Eléments d'un inventaire des gisements de sel français

Gérard Fries

▶ **To cite this version:**

Gérard Fries. Eléments d'un inventaire des gisements de sel français. Sciences de l'ingénieur [physics]. 1981. hal-01909923

HAL Id: hal-01909923

https://minesparis-psl.hal.science/hal-01909923

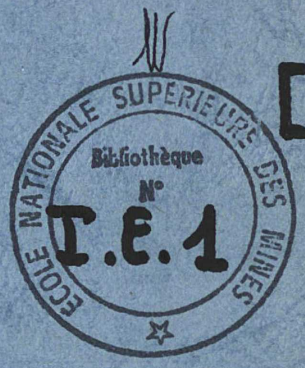
Submitted on 31 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

E.N.S.M.P.

Consultation
sur place



[132]

ELEMENTS D'UN INVENTAIRE DES GISEMENTS DE SEL FRANCAIS.

PERSPECTIVES D'UTILISATION.

(SUJET PROPOSÉ PAR LA DIRECTION DE LA QUALITÉ
ET DE LA SÉCURITÉ INDUSTRIELLE DU MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE).

G. FRIES
(Ingénieur Elève de 3e année)

1981

E.N.S.M.P.

Consultation sur place

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES
Bibliothèque
N°
I.E.1
[132]

ELEMENTS D'UN INVENTAIRE DES GISEMENTS DE SEL FRANCAIS.

PERSPECTIVES D'UTILISATION.

(SUJET PROPOSÉ PAR LA DIRECTION DE LA QUALITÉ ET DE LA SÉCURITÉ INDUSTRIELLE DU MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE).

[Gerard]
G. FRIES
(Ingénieur Elève de 3e année)

1981

AVANT-PROPOS

Lorsque ce sujet sur le sel m'a été proposé voici un an, je savais déjà que la géologie allait m'occuper pour quelques années. Cette étiquette de "futur géologue" allait probablement m'obliger à travailler seul.

Ce fut le cas au sens où je n'étais pas binômé. Mais jamais je ne me suis senti désemparé -sauf peut être devant les piles de sondages entassés sur mon bureau-. La formule du mémoire m'a permis de bénéficier d'une double aide :

P. BEREST, ingénieur des Mines à la Direction de la Qualité et de la Sécurité Industrielles a été le "directeur" du sujet ; il m'a initié aux arcanes du stockage dans le sel et la partie technique qui y est consacrée n'aurait pas été complète sans ses connaissances techniques. Mais il fut mon indispensable intermédiaire auprès de tous mes interlocuteurs administratifs ou industriels, m'assurant un accueil toujours favorable.

M. le professeur B. BEAUDOIN m'accueillera l'année prochaine au centre de Géologie Générale et Minière pour ma thèse de Doctorat d'Etat. Il a bien voulu accepter le rôle de "pilote" -dans la dénomination officielle. Il m'a introduit auprès des géologues spécialistes des problèmes de sel, et a largement contribué à l'élaboration des documents présentés avec ce travail ; il a surtout, par des contacts fréquents, contribué à une meilleure réflexion de ma part.

Je tiens donc tout particulièrement à les remercier tous deux, pour m'avoir permis de mener à bien cette étude.

M. BUSSON du Muséum National d'Histoire Naturelle m'a ouvert ses archives et aimablement prêté des documents personnels ; par sa grande connaissance des évaporites et des diagraphies il m'a aidé à dépouiller la masse d'informations, m'évitant des pertes de temps inutiles. Je lui en suis très reconnaissant. Il m'a introduit auprès de M. C. MARCHAL qui m'a permis d'exploiter ses travaux encore inédits sur le sel du Bassin Parisien, ce dont je le remercie vivement.

M. GANNAT et ses collègues géologues aux Mines Domaniales des Potasses, après une visite très instructive de l'exploitation, m'ont ouvert leurs dossiers sur le sel en France et avec plus de temps, cette étude aurait été utilement complétée. Une future collaboration avec l'Ecole des Mines confirmerait si besoin était les excellentes relations que j'ai eu avec ces personnes que je remercie pour leur accueil.

Concernant les problèmes du sous-sol, j'ai eu le plaisir de discuter avec M. DUFFAUT, sans doute pas assez souvent. Il voudra bien accepter mes excuses, et tous mes remerciements pour ses précieux conseils.

Je rends hommage au Service de conservation des Gisements qui m'a fourni avec célérité tous les sondages (sans doute près de 400) nécessaires à l'élaboration des cartes.

Enfin je tiens à adresser toute ma gratitude aux personnes de l'Administration et aux diverses société (CSMSE, Gaz de France, Géostock, MDPA, Rhône-Poulenc, Solvay) qui m'ont reçu à divers moments au cours de l'année, avec toujours la plus grande aimabilité.

Je remercie Melle ROUCOULET du secrétariat de la Direction de la Qualité et de la Sécurité Industrielles qui a réalisé la frappe de ce texte.

RESUME

Autrefois denrée très prisée, le sel est devenu à présent une matière première peu coûteuse aux nombreux débouchés (de la cuisine à l'industrie chimique). L'utilisation des gisements de sel comme sites de stockage (hydrocarbures liquides et gazeux ; déchets chimiques et nucléaires (?)) est un facteur nouveau et sans doute majeur dans une conjoncture marquée par la récession.

Une analyse de la situation a été faite essentiellement au plan technique, sans perdre de vue les nécessités d'une industrie aux investissements très importants :

Techniques d'exploitation et de stockage dans le sel ont ainsi été détaillées ; elles ont, au travers d'une grande diversité, un solide point commun : la qualité du sel est un facteur essentiel.

Celle-ci est étroitement liée au mode de dépot du chlorure de sodium, qui est une roche sédimentaire. Une présentation de la géologie apporte un complément indispensable à toute évaluation économique des gisements de sel.

Des documents synthétiques ont ensuite été établis bassin par bassin, pour l'Est et le Sud-Est de la France. Compte-tenu du développement des stockages (aux contraintes techniques plus fortes), trois critères ont été retenus : profondeur, épaisseur et pureté du sel. Ce dernier point, capital pour un stockage (les insolubles sont un handicap pour le lessivage d'une cavité), est particulièrement difficile à connaitre, car l'information -en majorité apportée par les sondages pétroliers (diagraphies électriques) est discontinue et partielle.

La confrontation des divers points de vue a dégagé la cohérence des décisions partielles tant au niveau des sociétés que des bassins exploités. Il en résulte cependant une situation globale qui parait incohérente (rejet dans le Rhin de deux fois la production française de sel, ici on paie pour être débarrassé de sa saumure, là on (ré)-exploite un gisement profond très difficile...) dont un paroxysme pourrait être une sur-utilisation des gisements comme on le pressent déjà en Bresse : sur un site réduit, au sel très pur, on retrouve les sociétés pétrolières, Gaz de France, Géostock, Solvay.

Parmi les différents partenaires, l'Administration occupe, de par son double rôle (garantir la sécurité des installations ; assurer une bonne gestion des gisements et des stockages), une position privilégiée.

Elle n'a pas à intervenir avec de tels documents pour encourager un choix technique crucial (l'exemple du gaz naturel) mais elle doit se doter des moyens (par exemple avec ce bilan géologique) d'une politique à long terme du sous-sol, au moins dans des domaines où cela est (ou sera) rendu nécessaire, dont le problème du sel constitue l'exemple.

INTRODUCTION

Le chlorure de sodium (communément appelé "sel") n'est plus donné en offrande aux dieux comme chez les grecs : il n'est plus si rare, que son commerce soit soumis aux sévères règlementations du temps de la gabelle.

L'Administration trouve cependant en la matière un double centre d'intérêt justifiant son intervention :

- l'exploitation du sel relève de techniques minières (excepté bien sûr pour les marais salants) dont l'aspect de sécurité est important. L'Administration intervient en délivrant les permis de recherche et d'exploitation ; elle veille aux respects des règles de sécurité.

- elle a un rôle plus politique lié, d'une part au développement des stockages souterrains (nécessité d'une politique nationale de stockage) et d'autre part à la conservation des gisements pour en éviter le gaspillage.

L'utilité d'un inventaire des gisements de sel français est d'autant plus justifiée que leurs usages se diversifient : ne va-t-on pas vers une "sur-utilisation" conduisant à une situation analogue à celle du sous-sol des grandes villes ? Il convient donc de rechercher les futurs "gros occupants". Naturellement l'Administration ne peut rester indifférente face à une telle évolution, mais que doit-elle faire et comment ?

Pour répondre à ces questions, il fallait d'abord étudier les aspects techniques de la production du sel, puis partir à sa recherche en France; alors seulement quelques suggestions seront prudemment avancées...

DIVERS ASPECTS DE LA MATIERE PREMIERE "SEL"

-A- GEOLOGIE

-B- PRODUCTION, DEBOUCHÉS : LE MARCHÉ DU SEL

-C- LES STOCKAGES DANS LE SEL.

- A - GEOLOGIE DU SEL

INTRODUCTION -

La genèse du chlorure de sodium constitue un domaine en soi à l'intérieur des Sciences de la Terre. Il ne saurait être question de traiter en quelques pages d'un sujet aussi vaste. Deux domaines seront abordés :

- la répartition géographique et temporelle des bassins évaporitiques, le sel n'étant qu'un élément d'une succession caractéristique (séquence) de sédiments. Ces deux notions -séquence, roche évaporitique- seront définies plus loin.

- la tectonique du sel. Ce matériau possède des propriétés mécaniques remarquables, qui le particularisent au sein de l'ensemble des roches.

Le problème des conditions de dépôt -au sens le plus large (milieu, climat, etc...)- sera rapidement évoqué. (On trouvera en annexe quatre visions très différentes qui sont autant de reconstitutions paléographiques et paléoclimatiques de sédimentation évaporitique. Elles complètent ce rapide inventaire de la géologie du sel).

Le sel appartient à la classe des roches évaporitiques. Leur singularité apparaît dès le stade de la définition. Sans entrer dans un long débat, on peut regrouper sous ce vocable, l'ensemble des roches qui ont pour origine une précipitation primaire ou secondaire à partir d'une solution saturée. On doit en retirer -selon l'usage- les roches carbonatées. Le confinement ionique, ainsi qu'une référence au climat (aride) sont également des notions essentielles.

Les évaporites sont des roches sédimentaires. Dans ce domaine, une notion apparait comme fondamentale, celle de *séquence*. On peut en donner la définition suivante :

Une séquence est la tranche de sédiments comprise entre deux discontinuités de sédimentation de même ordre.

La répétition d'un même motif permet alors de dégager un modèle de séquence. La séquence évaporitique type (PERRODON, 1968) débute par un niveau argileux et/ou calcaire très riche en matières organiques. Puis successivement on trouve les sels : anhydrite (Ca SO4) ou gypse, halite (NaCl), puis les sels de potassium (K) et enfin de magnésium ($MgCl_2$). (fig. 1).

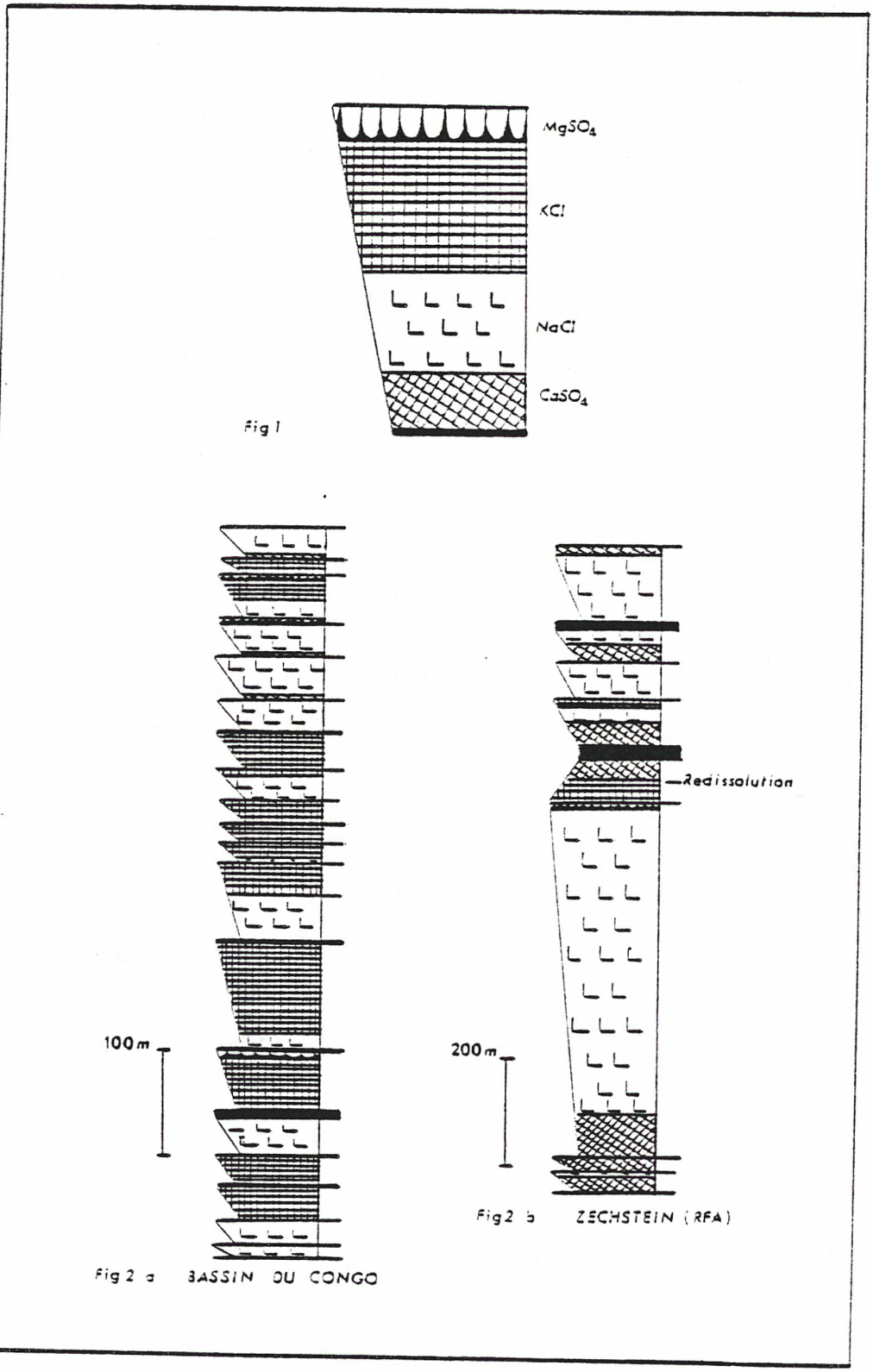


fig. 1 - La séquence évaporitique type (extrait de PERRODON 1968, fig. 5)

fig. 2a - la série de l'Albien du bassin du Congo (id.)
2b - Le Zechstein de l'Allemagne du Nord (id.)

Cette succession correspond à un milieu de dépôt donné, dont l'évolution provoque la précipitation des différents sels. Une évolution symétrique se traduira par la séquence évoluant dans l'ordre inverse. Selon les bassins certains termes disparaissent totalement, d'autres étant dominants. Deux exemples sont donnés, d'une part avec la série du Bassin du Congo où l'anhydrite est absente (fig. 2 a) tandis que dans le Zechstein (Allemagne du Nord) le sel gemme l'emporte au détriment des sels potassiques et de magnésium (fig. 2 b).

L'intérêt de ces roches est très divers. "Pratique d'abord, si l'on note que la consommation annuelle mondiale de potasse requiert l'extraction d'une quantité de minéral équivalente à celle d'un dôme de sel de dimension moyenne (1500 m de diamètre, 1500 à 3000 m de profondeur). Pratique aussi, car leur mise en solution facile pose de multiples problèmes de génie civil pour la partie solide, et d'agronomie pour la fraction dissoute. Pratique encore, puisque les milieux salins sont très souvent liés à des zones à sédimentation organique confinée et non oxydée, et donc aux roches-mères des pétroles. Ainsi la moitié des réserves mondiales de pétrole et de gaz se trouverait dans des réservoirs carbonatés couverts par des séries évaporitiques (L.G WEEKS, 1961) ; en fait, le pétrole peut être recherché au-dessous, au-dessus, aussi bien que latéralement et même dans les couches de sel ! Théorique ensuite puisque leur densité, généralement plus faible que celle de l'encaissant, leur confère la potentialité de remonter à travers les séries sus-jacentes, ce que leur plasticité leur permet, engendrant ainsi une tectonique originale. Théorique par suite de la nature nécessairement marginale du milieu de dépôt, dans le cas des évaporites marines. La reconstitution des salures successives qui ont précédé les états de saturation est souvent fort délicate. Le problème des paléosalinités réside essentiellement dans le fait que les arguments fournis par les flores et les faunes sont rarement décisifs et pas toujours convergents."

(FONTES, 1974)

Pratique enfin, elles constituent d'excellents réservoirs pour les nombreux stockages de produits pétroliers et de gaz naturel, existant dans le monde entier. Et de fait on trouve des évaporites pratiquement sur tous les continents (tableaux 1 et 2) (exception faite peut être de l'Antarctique) : à condition de prendre en considération l'ensemble de la série stratigraphique, on constate q'un quart des aires continentales serait recouvert, à un niveau ou à un autre par des évaporites d'âges divers (KOZARY et al. 1968, in BUSSON, 1974). Elles sont ainsi un des constituants majeurs des séries sédimentaires.

