA MANCHE

FINISTÈRE

VILAINES

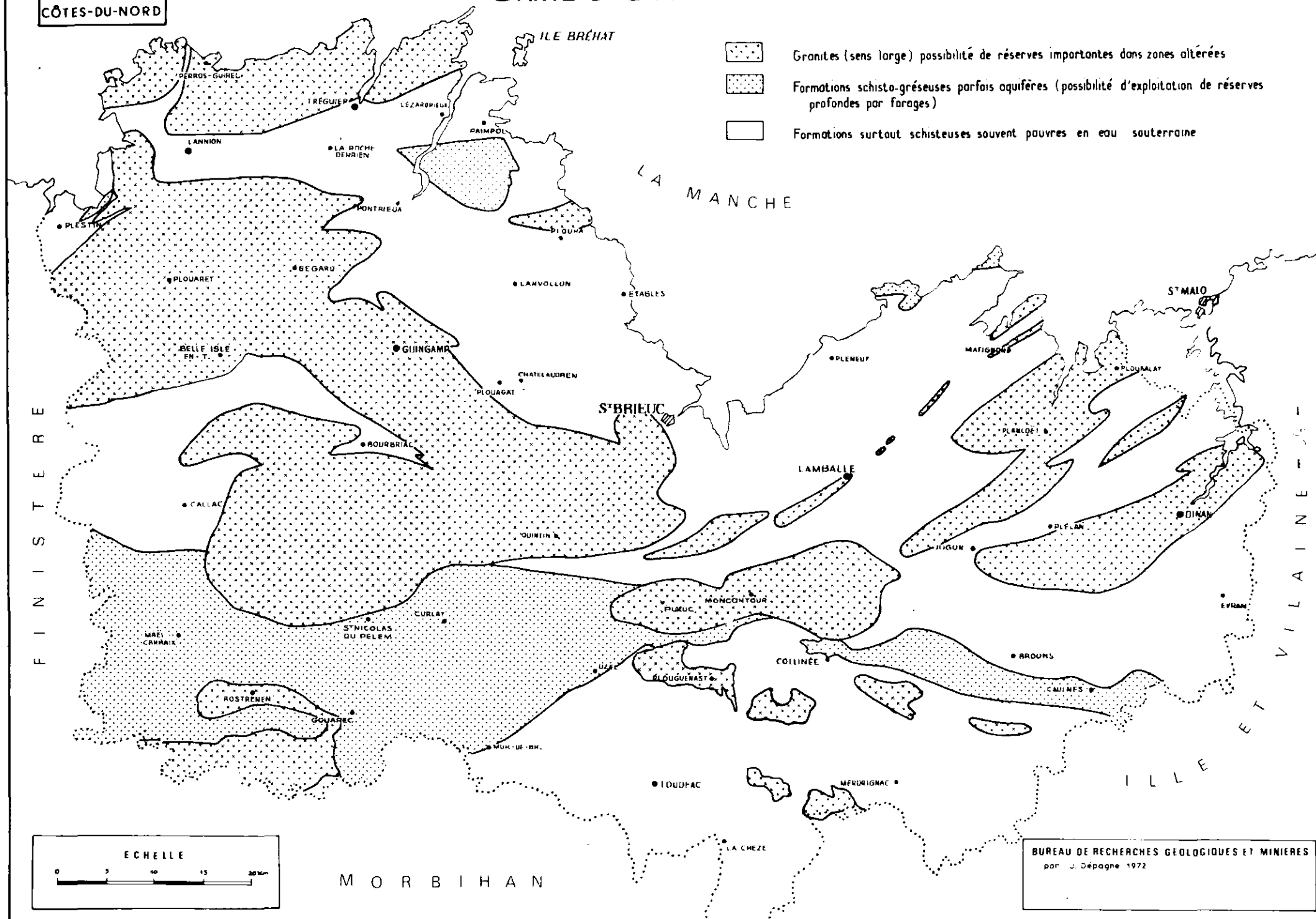
ILLE ET

MORBIHAN

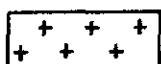
ECHELLE



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
par J. Dépaigne 1972



ORIENTATION DES RECHERCHES
D'EAU SOUTERRAINE



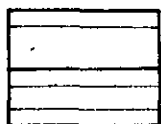
Formations granitiques

*possibilité de réserves importantes
dans les zones altérées*



Formations essentiellement gréseuses

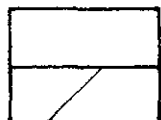
*(grès armoricain) souvent riches
en eau souterraine*