Tableau 1

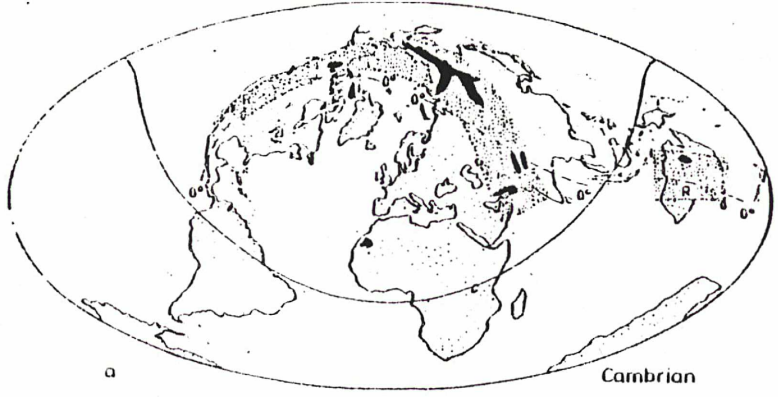
Principaux Bassins salifères paléozoïques -

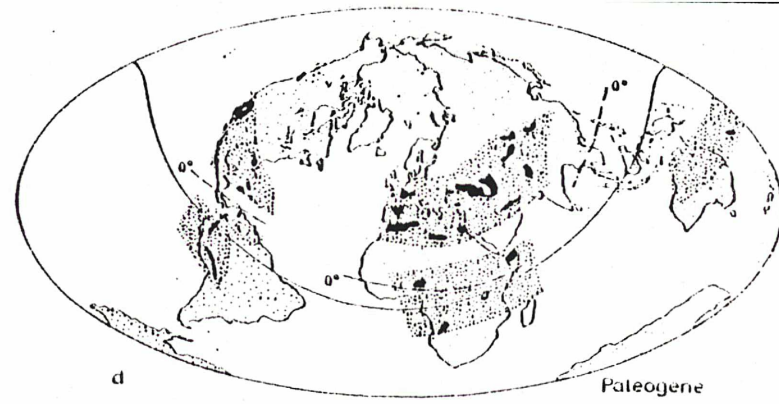
	EUROPE	ASIE AUSTRALIE	AMERIQUES
Permien	Allemagne Nord Mer du Nord Moscou W Oural Emba		W Texas Williston
Carbonifère			Paradox Illinois-Sujar Michigan Williston Sverdrup E Canada
Dévonien	Moscou Ukraine et Pripet	Taymir S Sibérie	Alberta Michigan
Silurien		Est Sibérie	Appalaches Michigan Williston Alberta
Cambrien		Pakistan S Iran E Sibérie (Lena Angara)	Mackenzie
Précambrien		Auradeus	

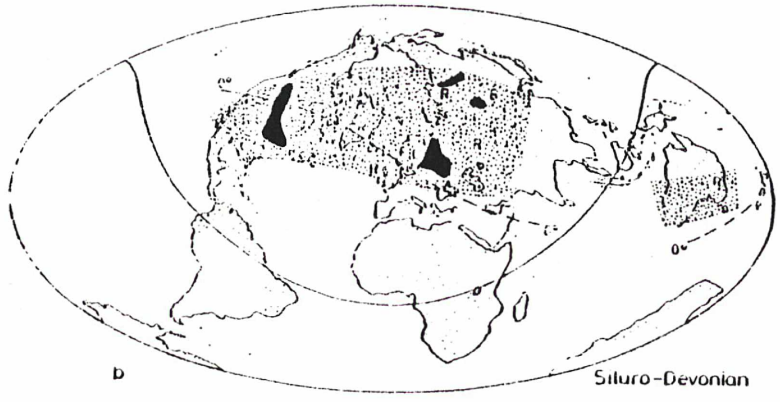
Tableau 2

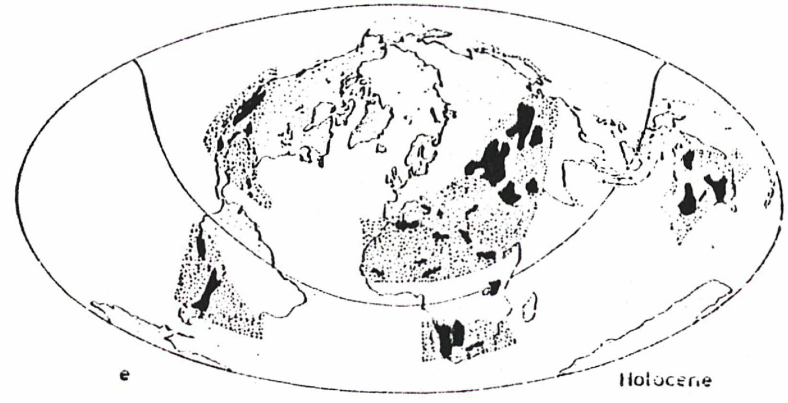
Principaux bassinssalifères post-paléozoïques -

	EUROPE	ASIE	AFRIQUE	AMERIQUES
Pliocène				Névada
Miocène	Italie-Roumanie Transylvanie-Hongrie Ukraine	Iran	Afrique Mer rouge	
Oligocène	Ebre - Alsace			
Eocène		Kirgiztan-N Tien Shan Potwar(Pakistan)		Green River
Crétacé	Allemagne N Caucase		Angola-Congo Gabon	Cuba-Sunniland (Floride) Tipaquira(Colombie) Sergipe (Brésil) Fulf Coast Vera Crur-Tabasco
Jurassique	Provachia(Bulgarie)	S N Sibérie	Mandawa (Tanzanie)	Neuquen
Trias	Aquitaine-Espagne Italie-Lorraine Allemagne N-Mer du Nord		N Sahara	Rio Huallaga (Pérou)









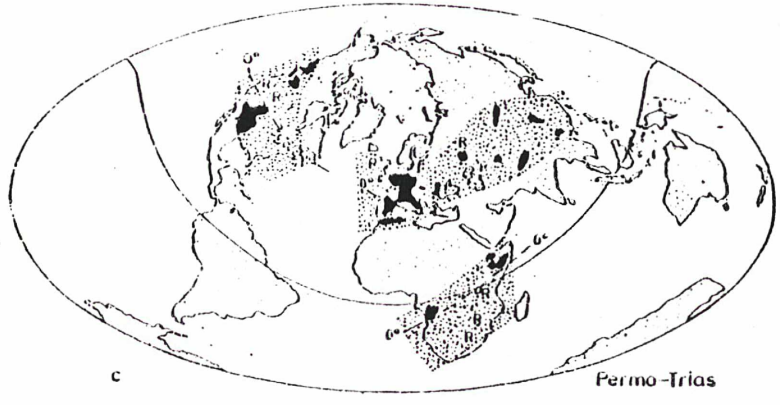


fig. 3 - Répartition spatiale des dépôts évaporitiques depuis l'ère Primaire (extrait de BORCHERT et MUIR 1964, fig. 3.1)
- en noir : bassins évaporitiques
- en ombré : ceinture aride
- en tireté : équateur paléomagnétique

REPARTITION DES GISEMENTS DE SEL.

Les figures 3 a,b,c,d et e (extraites de BORCHERT et MUIR, 1964, fig. 3.1) permettent d'apprécier le déplacement des zones évaporitiques. On note une migration progressive vers le Sud (actuel) des principaux bassins : au Cambrien, une bande salifère semble s'étendre du Golfe Persique au Nord de la Sibérie et du Canada (fig. 3 a). Elle descend continûment et au Trias, elle coupe l'Europe Centrale et l'Afrique Méditerranéenne (fig. 3b et c). Au Crétacé elle atteint l'Afrique du Nord et après une brève remontée jusqu'en Alsace au Paléogène, elle s'installe à nouveau dans les régions méditerranéennes (fig. 3 d et e).

Ainsi ce large domaine salifère situé dans le grand Nord (actuel) au début du Paléozoïque se serait déplacé vers le Sud (aux fluctuations près) au cours de l'histoire de la Terre. Ces dépôts réclamaient un climat aride et chaud, ces déplacements semblent suivre celui des pôles Nord et Sud, que nombre d'auteurs situent au début du Paléozoïque, respectivement dans la zone équatoriale actuelle du centre du Pacifique et dans le golfe de Guinée.

L'existence d'une information, considérable en quantité, devrait permettre une parfaite compréhension du fonctionnement du dispositif évaporitique. Ceci est d'autant plus vraisemblable que nous connaissons depuis 150 ans l'ordre de précipitation et les épaisseurs relatives de la paragénèse (fig. 4) marine simple, grâce aux travaux d'Usiglio (1849, in BUSSON, 1974). Les règles de précipitation sont connues, les rapports entre phase solide et solution n'ont sans doute guère varié au cours des ères. De même la définition des domaines de stabilité des minéraux paragéniques (en fonction de la composition ionique, de la température, la pression...) est assez bien étudiée. Enfin la gamme de climats de l'actuel est assez vaste pour qu'on trouve en un point du globe des conditions similaires à celle du Permien ou de l'Oligocène.

Hélas ! En regard des énormes accumulations du passé on ne dispose que de quelques dépôts côtiers (sebkhas marocaines), peu épais, peu étendus et très fragiles. Comment se représenter les immenses bassins du Silurien ou du Zechstein, où une couche repère "se suit" par sondage sur des dizaines de kilomètres ?

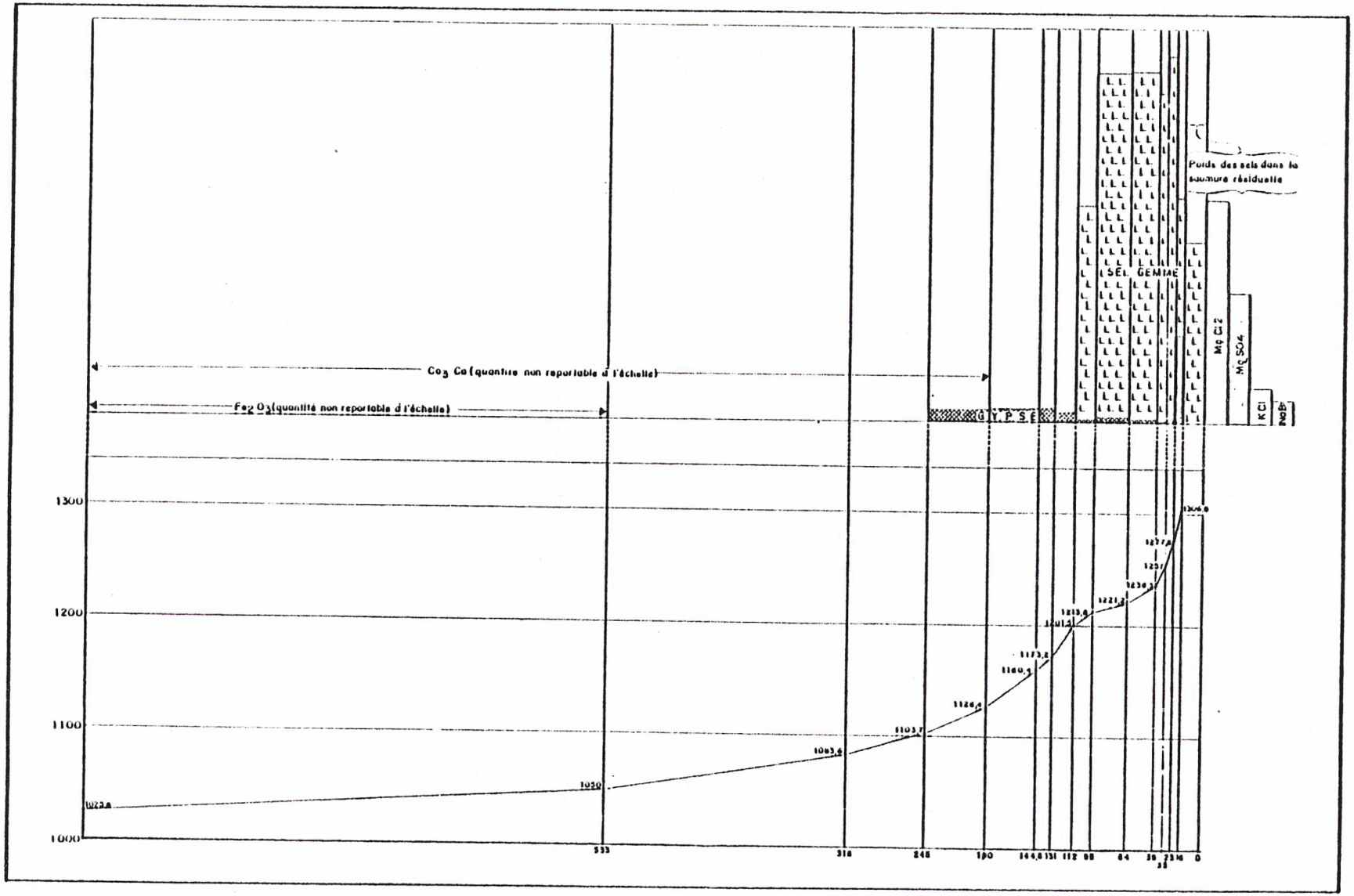


fig. 4 - Données expérimentales sur l'évaporation de l'eau de mer (Mer Méditerranée) d'après USIGLIO (extrait de BUSSON 1974, fig. 4). [en abscisse : volume résiduel ; en ordonnée : densité de la saumure résiduelle]

En fait, tous ces bassins se trouvaient dans le domaine intermédiaire entre mer et continent. Or la reconstitution de l'histoire du Quaternaire récent nous apprend que depuis 18000 ans les marges continentales subissent une importante transgression (estimée à une amplitude de 100 à 150 mètres).

C'est ainsi que tous les dispositifs d'envergure ont été brutalement immergés et les modèles théoriques (barre d'OCHESNIUS, seuil de RICHTER-BERNBURG, parmi les plus célèbres) ne peuvent être confirmés par des observations dans l'actuel.

D'autre part, si on reprend le modèle d'Usiglio, on voit que les épaisseurs de sel obtenus par évaporation de l'eau de mer, restent très faibles par rapport au volume d'eau nécessaire : 100 mètres de sel exigeraient l'évaporation d'une colonne d'eau de 7 km et de même 100 mètres de gypse en requiereraient 100 km ! Il faut donc imaginer des mécanismes plus efficaces. Des réponses complètes n'existent pas ; on trouvera cependant en annexe quatre modèles de bassins : les trois premiers font appel à la notion de tranche d'eau (la sebkha, la barre, le sel profond), le dernier souligne l'importance de la tertonique (fossé d'effondrement).
C'est précisément par la tectonique du sel que se concluera ce préambule géologique.

L'HALOKINESE.

Pris isolément un morceau de sel apparait comme assez robuste ; ce fait est confirmé par les essais en laboratoire : avec une résistance instantanée à la compression de l'ordre de 100 à 200 bars, c'est une roche solide. Pourtant, soumise à un effort en-deçà de sa limite de rupture, l'éprouvette se déforme sur de longues durées (6mois à 1 an). Enfin, lorsqu'on passe à l'échelle géologique, le sel semble se comporter comme un fluide.

Une tectonique singulière conduit à la formation de dôme de sel. J. GOGUEL (1943) indique que si une succession de couches horizontales, dans laquelle des terrains légers sont situés sous des assises plus lourdes, est en équilibre instable, une irrégularité dans l'inclinaison accentuera le déséquilibre, la rigidité des roches étant insuffisante. De telles dislocations se produisent dans le cas où la couche profonde est formée de sel (densité d = 2,1 contre 2,3 à 2,4 en moyenne).

On a découvert nombre de ces dômes, de forme circulaire, hauts de plusieurs milliers de mètres. Rarement affleurant car dissous par l'érosion, ils sont localisés par des procédés géophysiques puis reconnus par sondages du fait de leurs liens avec le pétrole, le soufre ou la potasse. Le sel du Texas ou d'Allemagne du Nord est ainsi principalement sous forme de dômes (près de 400 en Allemagne Fédérale).

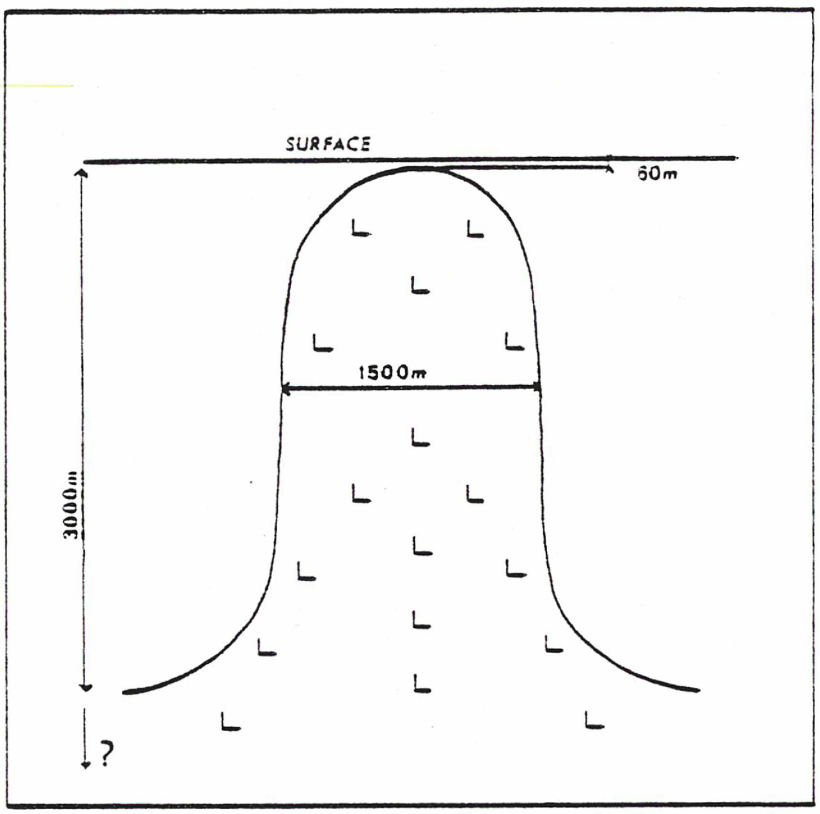


fig. 5 - Un dôme de sel type (extrait de MARTINEZ et THOMS 1976, fig. 10.)

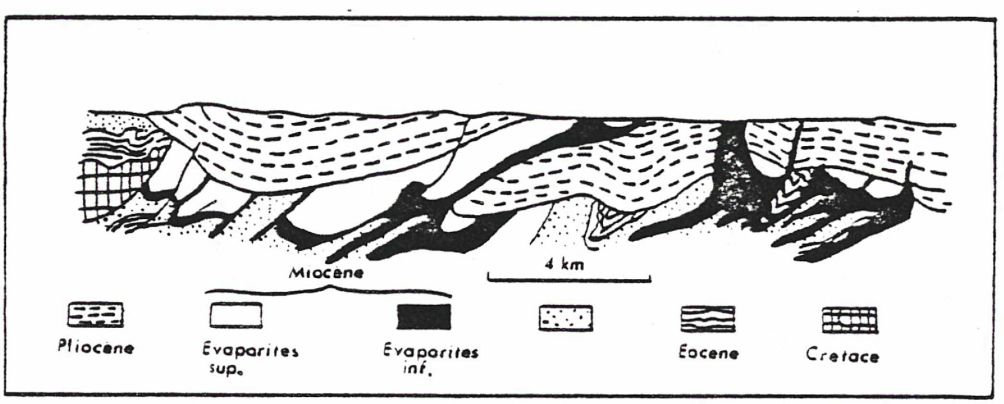


fig. 6 - Intrusions diapiriques d'évaporites miocènes dans des sédiments tertiaires variés des Carpathes (extrait de BORCHERT et MUIR 1964, fig. 20.7)

Les calculs menés par J. GOGUEL (annexe 1) donnent une première estimation de la taille d'un dôme ; en fait dès que la profondeur initiale est importante, il n'est jamais nécessaire d'avoir des diamètres considérables. Le dôme typique aura ainsi 1500m de diamètre, 3000m de hauteur (fig. 5).

Quand le dôme est proche de la surface, l'eau superficielle dissout le sel et laisse en témoignage un épais résidus (Cap-Rock). Si les pertes par dissolution compensent l'ascension du dôme, le sel continuera à monter, mais le dôme ne montera plus, restant quelques dizaines de mètres sous la surface. Toute la couche de sel étant éliminée, le point d'équilibre est atteint.

L'"alimentation" en sel ne se fait qu'à partir des régions proches du dôme. Le sel migre dans la couche vers la base de dôme et son ascension se fait par couches concentriques avec frottement contre les épontes. De fait deux dômes distants de quatre fois l'épaisseur de la couche de sel se développeront sans se gêner. Cependant pour former plusieurs dômes de quelques milliers de mètres, l'épaisseur initiale devra dépasser 1 à 2 kilomètres. La vitesse ascensionnelle peut atteindre quelques centimètres par an. (.)

Les couches peu épaisses auront du mal à constituer des dômes ; elles resteront en faux-équilibre. La moindre pression orogénique fera passer le sel en partie haute des anticlinaux, formant des plis diapirs. (à ne pas confondre avec les dômes de sel, qui se forment spontanément, sans aucune pression orogénique extérieure). La plasticité du sel y joue un rôle dominent ; le schéma général est le suivant :

"le sel emprisonné entre des couches résistantes qui se plissent est soumis à une pression élevée, qui l'amène à s'échapper en traversant ces couches ; il atteint les couches meubles surincombantes et peut continuer à s'élever, à cause de la pression qui lui est transmise depuis le noyau anticlinal, ou en vertu de sa légèreté propre. Mais les couches dans lesquelles il pénètre, continuent à se déformer, et le sel injecté peut prendre les formes les plus capricieuses." (fig. 6).

(BORCHERT et MUIR, 1964)

Dans un diapir type, on voit le sel pénétrer dans des niveaux plus élevés que son gisement initial, sans entrainer des témoins d'étages inférieurs. Parfois la masse du sel disloque les assises et toute reconstitution de l'état initial est rendue impossible.

(.) Ce point sera bien évidemment mentionné à l'évocation du stockage des déchets nucléaires (page).

Pour le géologue, le sel est donc intéressant, tant par ses divers modes de dépôts que par une tectonique originale. Pour le producteur c'est une matière recherchée mais abondante donc très peu chère. Nous allons maintenant préciser les données de ce marché très particulier.

- B - PRODUCTION, DEBOUCHES :

LE MARCHE DU SEL

Techniques de Production -

Le sel possède une caractéristique peu répandue parmi les matières premières : il peut être obtenu par trois méthodes de production entièrement différentes et néanmoins concurrentielles : il s'agit du sel obtenu dans les marais salants (dit "sel de mer"), du sel extrait sous forme solide en mine ("sel gemme") et du sel fabriqué par raffinage (voie thermique) de saumures de sondage ("sel ignigène").

Aucune de ces trois méthodes n'a supplanté les autres, tant en France que dans les autres pays producteurs (USA, RFA...). Elles présentent toutes des avantages et des inconvénients qui vont être développés succintement.

- l'évaporation de l'eau de mer par le soleil provoque des dépôts de sel. La succession des dépôts doit être rigoureusement contrôlée afin d'obtenir un produit très pur. Il faut disposer d'étendues aussi plates que possible, que l'on cloisonne afin d'épouser au mieux la topographie ; enfin, un système complexe de circulation de saumures est mis en place. Le sel est récolté dans les cristallisoirs sur des épaisseurs maximales de 0,25 à 0,30 m. Ainsi préparé et conditionné, le sel obtenu titre 99,7 % en chlorure du sodium ; il est apte à tous les usages et notamment à l'industrie chimique.

Très compétitive dans les zones où le climat est favorable à de longues périodes d'évaporation, cette technique est économe en énergie : le soleil est gratuit ainsi que la matière première, l'eau de mer. Toutefois, elle nécessite des grandes surfaces planes et étanches, dont le coût peut être élevé pour un produit d'aussi faible valeur marchande.

- l'exploitation du sel gemme, malgré la défaveur dont souffrent certaines activités minières, continue de se développer. Ceci est dû à un prix de revient relativement faible, grâce à une méthode d'exploitation économique, par chambres et piliers abandonnés. Minerai tendre, il est aisément abattu dans des conditions de chantier excellentes ; en effet, la température varie entre 15 et 25° C, le taux d'humidité reste bas (20 à 30 %) car l'air se dessèche au contact du sel. Enfin les maladies professionnelles y sont inconnues. Cette méthode reste handicapée par des problèmes de teneur : le sel gemme n'est jamais enrichi et doit être consommé tel quel. A Varangéville (dernière mine en France) la teneur ne dépasse pas 92 %, tandis que certaines mines étrangères ont un sel très pur (> 98°).

- la meilleure façon d'obtenir du sel très pur consiste finalement à dissoudre du sel gemme et à le recristalliser : c'est le dernier procédé de fabrication, le sel "ignigène".

Elle se fait à partir d'une saumure, sous-produit de la création de cavités, -on y reviendra plus loin lors de la présentation des techniques de dissolution des cavités en vue de stockage-, ou bien résultat de la méthode d'exploitation "par pistes". Pour cette technique, on fore plusieurs sondages en ligne, amorçant des cavités qui finissent par se rejoindre, constituant la piste de lessivage. Une amélioration a été apportée : en fracturant préalablement le mur du gisement par voie hydraulique, on réduit le nombre de sondages, on supprime la préparation de la piste et la saumure obtenue est directement utilisable.

Quoiqu'efficace, cette méthode est brutale : on constate des dégâts importants : les terrains sus-jacents s'effondrent, laissant des cratères de 30 à 100 m de diamètre.

La saumure obtenue est évaporée par chauffage dans des appareils à multiple effet ou à thermocompression. Elle doit nécessairement être saturée, ce qui n'est pas toujours le cas(.)D'autre part, la consommation en énergie du traitement thermique grève le prix de revient. En contrepartie, le sel obtenu a un degré de pureté très élevé, permettant son utilisation dans l'industrie pharmaceutique et les analyses de laboratoire.

. Outre ces possibilités techniques, le chlorure de sodium est sans doute une des rares substances dont les débouchés soient aussi nombreux. Au plan quantitatif, la clientèle va du chimiste, qui en consommera quelques centaines de milliers de tonnes par an, à la ménagère qui se contentera de moins d'un kilo par mois ! Entre ces extrêmes, on peut dresser une liste de consommateurs qui est loin d'être exhaustive :

- les collectivités publiques et les services de voirie qui emploient des quantités importantes de sel de déneigement pour les voies de communication,
- les industries alimentaires (salaisonniers, conserveurs...),
- les sociétés qui réalisent l'adoucissement des eaux industrielles et domestiques,
- l'industrie de la pêche,
- les industries du froid, des cuirs et peaux, de la teinturerie, les céramistes, etc...

(.) Le lessivage des cavités pour le stockages produit une saumure titrant 260 à 280 g/l au lieu de 330g/l.

Chacun d'eux souhaite disposer d'un sel destiné spécialement à son usage. Cela pose des problèmes aux producteurs, qui ont dû parfois se plier aux exigences de leurs clients.

Les données économiques -

Pourtant, malgré cette diversité de débouchés, le marché du sel est stagnant et surcapacitaire. En voici une rapide présentation, avec l'évolution des dernières années. (tableaux nº 5 et 4).

Les chiffres de production portent sur le sel cristallisé et le sel sous forme de saumure :

- le sel cristallisé : (le seul donnant lieu à négoce) il provient
  - des marais salants d'Aigues-Mortes, Salins Giraud et des Salins de l'Ouest,
  - des mines de sel (sel gemme),
  - des salines (sel ignigène),
  - des fabriques thermiques des MDPA (sel résiduaire du traitement de la potasse).

- les saumures : elles proviennent des sondages réalisés par les industries chimiques, pour leur consommation propre (carbonate de soude, chlore), avec les installations de Vauvert, Hauterives, La Madelaine, Haraucourt, Art sur Meurthe, Courberreaux, Drouville, Poligny ; Le Gaz de France et GEOSTOCK, sont également "producteurs" de saumure, par le lessivage de cavités de stockage.

Si d'une année sur l'autre, on observe une progression de la consommation totale de sel cristallisé (+ 6% environ), celle-ci est due entièrement à la forte progression du sel de déneigement. Elle a été due aux importantes chutes de neige de janvier 1979 et la tendance s'est inversé en 1980. Il faut également noter le caractère surcapacitaire de l'instrument de production, avec un excédent d'offre de 1,1 million de tonnes environ. La stagnation de la demande en est la cause principale. Cette assertion se vérifie en étudiant l'évolution du marché intérieur entre 1974 et 1979. Dans le tableau 5 on a regroupé les débouchés en trois secteurs : industrie chimique, déneigement et autres débouchés.

La récession de l'industrie chimique est due en grande partie à la concurrence des sels obtenus comme sous-produits de la fabrication de la soude avec des électrolyses au diaphragme. Le secteur "autres débouchés" montre une croissante de 6 % en 5 ans, mais en fait une partie aurait été utilisée pour le déneigement en 1979. Ce secteur connait, quant à lui, une forte expansion, soumise toutefois aux conditions climatiques. Il est significatif de noter que le total des deux autres secteurs (industrie chimique + autres débouchés) a diminué entre 1974 et 1979, passant de 1,954 à 1,809 millions de tonnes.

Enfin, en ce qui concerne le commerce extérieur, la France importe 187 000 tonnes et exporte 230 000 tonnes (chiffres de 1979). Ces tonnages sont modestes ; ils ne varient guère d'une année sur l'autre ; seul le déneigement connait, à l'exportation, une forte progression due aux intempéries. En 1979 la balance reste excédentaire en tonnage (+43 000 tonnes) et en valeur (+ 3 992 000 francs) ; cependant la France exporte du sel de déneigement assez bon marché et importe des qualités raffinées et chères. Le tableau 6 ci-contre donne, à titre indicatif, une idée de la valorisation du sel cristallisé.

PRODUCTION DES 6 DERNIERES ANNEES

(en milliers de tonnes)

	1974	1975	1976	1977	1978	1979
sel gemme	250	180	273	287	458	581
sel ignigène	1 148	986	1 067	1 022	1 103	1 187
sel MDPA	223	191	338	316	508	755
sel de mer	1 080	1 187	1 431	557	864	1 814
TOTAL sel cristallisé	2 701	2 484	3 109	2 182	2 933	4 337
Saumure	3 685	3 054	3 388	3 500	3 860	≃ 5 000

Tableau 3

CONSOMMATION DES 6 DERNIERES ANNEES

(en milliers de tonnes) (uniquement du sel cristallisé : la saumure étant auto-consommée)

Tableau 4

	1974	1975	1976	1977	1978	1979
Consommation humaine	399	370	377	383	400	365
Industrie chimique	1 336	1 151	1 198	1 086	1 038	1 060
Industries diverses	488	470	498	469	480	426
Déneigement	302	227	448	423	901	1 013
Agriculture et pêche	155	151	159	180	190	162
TOTAL sel cristallisé	2 680	2 369	2 680	2 541	3 009	3 026 *

* non compris les exportations s'élevant à 230 000 tonnes (dont 116 000 tonnes pour le déneigement).

1974	Industrie chimique	Déneigement	Autres débouchés
sel de mer	637	52	318
sel ignigène	165	-	503
sel gemme	-	57	103
sel de fabriques thermiques	66	193	-
sel importé	45	-	117
TOTAL (milliers de tonnes)	913	302	1 041
sel de mer	490	151	289
sel ignigène	118	2	572
sel gemme	-	299	93
sel de fabriques thermiques	60	561	-
sel importé	35	-	152
TOTAL (milliers de tonnes)	703	1 013	1 106
VARIATION	- 90	+ 711	+ 65

Tableau 5

Destination	% tonnage	Prix départ en francs/tonne (estimation)	% C.A. (estimation)
Produit de grande consommation :	12		70
alimentation		500 à 1000	60
adoucisseurs		400	10
Agriculture	7	120 à 400	4
Industrie	48	120	17
Déneigement	33	80 à 100	9

Tableau 6

La production de saumure représente un tonnage de sel équivalent à celui des autres procédés de fabrication. Elle est très liée au développement des stockages dans le sel, dont Gaz de France et Géostock sont les principaux intéressés. La dernière partie de cette présentation sera donc consacrée à une présentation technique des stockages en gites salifères.

- C - LES STOCKAGES DANS LE SEL

LES UTILISATIONS ACTUELLES -

Deux grands types de préoccupations sont abordés en matière de stockages souterrains. Le premier concerne des problèmes stratégiques : la récente crise irano-irakienne a remis l'accent sur les difficultés du maintien de nos approvisionnements en produits pétroliers. Privée d'environ 20 % de ceux-ci, la France a dû puiser -provisoirement- dans ses réserves. L'existence de stockages souterrains équivalents à trois mois de consommation garantissait pour 15 mois l'approvisionnement de notre économie. En fait, dès le lendemain de la crise de Suez, en 1958, le Gouvernement avait imposé aux sociétés distributrices de constituer ce stockage de réserves égal à trois mois de consommation.

La seconde préoccupation tient, pour tout distributeur d'énergie, à adapter les ressources aux besoins. Les stockages souterrains y répondent particulièrement bien, pour le gaz naturel (distribué par canalisations), comme les hydrocarbures liquides.

Les installations actuelles, plus précisement réalisées dans le sel, s'inscrivent dans cette perspective ; elles concernent deux sources d'énergie : le gaz naturel et les hydrocarbures liquides. Mais avant de les présenter, il convient de mentionner deux nouvelles utilisations envisageables pour les stockages souterrains :

- il est bien connu que l'électricité se stocke mal. Electricité de France pallie cet inconvénient par les tarifs préférentiels en heures creuses. L'accumulation d'air comprimé en cavités souterraines permettrait de résoudre -en partie- cette difficulté. Une réalisation existe en Allemagne Fédérale, mais E.D.F. ne songe pas pour le moment à utiliser cette technique.

- le problème des déchets chimiques et surtout radioactifs préoccupe depuis quelques années les gouvernements des pays industrialisés. Au niveau européen plusieurs études sont menées de front ; l'Allemagne Fédérale travaille sur les possibilités offertes par le sel, l'Italie et la Belgique sur les argiles, enfin la France et la Grande Bretagne sur le granite profond.

Ce dernier point sera repris ultérieurement, à la présentation de la situation actuelle. On peut simplement souligner qu'aucune décision n'a été prise, les recherches étant loin d'être achevées.