Formations schisto-gréseuses

*(dévonodinantien) parfois
aquifères*

*possibilité d'exploita-
tion de réserves pro-
fondes par forages.*

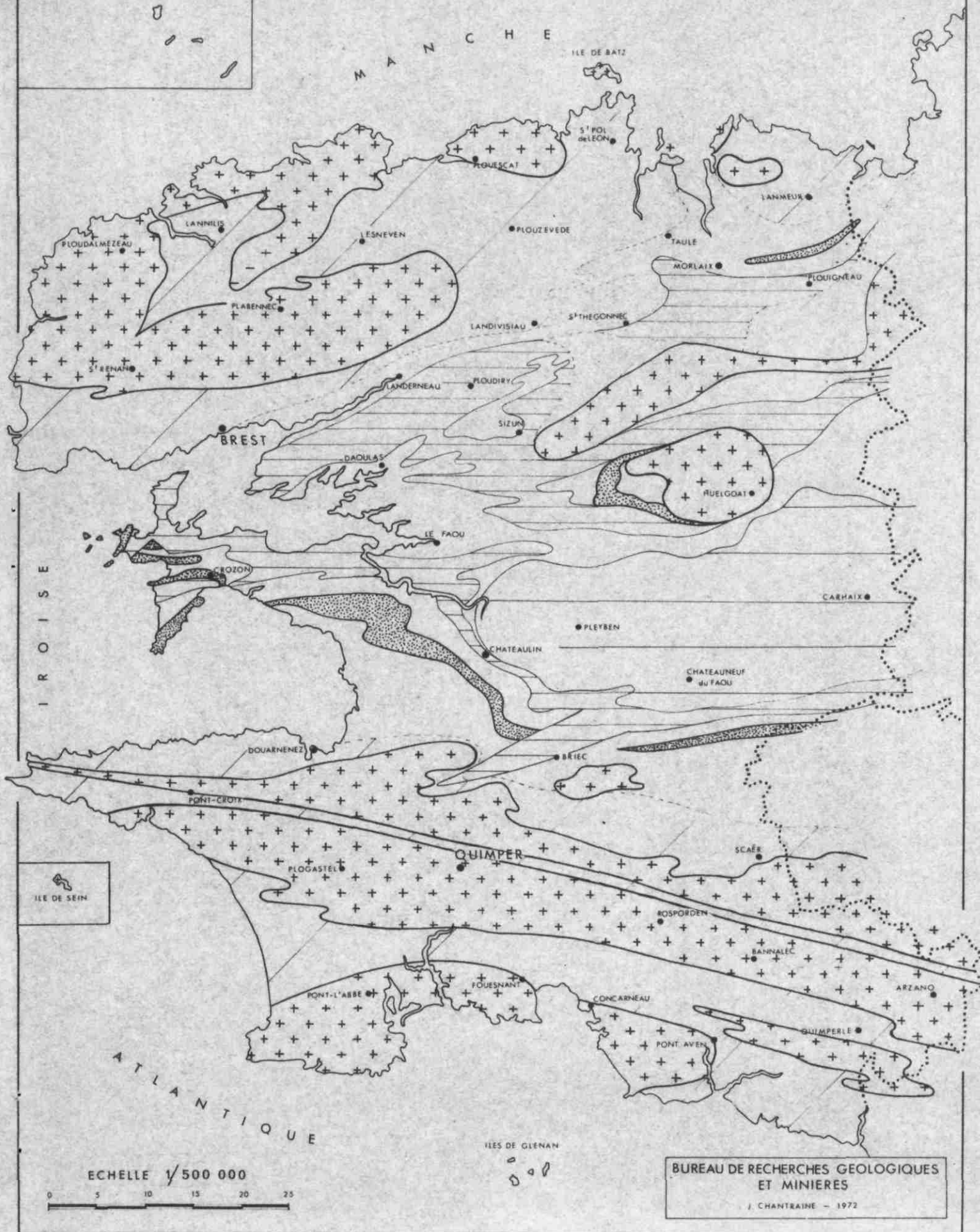


Formations surtout schisteuses ou gneissiques

*souvent pauvres en eau souterraine
possibilité de réserves improbable*

FINISTERE

ORIENTATION des RECHERCHES d'EAU SOUTERRAINE



ECHELLE 1/500 000

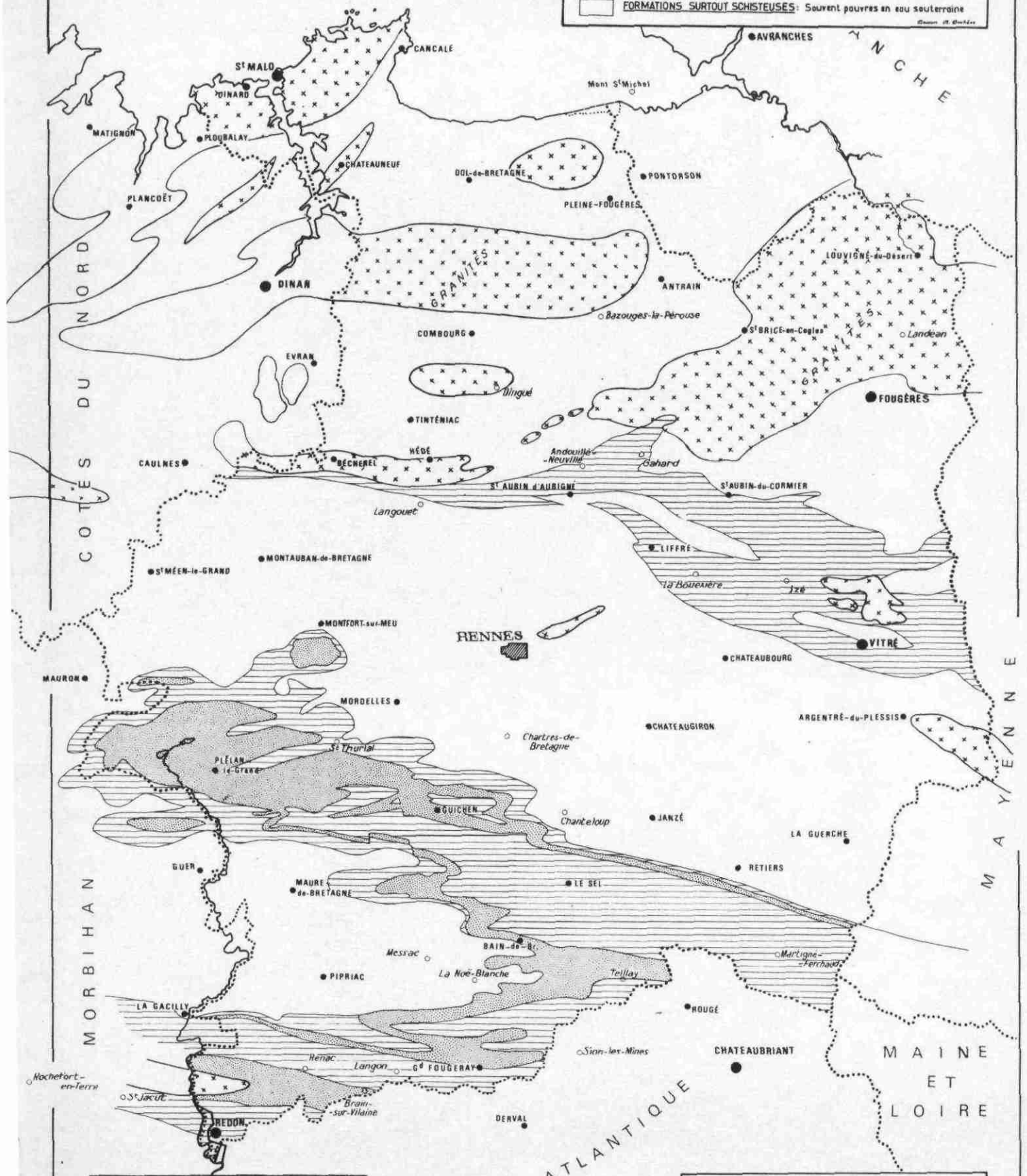
BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES
ET MINIERES

J. CHANTRAINE - 1972

CARTE D'ORIENTATION DES RECHERCHES D'EAU SOUTERRAINE

ILLE ET VILAINE

- FORMATIONS GRANITQUES : Possibilité de réserves importantes dans les zones altérées
 - FORMATIONS ESSENTIELLEMENT GRESEUSES : (Grès armoricain) souvent riches en eau souterraine
 - FORMATIONS SCHISTO-GRESEUSES : Parfois aquifères
 - FORMATIONS SURTOUT SCHISTEUSES : Souvent pauvres en eau souterraine
- POSSIBILITE D'EXPLOITATION DE RESERVES PROFONDES PAR FORAGES.



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