Les problèmes posés par le gaz et les hydrocarbures sont très différents ; ils seront donc présentés séparement, puis un rapide exposé sur les techniques de lessivage des cavités dans le sel concluera cette partie consacrée aux stockages dans le sel.

Les hydrocarbures liquides -

- Pour les combustibles liquides ou les gaz de pétrole liquéfiés, il est nécessaire que les utilisateurs disposent de capacités de stockage suffisantes pour amortir les pointes, ce qui ne dispense pas les producteurs d'avoir leurs propres stockages afin d'éviter les ruptures d'approvisionnement. Il existe à cet effet des stocks importants en surface et depuis quelques années des réserves dans des cavités souterraines. L'obligation légale des trois mois de stock a contribué à renforcer le dispositif surtout dans une conjoncture internationale incertaine.

Le stockage aérien est nécessaire, car bien que coûteux, encombrant et dangereux, il est très décentralisé, avec de petites unités réparties sur l'ensemble du territoire national. La capacité aérienne actuelle est de 56 millions de tonnes contre environ 12 millions en souterrain.

Deux techniques sont possibles pour stocker des hydrocarbures sous terre : la mine ou les cavités minées d'une part, les cavités lessivées dans le sel d'autre part.

Il existe un stockage dans une ancienne mine de fer, à May-sur-Orne, ainsi que quelques cavités minées (Lavera, Vexin, Petit Couronne, Donges, Corcelles).

Plusieurs sites ont été créés dans le sel :

- A Salies-de-Béarn, un petit stockage de propane (30 000 m3), pour valoriser le propane produit par l'usine de Lacq (S.N.E.A.P),

- Le groupe Elf, exploite à Viriat (Bresse) un stockage d'éthylène (2 cavités de 100 000 m3 au total),

- La société Rhône-Progil a créé dans la Drôme un stockage de propylène (70 000 m3 au Grand Serre) et à la possibilité de creuser un volume global de 400 000 m3.

- Enfin la société GEOSTOCK, qui regroupe quatre grandes sociétés pétrolières (CFP, Shell, Elf et BP), est à l'origine du plus grand stockage français situé à Manosque. Le site permet de réaliser 40 cavités ; en 1980, 27 sont disponibles à l'exploitation et 9 sont en cours de lessivage. La capacité totale actuelle est d'environ 7,5 millions de m3, utilisée très largement durant les derniers mois.

Le gaz naturel -

Le gaz naturel, distribué par canalisations, n'est jamais stocké par les utilisateurs ; la charge d'adapter les fournitures à la demande incombe donc au seul distributeur, le Gaz de France.

Les besoins en gaz sont généralement divisés en deux grandes catégories :

- les besoins pour chauffage (ou C.S.P.F., consommations supplémentaires de période froide),

- les besoins hors chauffage (ou H.C.S.P.F., hors consommations supplémentaires de période froide).

Dans cette dernière catégorie, les fluctuations sont faibles au cours de l'année ; les variations journalières à hebdomadaires restent de faibles amplitudes. Bien que ne représentant que 30 % des besoins totaux, la demande pour chauffage constitue le problème majeur. Plusieurs solutions permettent de satisfaire les consommateurs : elles ne sont pas exclusives et sont ainsi par exemple toutes utilisées aux Etats Unis.

- On peut ne tirer des gisements que le strict nécessaire ; la distance gisement-utilisateurs doit être faible, et le traitement du gaz rapide. A Lacq cette méthode est inapplicable, le gaz devant subir une désulfuration.

- On peut stocker du propane, fabriquer et mélanger au gaz naturel de l'air propané. Cette possibilité pose de sérieux problèmes techniques. De plus il faut stocker le propane.

- Le distributeur peut également disposer de clients "effaçables", en cas de pointes. Employé en RFA et Belgique, ce système se développe en France, mais uniquement pour pallier les défaillances d'une chaine d'approvisionnement.

- La technique la plus courante consiste à créer des stockages souterrains, véritables mini-gisements aux voisinages des grands centres de consommation. Utilisés seuls en France, ilsassureraient près de 50 % des besoins pour le chauffage.

Pour cette dernière méthode, plusieurs types de stockages existent :

- le stockage en gisements épuisés de gaz naturel ou de pétrole. Les Etats-Unis utilisent massivement cette voie bon marché (300 réservoirs au Sud-Est des grands lacs), ainsi que la RFA.

STOCKAGES	Exploitant	Type	Mise en Service	capacité Maxi en 10^6 m3(n)	Profondeur sommet (mètres)	Nombre d'exploitation	Puits contrôle
LUSSAGNET	SNEA (P)	aquifère	1957	1300 à 3000	600	34	13
BEYNES Sup.	GDF	aquifère	1956	480	405	14	14
BEYNES Profond	GDF	aquifère	1975	500	740	7	10
CHEMERY	GDF	aquifère	1968	2 800	1 120	43	17
GOURNAY	GDF	aquifère	1976	1 300	750	10	10
SAINT ILLIERS	GDF	aquifère	1965	1 400	670	28	16
VELAINE	GDF	aquifère	1970	1 250	470	36	14
ETREZ	GDF	sel	1979	160	900 à 1400	4	
TERSANNE	GDF	sel	1970	280	1400 à 1600	9	

Tableau 7

- le stockage en nappes aquifères fermées permet des réalisations de grandes capacités à coût modéré. De nombreuses réalisations existent dans le monde : une cinquantaine aux Etats-Unis, une dizaine en URSS, sept en France et cinq en Allemagne Fédérale.

- le stockage en nappes aquifères plates avec une réalisation en URSS et des essais en France. Mais le taux de récupération du gaz est très faible : cette voie a peu d'avenir à moyen terme.

- l'utilisation des anciennes mines de charbon reste délicate et peu performante . (un projet en Belgique, une réalisation aux USA).

- des études ont été faites puis abandonnées à propos de cavités creusées par des explosions nucléaires.

- enfin le stockage en cavités lessivées dans les couches de sel, qui permet des réalisations importantes mais le coût d'investissement est plus élevé que pour les réservoirs aquifères. Il existe 2 sites en France (Tersanne et Etrez), 3 aux Etats-Unis, 3 au Canada.

Les réalisations françaises résumées dans le tableau 7 ci-contre sont dans le sel et en nappes aquifères. Elles correspondent environ à 2 mois moyens de consommation, le sel ne représentant que 5 % du total.

LES TECHNIQUES DE LESSIVAGE -

Quels que soient les besoins de cavités en gite salifère (stockage de gaz ou hydrocarbures liquides, exploitation pour le sel) le lessivage joue un rôle essentiel, et cette technique est délicate. Il faut distinguer, d'une part le contrôle pendant la dissolution, motivé par les problèmes liés aux insolubles, et secondairement le désir d'obtenir une forme stable (excepté en général pour les simples producteurs de saumure), d'autre part le contrôle pendant l'exploitation, pour des raisons mécaniques. On ne parlera ici que de lessivage vertical. Pour mémoire, le lessivage horizontal n'intéresse que des formations peu épaisses ; la méthode d'exploitation ressemble à celle des pistes et la réalisation des puits est comparable à celle qui va être exposée maintenant.

On trouvera en annexe quelques développements sur ces questions. Seuls les points essentiel seront mentionnés ici.

Dans un forage tubé, on descendra le matériel de lessivage qui créera trois espaces interannulaires dans lesquelles circuleront l'eau douce, la saumure et l'hydrocarbure inerte servant de garde au toit de la future cavité. Deux

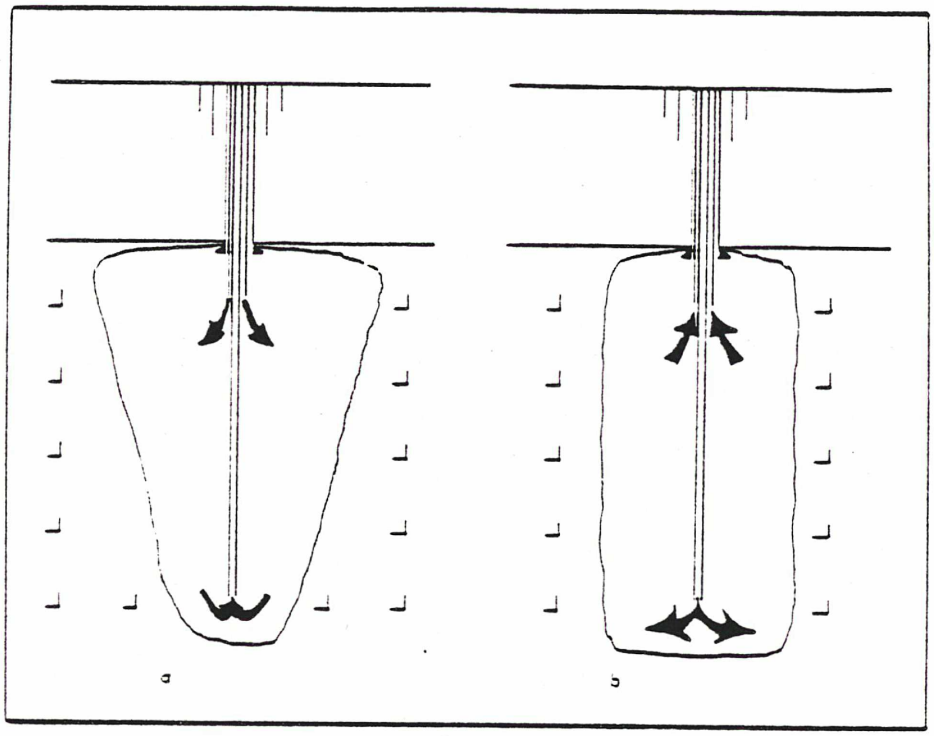


Fig 7

Lessivage d'une cavité dans le sel

a - méthode indirecte b - méthode directe

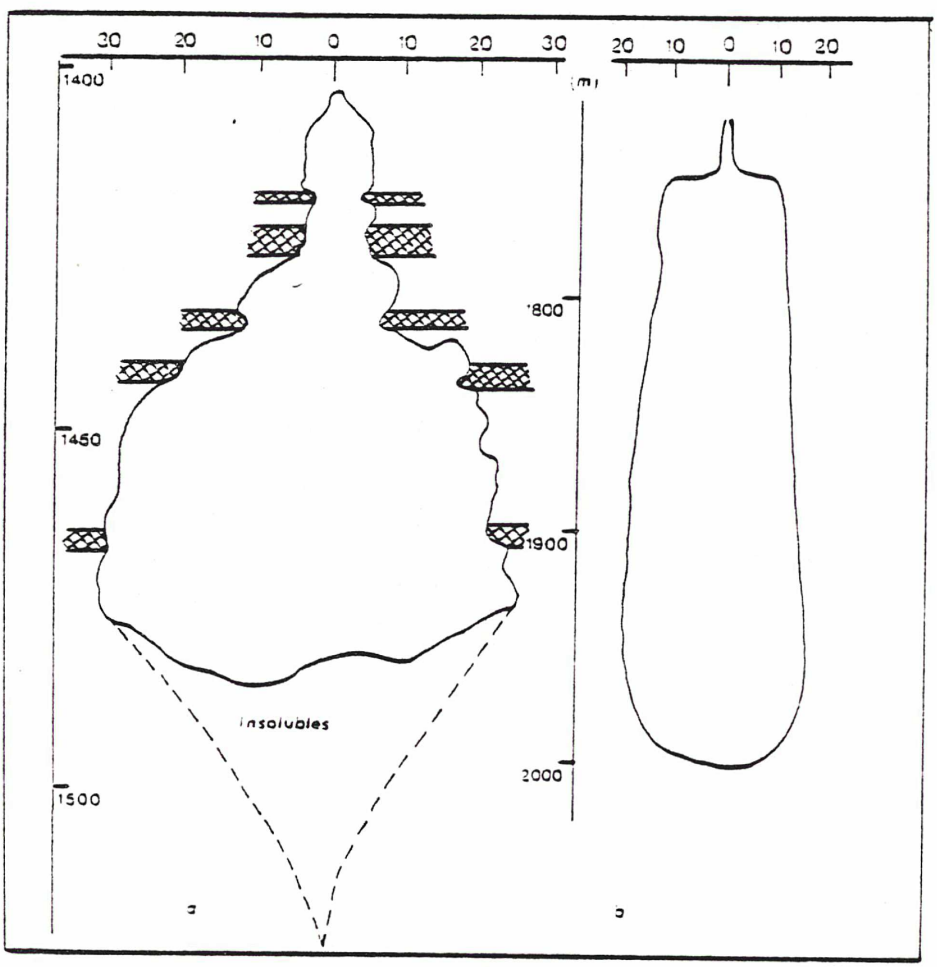


Fig 8

Influence des insolubles sur la forme des cavités (extrait de BEREST 1981, Fig 1b et 1a)

a - Tersanne (France) b - Éminence (USA)

techniques sont alors possibles et qui opposent fondamentalement les stockeurs aux exploitant. L'injection de l'eau douce servant au lessivage se fait par le haut ou le bas ; la saumure étant plus lourde que l'eau douce (1,2 contre 1) le résultat est différent (fig = a et b) suivant les deux cas. L'injection par le sommet (lessivage indirect, fig. = a) accentue le gradient naturel de densité, crée par la chute de la saumure, ainsi la vitesse de dissolution sera plus grande en haut, dessinant une cavité pointue vers le bas, donc moins stable au plan mécanique. La saumure ainsi fabriquée sortira saturée (330 g/l), directement utilisable par l'industrie chimique.

Au contraire le lessivage direct consiste à envoyer l'eau douce à la base, homogénéisant le mélange, et donnant une cavité à symétrie plus cylindrique (fig. 7 b). Mais la saumure "fatale" ne titrera que 230 à 260 g/l et une unité de saturation sera indispensable, pour le cas où la saumure serait destinée aux industries chimiques.

Lors de la dissolution les insolubles (argile, anhydrite) présents dans la hauteur de sel (en bancs ou bien disséminés dans la masse) s'accumulent au fond rapidement. Ce phénomène est bien maitrise aujourd'hui par les stockeurs français, obligés de composer avec un sel impur. (fig. 8 a: une cavité à Tersanne et fig. 8 b: une cavité aux Etats-Unis où le sel est très pur). La teneur maximale en insolubles se situe dans une fourchette de 10 à 15 %, les gros bancs d'anhydrite étant à éviter.

L'exploitation continue de telles cavités nécessite des mesures de sécurité importantes pour pallier diverses difficultés :

- selon la nature des produits stockés la contrainte de profondeur est plus ou moins forte : pour le gaz on ne peut guère dépasser 1400 à 1600m, tandis que pour les liquides on peut atteindre 1800 à 2000m.
- la distance minimale entre cavités voisine est de 4 fois la plus grande dimension de celles-ci. Ceci n'est qu'un critère de prudence : à West Hackberry (USA) ou bien à Hauterives des cavités très proches coexistent sans que l'on ait constaté aucun événement fâcheux.
- le sel est très mobile, comme l'attestent les nombreux diapirs de par le monde. Les diapirs, ainsi que des sites topographiquement dévavorables sontàéviter surtout pour les déchets nucléaires, où la protection doit être parfaite.
- enfin pour un liquide , le stockage fonctionne en général par contre - pressions de saumure : la cavité créée étant pleine de saumure, on injecte le produit par un des espaces annulaires, refoulant la saumure dans le tubing central. En phase de déstockage la saumure est introduite par la même voie, faisant débiter par simple gravité, l'hydrocarbure conservé. Il faut conserver une réserve de saumure équivalente au volume de stockage. Ce n'est pas un problème, puisque le lessivage crée un volume de saumure égal à 8 fois celui de la cavité. L'utilisation d'eau douce pour le déstockage entrainerait une augmentation de volume d'environ 17 %, pouvant mettre en péril sa stabilité.

Au contraire pour un stockage de gaz, la cavité fonctionne en "poumon" : au stockage, le gaz est injecté dans la cavité après compression à pression élevée ; au déstockage, la cavité est décomprimé jusqu'à la pression de service du réseau extérieur. Les variations de pressions sont considérables (jusqu'à 140 bars). Les phénomènes cycliques de "chargement-déchargement" ne sont alors plus à négliger.

Cette présentation s'est voulue à dessein assez schématique, afin de ne pas imposer la lecture de longues considérations mécaniques et mathématiques. Quelques points se trouvent détaillés en annexe, concernant la technique de création par lessivage, le problème des insolubles, du régime des pressions (auquel est liée la tenue de la cavité) et enfin la délicate question des inclusions dans le sel gemme.

II LA SITUATION ACTUELLE

-A- INVENTAIRE DES SITES SALIFÈRES SUSCEPTIBLES D'EXPLOITATION

-B- LES DIFFÉRENTS PARTENAIRES

-A- INVENTAIRE DES SITES SALIFÈRES SUSCEPTIBLES D'EXPLOITATION

Malgré une exploitation intensive des divers gisements de sel, il n'existe pas de synthèse complète. La constitution d'un tel document nécessite alors d'utiliser toutes les sources d'information disponibles.

Le Service de Conservation des gisements (placé sous la tutelle de la Direction des Hydrocarbures du Ministère de l'Industrie a effectué une étude en 1962. Celle-ci proposait trois cartes schématiques du Bassin Parisien, du Bassin Aquitain et du Jura (Bresse)). Depuis lors l'exploration pétrolière s'est poursuivie et les documents n'ont pas été mis à jour.

L'information de base est principalement constituée de quelques centaines de sondages pétroliers. (conservés au S.C.G.) et des forages miniers (conservés au BRGM). Près de 600 sondages (uniquement pétroliers) ont été dépouillés pour établir les divers documents présentés ici ; les forages miniers n'ont pu être exploités, le temps ayant manqué.

Il existe enfin, outre des études anciennes rencontrées dans la bibliographie des travaux récents sur le sel du Bassin de Paris (MARCHAL, inédit) ou le sel de la Bresse, de Valence et du Sud-Est (BUSSON et GOY, 1980).

L'objectif était de proposer des documents synthétiques pour chaque bassin évaporitique, susceptibles d'être appréciés très rapidement. Dès le début, un bassin a dû être écarté, le Bassin Aquitain, et ce, pour deux raisons :

- exceptés quelques dômes de sel (Dax, Bastennes), le sel est à grande profondeur (3 à 400m) et donc hors de tout domaine d'exploitation,
- d'autre part une étude de l'IFP a été effectuée l'année dernière, elle reprend en entier le bassin salifère aquitain.

Huit bassins demeuraient donc : trois bassins du Keuper (le Bassin Parisien, le Jura et le Sud-Est), et cinq bassins oligocènes (le Fossé alsacien, le Valentinois, Vauvert et Manosque).

Les critères de jugement -

Le développement des stockages souterrains (gaz naturel en particulier) est -comme on le verra ultérieurement- un élément majeur pour l'avenir du sel. Les critères retenus ont donc privilégié cet aspect, en proposant une lecture immédiate des possibilités de stockage offertes par un gisement.

Ce type d'utilisation présente de fait, les contraintes les plus fortes : les cavités doivent être lessivées dans un sel épais (une centaine de mètre minimum), assez pur (les insolubles -argiles, anhydrite- ne doivent pas excéder 15 à 20 % de la hauteur totale à lessiver), et enfin pas trop profond (le critère de P. BEREST, (1981) donne une limite vers 1 700m). Ainsi les critères retenus sont au nombre de trois :

- la profondeur : le repère choisi est la base du niveau salifère étudié ; la valeur retenue est celle de la cote sondage et non la cote absolue par rapport au niveau de la mer. Les courbes d'isoprofondeur de la base du sel (ou de la série, salifère permettent ainsi d'éliminer les zones trop profondes).

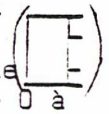
- l'épaisseur : son estimation constitue la première difficulté. Entre des bancs de sel plus ou moins massifs sont mentionnés des bancs d'anhydrite ou des niveaux argileux ; quelle est l'épaisseur maximale tolérable pour ces niveaux d'insolubles ? A Tersanne (Bassin de Valence - gite de stockage exploité par GDF) un banc de 5 mètres d'anhydrite au toit stérilise 10m de sel situé au-dessus. Une telle précision n'est pas envisageable à ce niveau ; une maille de coupure de 15 à 20 m, plus conforme avec les possibilités d'observations dans les logs, serait raisonnable.

En fait le problème ne s'est posé qu'une fois : pour tous les bassins, excepté le Bassin de Paris, le sel se présente en grandes unités séparées par 50 à 150m de niveaux argilo-anhydritiques. Chaque unité a été étudiée pour son propre compte et a fait l'objet d'une carte individuelle.

Par contre le sel du Bassin de Paris est très impur, il est formé de deux à quatre bancs de sel de 20 à 30 mètres séparés par une épaisseur équivalente d'insolubles. Les isopaques concerneront malgré tout l'ensemble de la série salifère.

L'espacement des courbes est de 50m ; l'isopaque 50m a été tracé en pointillé permettant de mieux visualiser le domaine le plus épais.

- la pureté : il suffit d'estimer la hauteur totale de sel par rapport à l'épaisseur totale de l'unité salifère reconnue. Leur rapport donnera un pourcentage dont le complément à 100 est le "pourcentages d'insolubles". C'est ce qui est proposé ici, schématisé par un rectangle associé à chaque sondage. Il représente le pourcentage d'insolubles, de 0 à 30 %. A 30 % et au-delà il est entièrement hachuré : le sel est trop impur pour que l'on puisse y faire des stockages. Entre 0 et 30 % le sel apparait en noir au-dessus des hachures : si le rectangle est totalement noir, le sel est quasiment pur.



Cette valeur de 30 % a été choisie en rapport avec la pureté nécessaire (.) du sel pour pouvoir y lessiver des cavités (15 à 20 %).

A cette présentation idéale certaines réserves doivent être apportées : les forages carottés sont peu nombreux, et les rares carottes des sondages pétroliers ne sont jamais dans le sel. La lithologie est donc obtenue par l'interprétation des cuttings et surtout des mesures électriques effectuées durant le forage (résistivité, radioactivité γ , densité...).

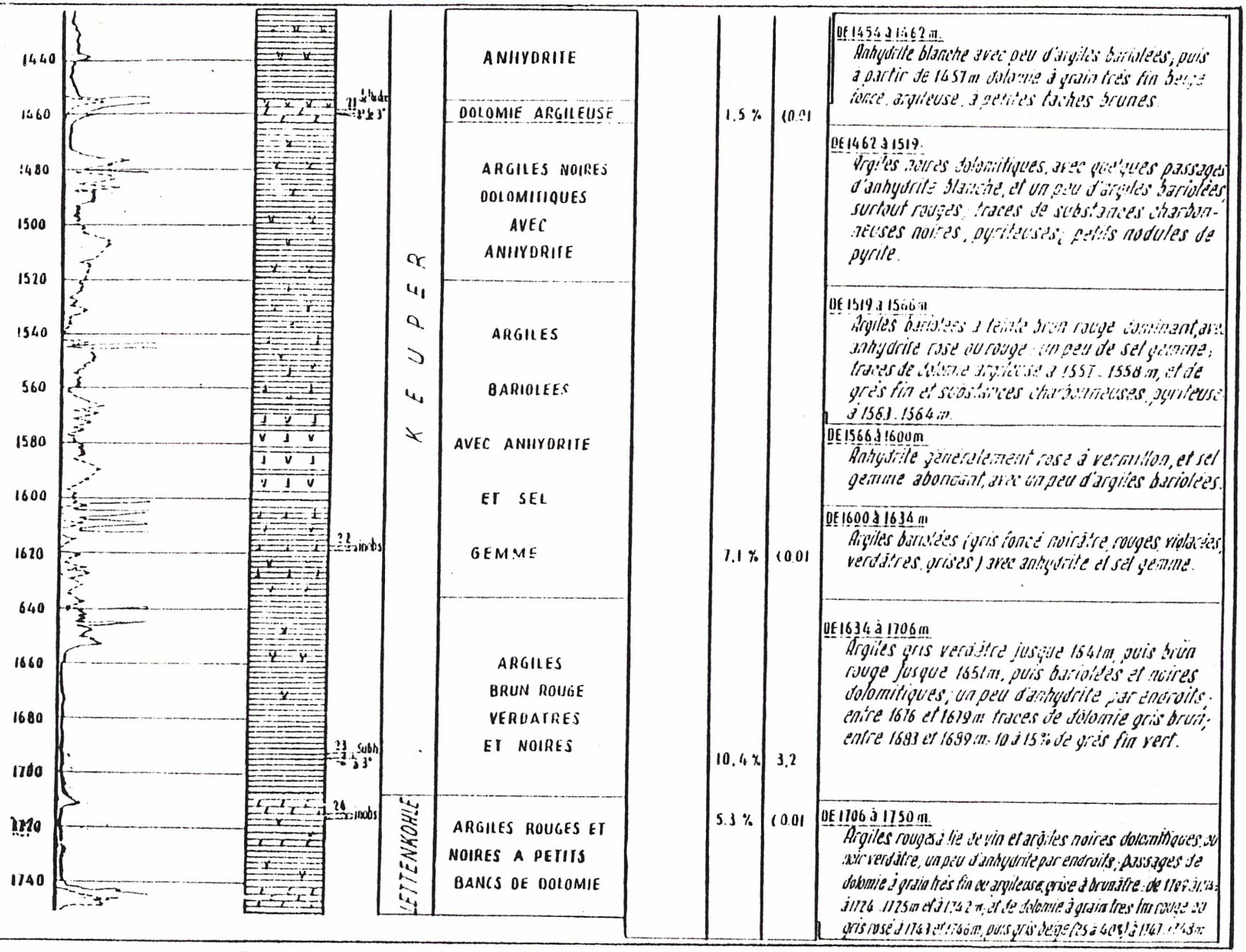
L'évolution de la technologie depuis 30 ans a doté l'instrumentation d'une précision remarquable :

Or les sondages utilisés datent aussi bien de 1944 que de 1980 ! L'information disponible n'est donc pas la même, car les interprétations ne sont pas comparables.

Mais même, en dépit des progrès, l'information reste discontinue : les prises de mesure sont effectuées à des intervalles décimétriques au mieux (pendagemétrie). Les carottes faites dans le sel montre celui-ci traversé de petits niveaux argileux millimétriques à centimétriques, bien en deçà de toute précision instrumentale. Aussi selon l'expression de G. BUSSON on ne peut parler que d'une pureté diagraphique. (un exemple simpliste permet de s'en rendre compte : un sel "théorique" dans lequel alternent 4cm de sel pur et 1 cm d'argile sera "lu" comme un sel pur et massif ; en fait il contient 20 % d'insolubles!).

La confiance que l'on peut accorder à cette pureté du sel est donc toute relative. Un dernier exemple avant la présentation des différentes cartes renforcera si nécessaire notre prudence.

(.) Selon une des sociétés, ce critère n'est pas aussi strict et, -moyennant un coût plus élevé et surtout une répartition des insolubles favorable- on peut développer des cavités dans un sel assez impur. En fait il faut éviter les insolubles au pied de la future cavité, (risque d'obturation totale) sinon on peut obtenir toutes les formes souhaitées.



DE 1454 à 1462 m.
Anhydrite blanche avec peu d'argiles bariolees, puis à partir de 1457 m dolomie à grain très fin beige foncé, argileuse, à petites taches brunes.

DE 1462 à 1519.
Argiles noires dolomitiques, avec quelques passages d'anhydrite blanche, et un peu d'argiles bariolées surtout rouges; traces de substances charbonneuses noires, pyriteuses; petits nodules de pyrite.

DE 1519 à 1566 m
Argiles bariolées à teinte brun rouge dominant, avec anhydrite rose ou rouge, un peu de sel gemme; traces de dolomie argileuse à 1557 - 1558 m, et de grès fin et substances charbonneuses, pyriteuse à 1563 - 1564 m.

DE 1566 à 1600 m
Anhydrite généralement rose à vermillon, et sel gemme abondant, avec un peu d'argiles bariolées.

DE 1600 à 1634 m
Argiles bariolées (gris foncé noirâtre, rouges violacées, verdâtres, grises) avec anhydrite et sel gemme.

DE 1634 à 1706 m
Argiles gris verdâtre jusque 1641 m, puis brun rouge jusque 1651 m, puis bariolées et noires dolomitiques, un peu d'anhydrite par endroits entre 1676 et 1679 m; traces de dolomie gris brun, entre 1683 et 1699 m. 10 à 15 % de grès fin vert.

DE 1706 à 1750 m.
Argiles rouges à lie de vin et argiles noires dolomitiques, ou noir verdâtre, un peu d'anhydrite par endroits; passages de dolomie à grain très fin ou argileuse grise à brunâtre: de 1769 à 1776 - 1775 m et à 1742 m, et de dolomie à grain très fin rouge ou gris rosé à 1741 et 1746 m, puis gris beige (?) à 1691 à 1741 - 1743 m.

Fig 9 –
Extrait du log fondemental du sondage d'Ancerville (source: S.C.G.)

Le sondage d'Ancerville (Bassin de Paris, 1954) laisse espérer sur le log habillé à l'échelle du 1/2000e (fig. 9) une épaisseur d'environ 30 à 40m de sel impur. L'ensemble du niveau où le sel -même en traces- est mentionné fait 124 mètres (1519 à 1643). C. MARCHAL a réinterprété dans son travail sur le Bassin de Paris toutes les informations fournies par les sondages. La coupe d'Ancerville s'en trouve modifiée, avec un sel massif, assez pur, se développant sur près de... 160 mètres !

On pourrait intituler ceci "chercher l'erreur" ! Mais au-delà de l'anecdote, cet exemple montre que toute information doit être accueillie avec prudence et bien vérifiée.

Les différents bassins -

Le Sud-Est

A Le Trias salifère

La puissance des dépôts tertiaires (plus de 3 000m) dans la partie centrale du bassin subalpin est un handicap pour une étude précise des sédiments triasiques ; les sondages qui les ont traversés entièrement sont localisés sur la bordure ouest (le Massif Central) et nord ; au Sud, les forages (Autan Mistral, Sirocco, Tramontane) ont rencontré le socle directement sous le Miocène et à l'Est le Trias est mal représenté à l'affleurement, dans un contexte tectonique bouleversé par les divers chevauchements.

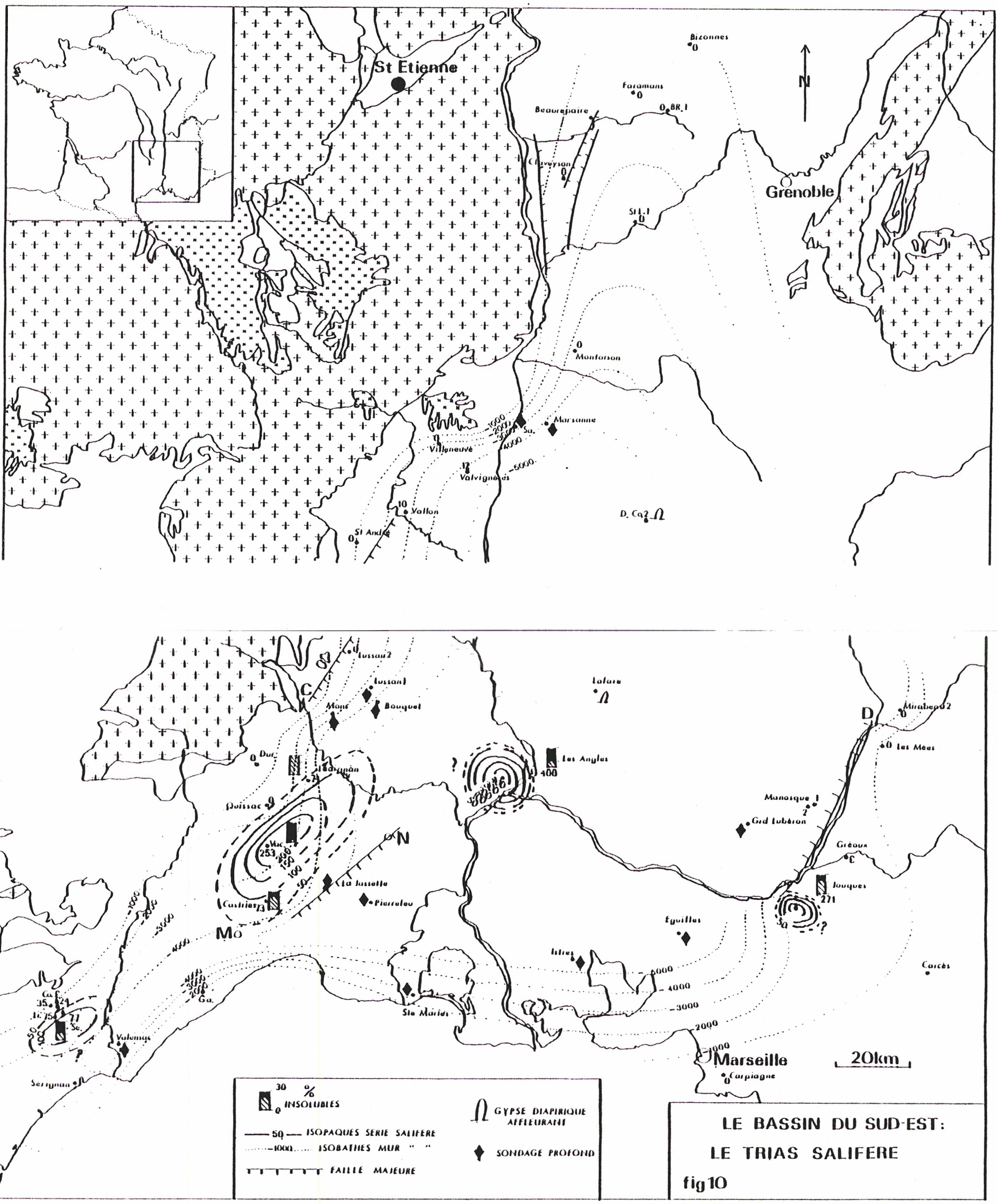
La dispersion des sondages a contraint à un tracé prudent des diverses "fosses évaporitiques (fig. 10). Le sel est en général assez pur, massif, et épais : à Vacquières on a 240 mètres de sel massif, aux Angles 400 mètres de sel avec très peu d'insolubles. Il ne semble jamais tectonisé ; cependant deux diapirs de gypse (Condorcet-D.Co2- et Lafare -DL.Fa2-) sont affleurants dans la partie centrale du bassin.

Excepté à Gréoux où la base du sel est à 1900m, ce sel triasique est trop profond (5500m aux Angles, 2500m à Vacquières) pour présenter un intérêt économique. Les bassins oligocènes nombreux dans cette région sont plus accessibles.

B Les bassins oligocènes

Vauvert et Manosque

Ces deux gisements de sel sont peu étendus (quelques kilomètres carrés chacun) et l'on pourrait en déduire qu'ils sont très bien reconnus



LE BASSIN DU SUD-EST:
LE TRIAS SALIFERE

fig 10

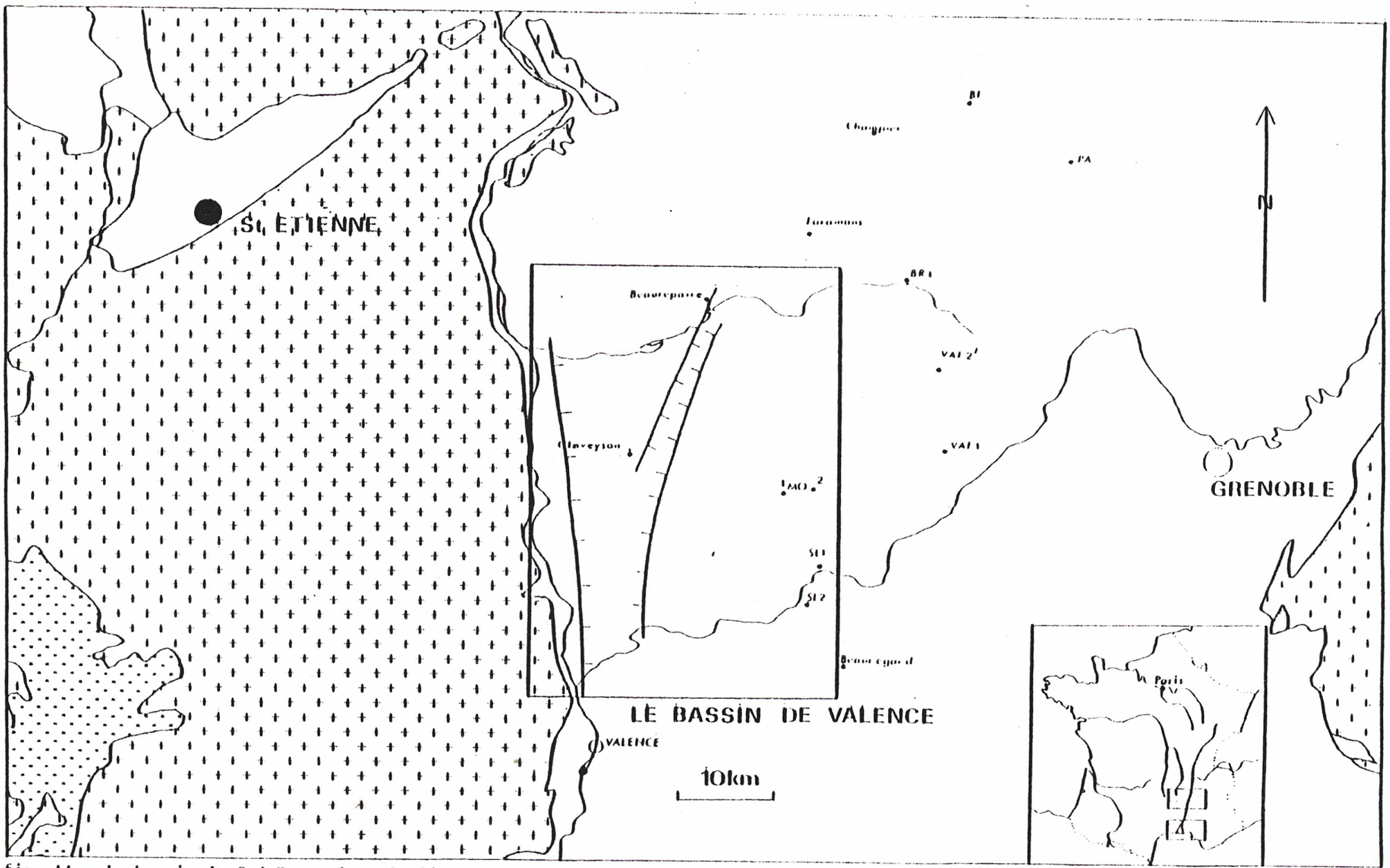
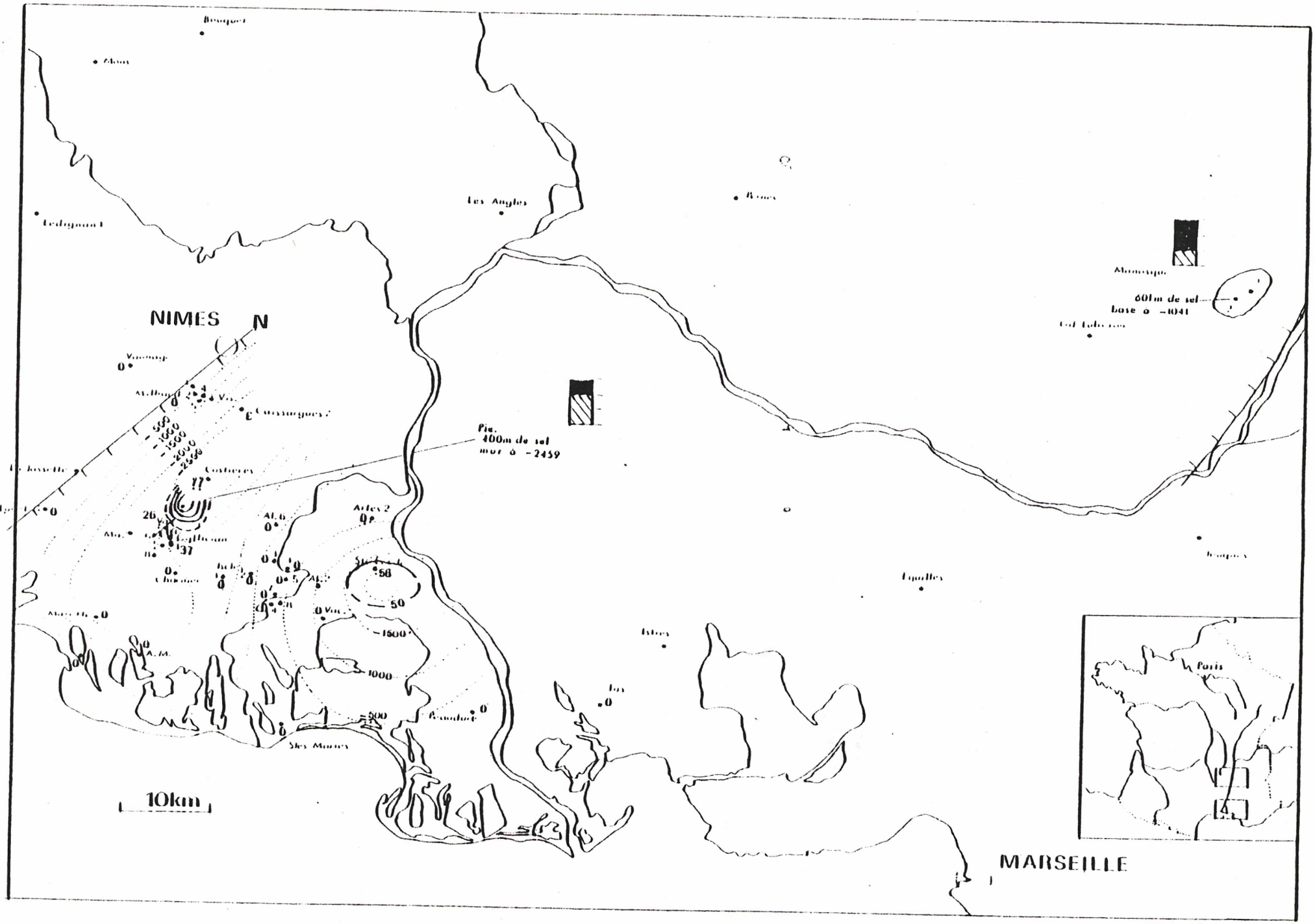


fig. 11 - le bassin du Sud-Est : le sel oligocène. a - les bassins méridionaux (ci-dessous) b - emplacement du bassin de Valence (ci-dessus)

fig. 11a


NIMES
N
Les Angles
Pie.
400m de sel
mur à -2459
601m de sel
base à -1041
Arles 2
Sles Maries
Paris
10km
MARSEILLE

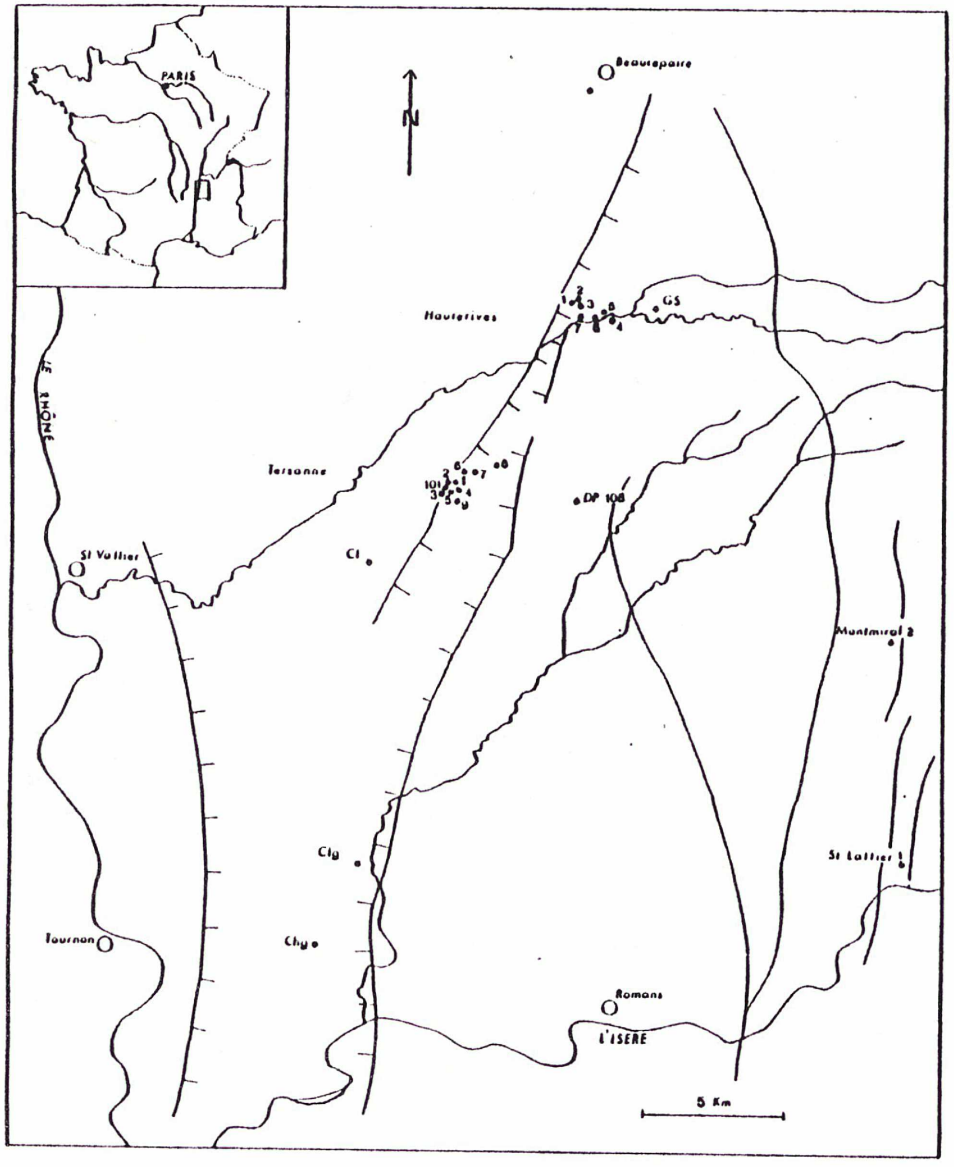


fig. 12a - Schéma structural

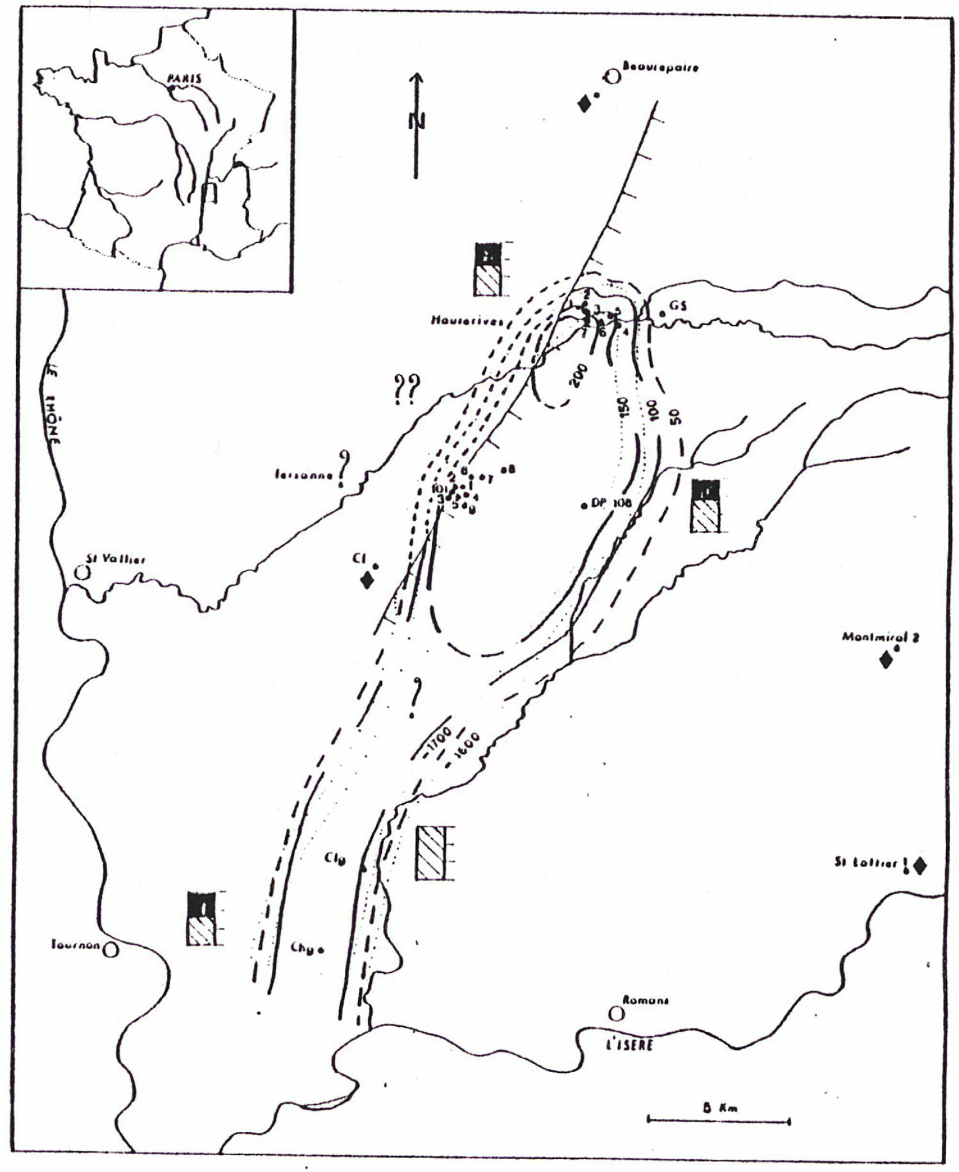


fig. 12b - Le sel inférieur

fig. 12 - Le bassin de Valence

fig. 12c - Le sel supérieur

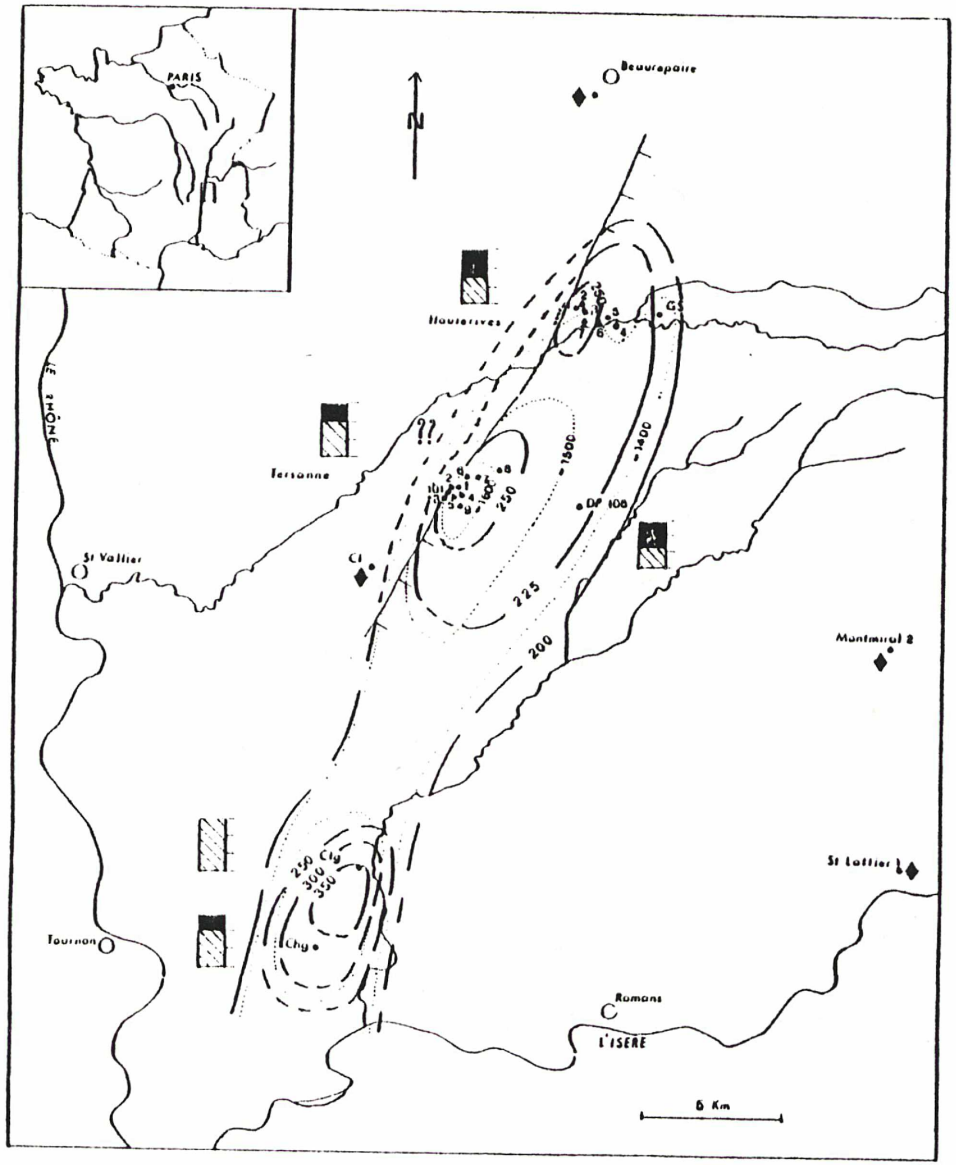
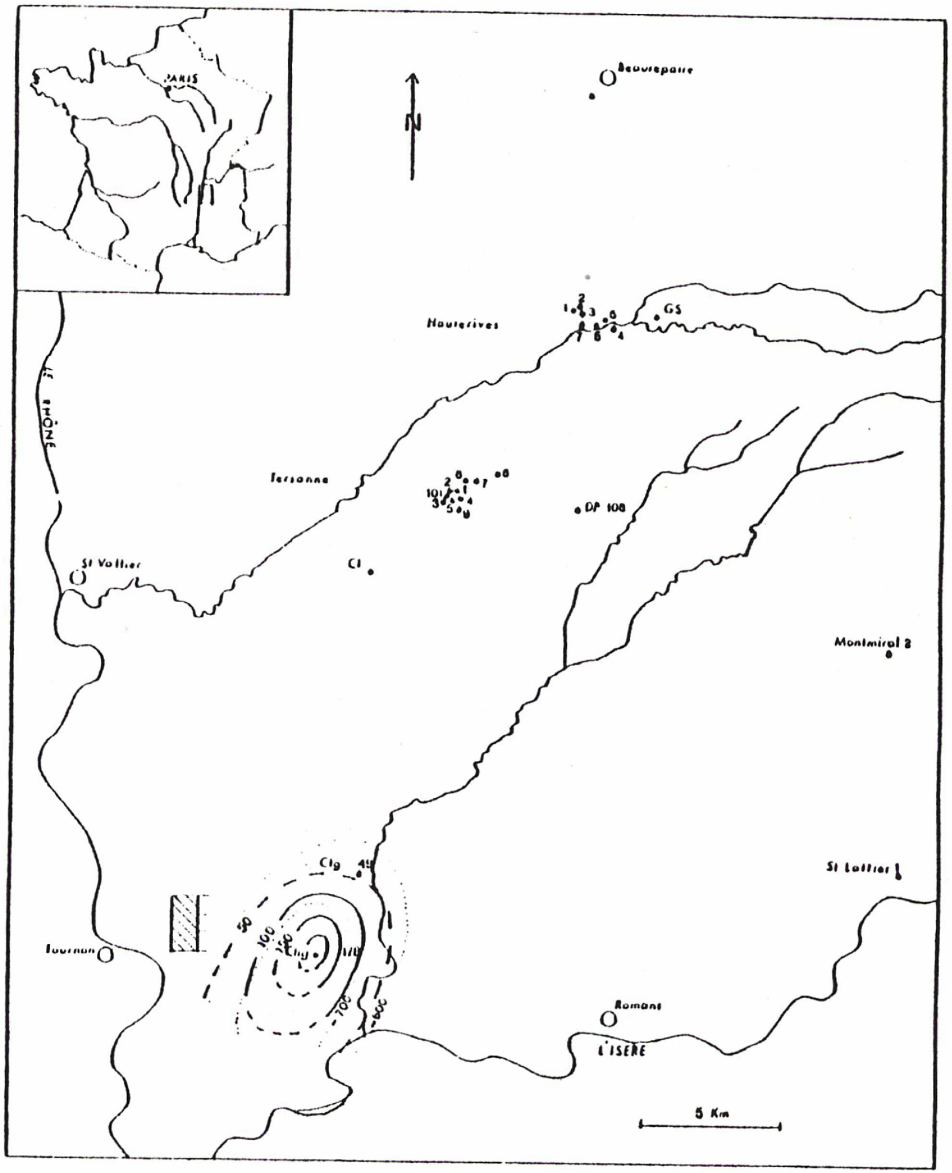


fig. 12d - Le sel chattien



-grâce aux forages d'exploitation- : à l'occasion de cet inventaire, il suffirait d'en recopier les synthèses.
Malheureusement il n'en est rien. Malgré une taille réduite, ils restent moins bien connus que certains grands bassins. La carte proposée (fig. 11) apporte peu de choses : (on trouvera quelques détails complémentaires en annexe).

- A Manosque les sondages ont traversé une série salifère épaisse, (800m) très tectonisée mais peu profonde (le toit de la série se situe entre 300 et 800m).

- La fosse évaporitique de Camargue est coupée en deux par le haut fond d'Albaron ; l'épaisseur de sel ne dépasse pas 20 mètres en général ; un seul sondage (Pierrefeu) a rencontré une épaisseur notable de sel (400m). Une fosse étroite (limitée au Nord-Ouest par la faille de Vauvert) a été en partie reconnue (exploitation de Rhône-Poulenc) : le sel, assez impur, a 500m de puissance vers 2000m de profondeur. Son extension longitudinale (NE-SW) est mal connue, faute de sondages profonds.

Le Valentinois

Comme on peut le remarquer sur la carte précédemment évoquée (fig. 12) les bassins oligocènes sont situés à proximité d'accidents majeurs (la faille de la Durance pour Manosque, celle de Nîmes pour Vauvert) qui ont effectivement affecté la sédimentation durant tout le Mésozoïque et au Cénozoïque.

La fosse du Valentinois n'échappe pas à cette règle ; le schéma structural (fig. 12 a) montre une orientation Nord-Est-Sud-Est, en relais de l'accident cévenol.

Trois niveaux salifères peuvent être distingués dans la série oligocène :

- le sel "inférieur" n'a été entièrement reconnu qu'au Nord, à Hauterives et à Montchenu (sondage des MDPA DP 108), et au Sud à Chanos-Cursons (Chg). Les courbes sont donc extrapolées (fig. 12 b) A Tersanne, il a été traversé sur 20m et le forage a été arrêté .

- le sel "supérieur" est le seul observé partout ; Gaz de France y lessive ses cavités de stockages à Tersanne (fig. 12 c).

Dans les deux cas, il est probable que les niveaux salifères sont continus entre la fosse de Tersanne-Hauterives et celle de Chanos-Cursons. Le prolongement au Sud est inconnu.
Par contre l'accident de Beaurepaire pourrait marquer la limite nord-ouest des dépôts salifères : à Claveyson (CP.), le sel n'est mentionné qu'en traces.

- enfin à Clérieux et surtout à Chanos-Cursons un niveau salifère très élevé dans la série oligocène (fig. 12 d) serait d'âge chattien. Il est assez puissant (200 mètres à Chanos-Cursons) mais les insolubles dépassent 40 %. Au Nord, excepté 20 mètres de sel à Te 9, les dépôts moins épais, sont constitués d'argiles calcaires alternant avec des bancs d'anhydrite.

Le Jura-La Bresse

A Le Trias salifère du Jura

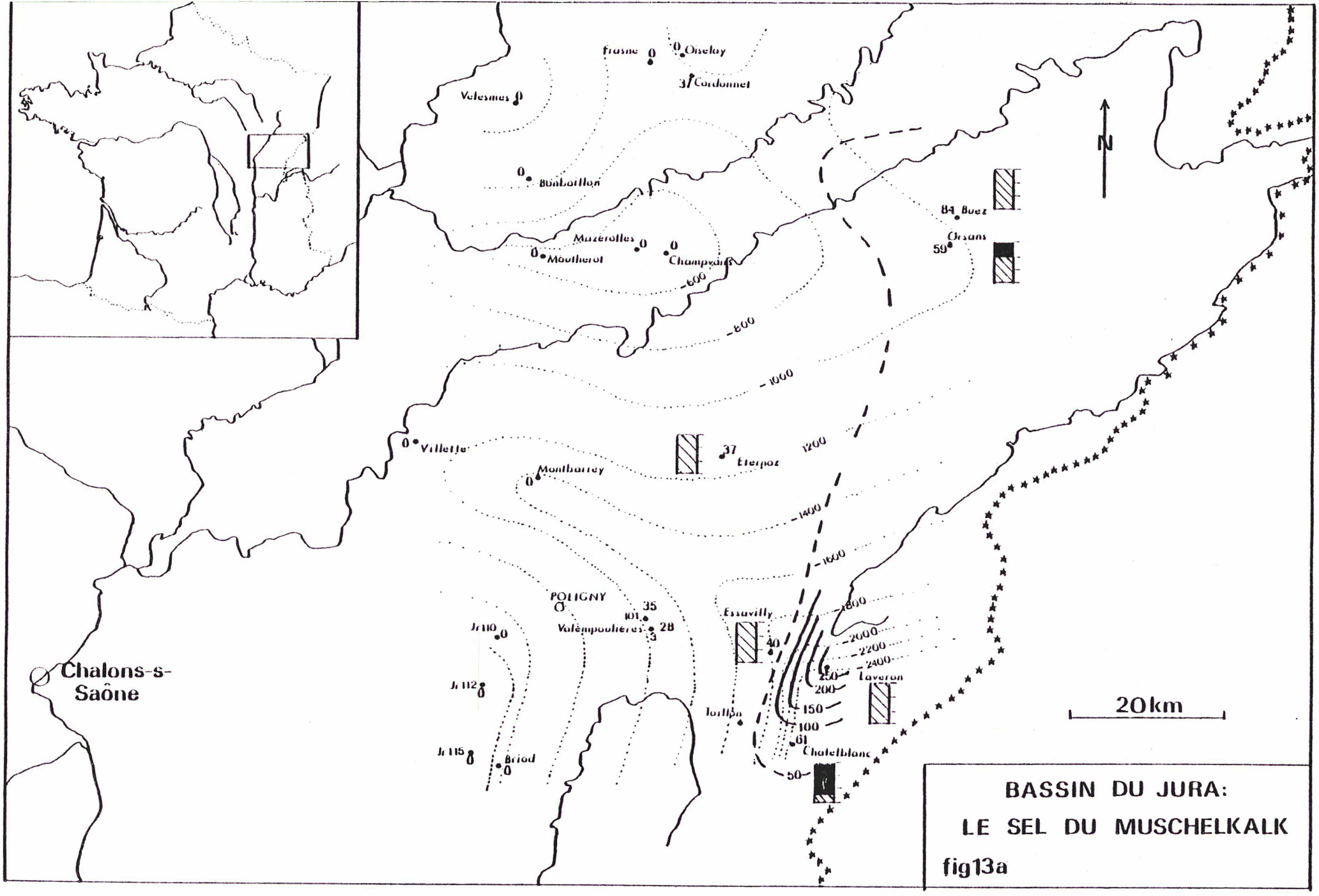
Avant de commenter les deux cartes du Keuper et du Muschelkalk une mise en garde doit être faite : cette région a subi une tectonique intense ; de grands chevauchements (d'Est vers l'Ouest) ont oblitéré les structures préexistantes. En particulier la zone de contact est localisée au niveau des couches les plus plastique, à savoir le Keuper gypseux ou évaporitique. Dans la plupart des sondages le sel est tectonisé. Comme le souligne G. BUSSON, il est presque impossible de pouvoir corréler deux sondages entre eux : parfois le sel a pu être totalement expulsé puis dissous, tandis qu'ailleurs des épaisseurs anormales sont accumulées.
Les courbes d'épaisseur et de profondeur sont donc à prendre avec le maximum de précaution. La connaissance que l'on peut avoir d'un gisement aussi tourmenté restera sans doute très fragmentaire.

- Le Muschelkalk (fig. 13 a)

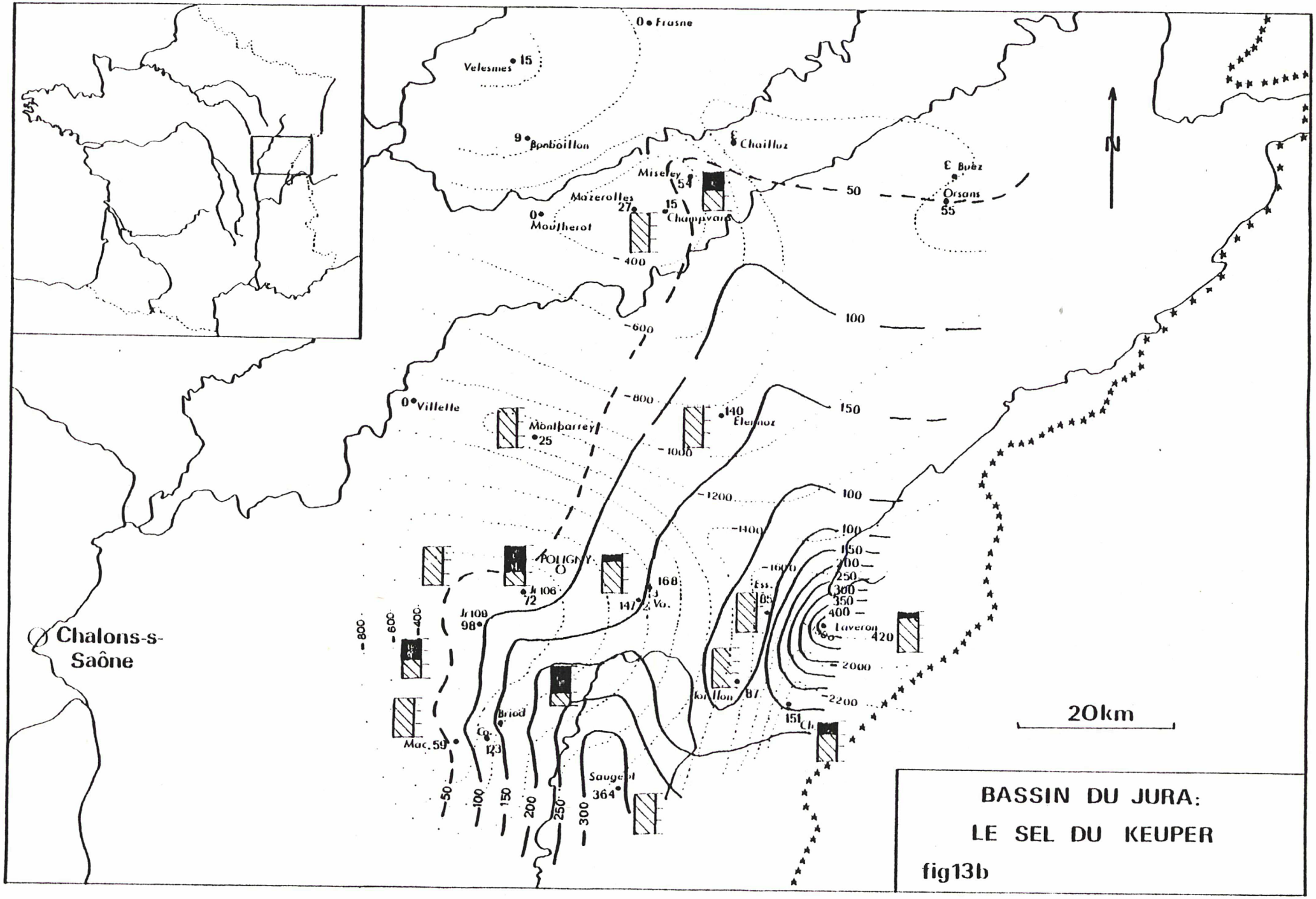
L'extension des dépôts salifères est limitée au Nord-Est ; ils sont peu épais (50 à 80 mètres) sauf à Laveron où la série a 279m d'épaisseur avec beaucoup d'insolubles.

- Le Keuper inférieur (fig. 13 b)

Deux zones s'opposent nettement : - à l'Ouest (au Sud de Poligny) un domaine peu profond (entre 400 et 800 m de profondeur) où le sel est peu épais (50 à 200 mètres).



BASSIN DU JURA:
LE SEL DU MUSCHELKALK
fig13a



BASSIN DU JURA:
LE SEL DU KEUPER
fig13b

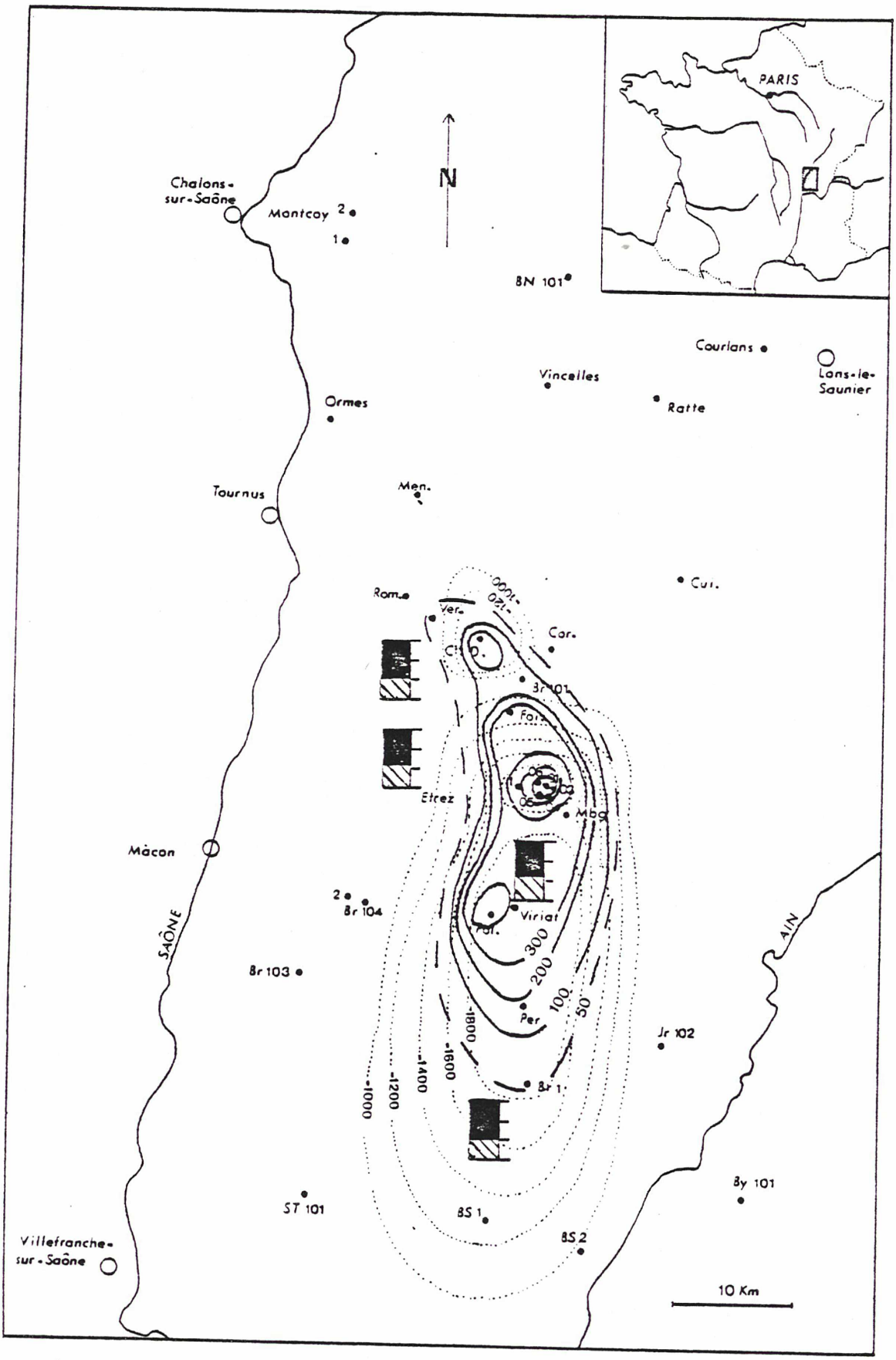


fig. 14a - Le bassin de la Bresse : le sel inférieur

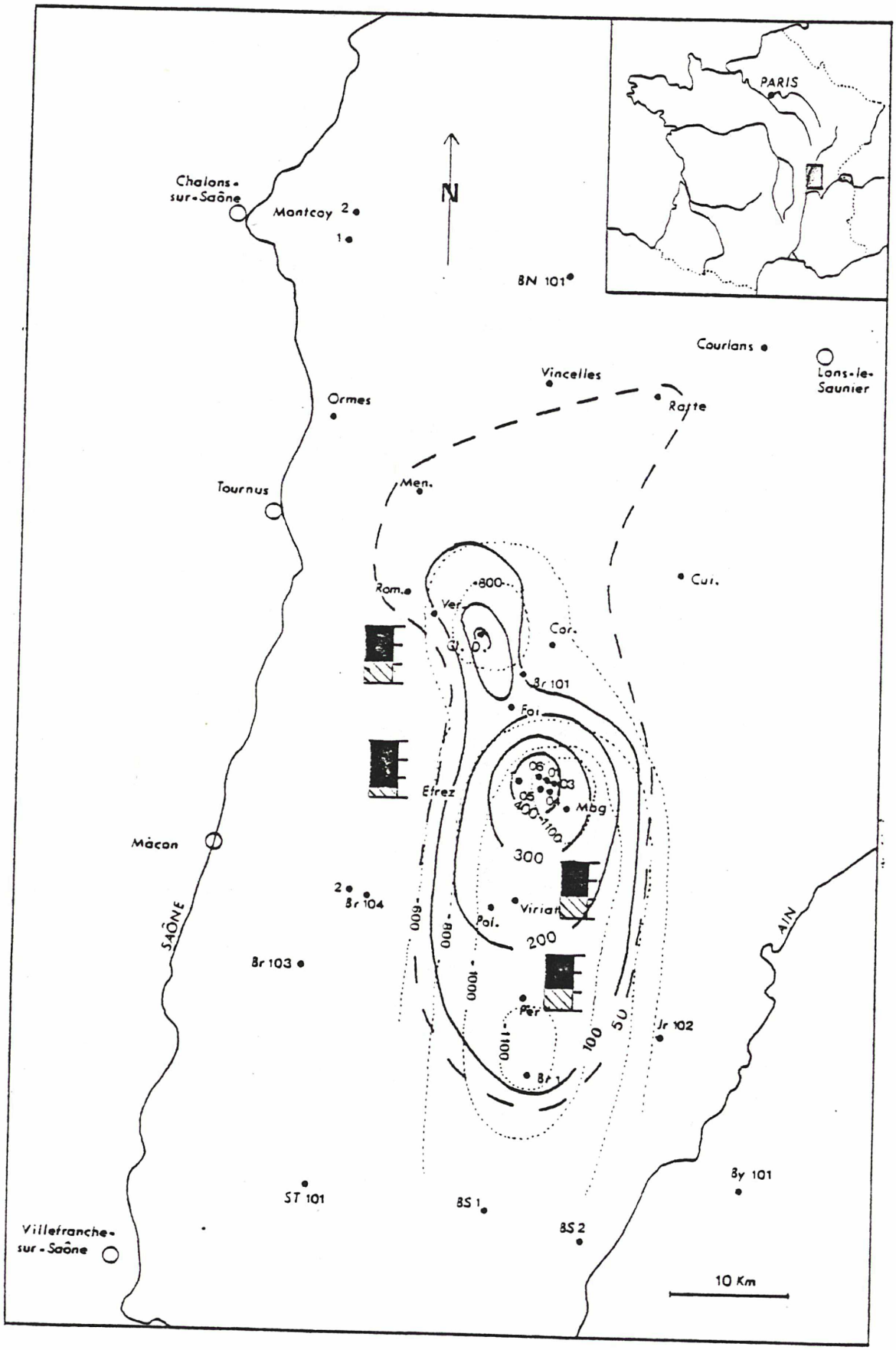


fig. 14b - le bassin de la Bresse : le sel supérieur

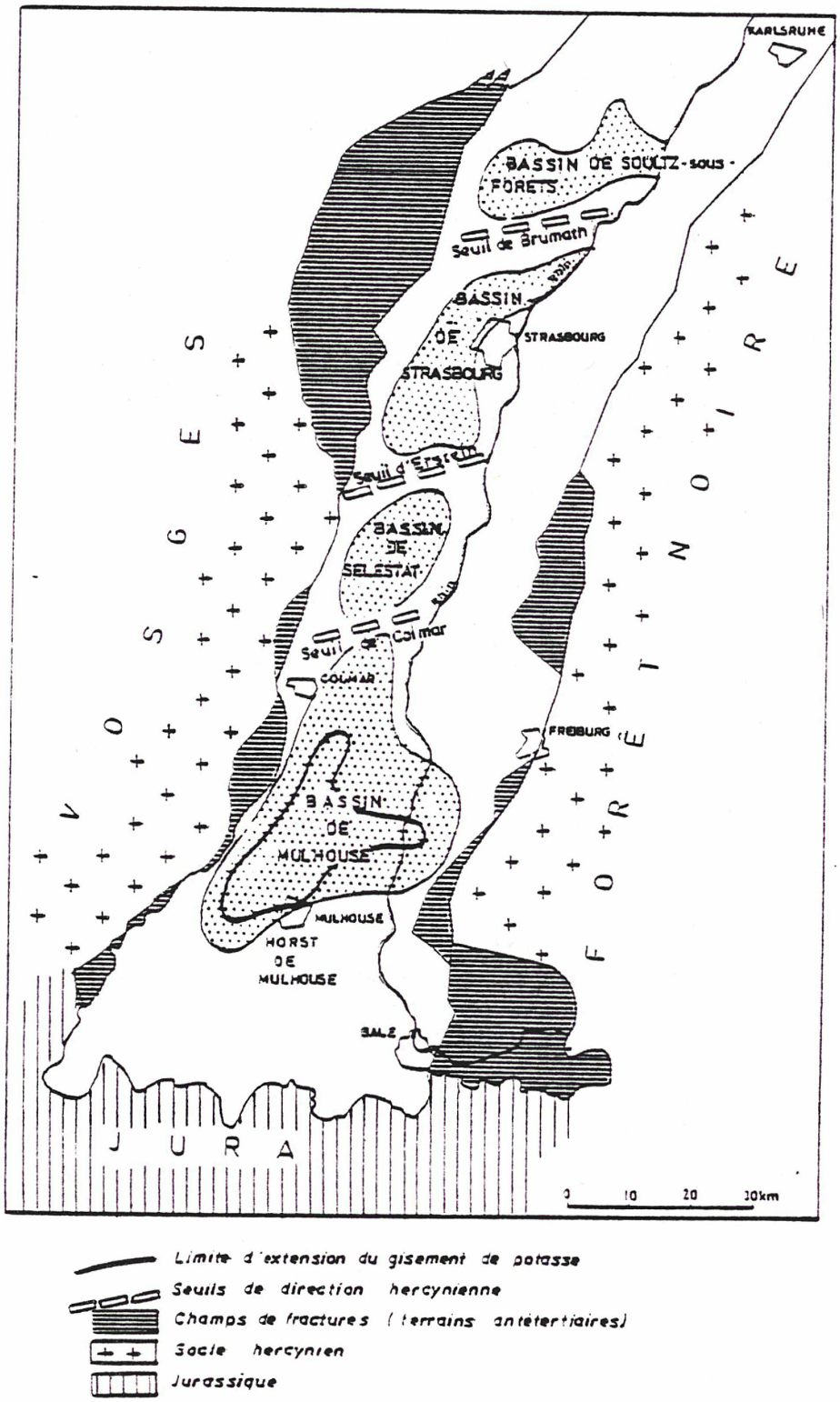


fig. 15 - Le fossé rhénan : les bassins salifères tertiaires (extrait de GANNAT et MERIAUX 1980, fig. 3)

- à l'Est et au Sud les sondages montrent des épaisseurs supérieurs à 300m (Saugeot et Laveron) mais le sel est assez impur et à grande profondeur:1200 à 2000mètres).

B La Bresse (fig. 14 a et b)

Le fossé bressan est contemporain du Valentinois ou du fossé alsacien. Il s'aligne avec eux au long d'un axe orienté Nord-Sud (Rhin-Rhône) correspondant à un rift "avorté" de la croûte terrestre.

La série oligocène est tout à fait comparable à celle du Valentinois ; on y distingue pareillement un sel "inférieur" et un sel "supérieur" séparé par une unité argilo-anhydritique. Le troisième ensemble salifère n'existe pas mais comme pour le secteur nord du Valentinois, son équivalent latéral serait dans les minces niveaux anhydritiques du sommet de la série. La corrélation avec le bassin de Valence serait ainsi assurée (MM. GANNAT et SCHLUND -MDPA- communication orale, 1981).

Le sel supérieur est moins épais en général mais dans les deux unités, il est très pur. Les insolubles sont -contrairement à Tersanne- répartis dans la masse ; les gros bancs d'anhydrite sont absents.

L'Alsace

Le fossé rhénan est l'exemple type de remplissage lié à la tectonique (cf annexe 1, le modèle du rift, BAUER, 1974). Dans une série très épaisse (le Tertiaire a 2000m de puissance, dont 1700m de Sannoisien évaporitique) on distingue classiquement quatre unités ; successivement en descendant, le Complexe salin l'Ensemble salifère, le Faisceau salin et le Grand Banc de sel.

Deux régions ont été retenues pour tracer les cartes : le bassin potassique de Mulhouse et le bassin de Strasbourg. En fait dans le fossé rhénan existent quatre bassins salifères tertiaires séparés par des seuils topographiques (fig. 15). Les sondages miniers concernant le bassin de Sélestat et de Soultz-sous-Forêts n'ont pas pu être exploités faute de temps.

- le bassin de Mulhouse

Il est plus particulièrement connu du fait de l'exploitation de la potasse : les deux couches de potasse (2 et 4m d'épaisseur environ) sont en effet

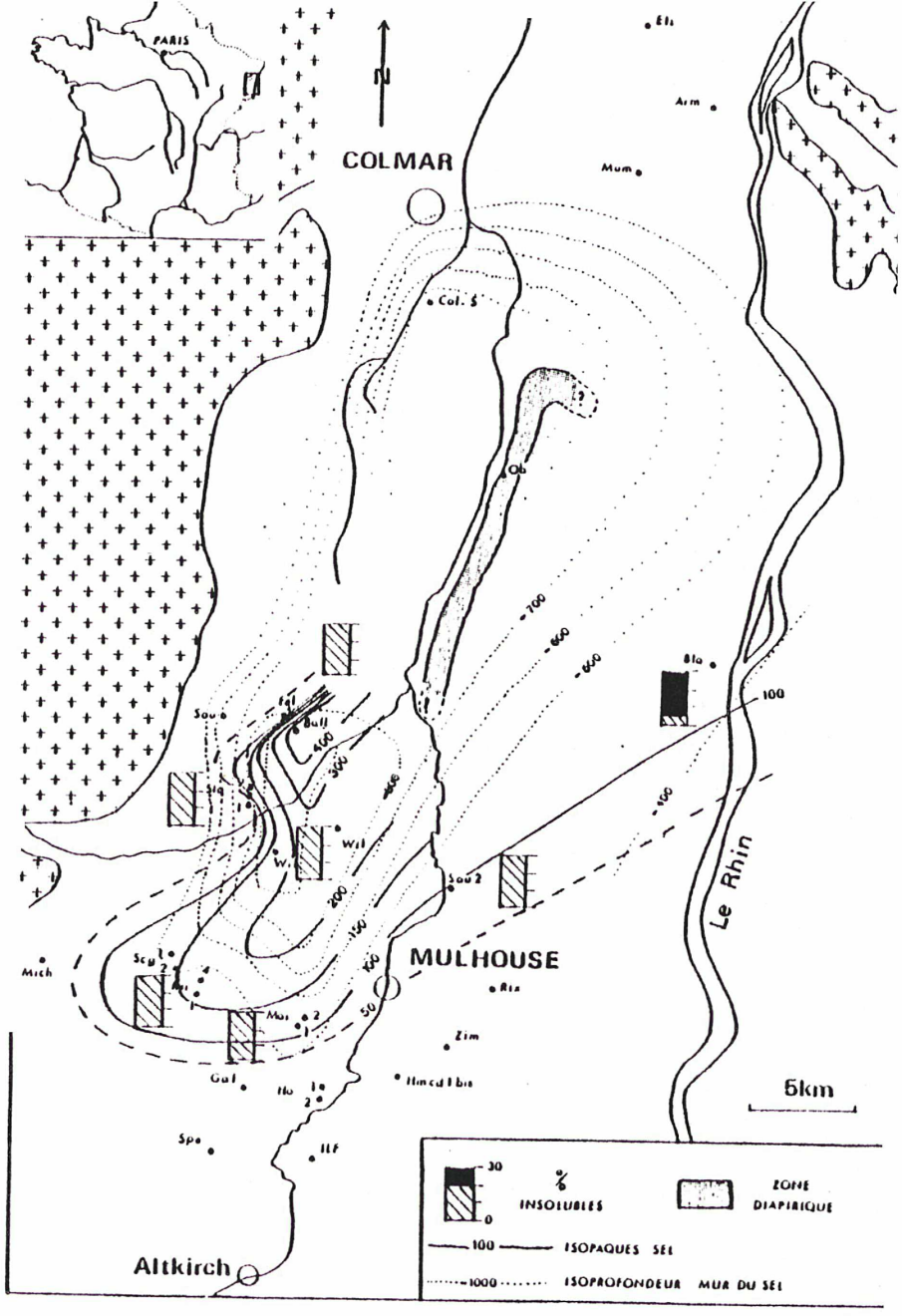


fig. 16a - Le complexe salin

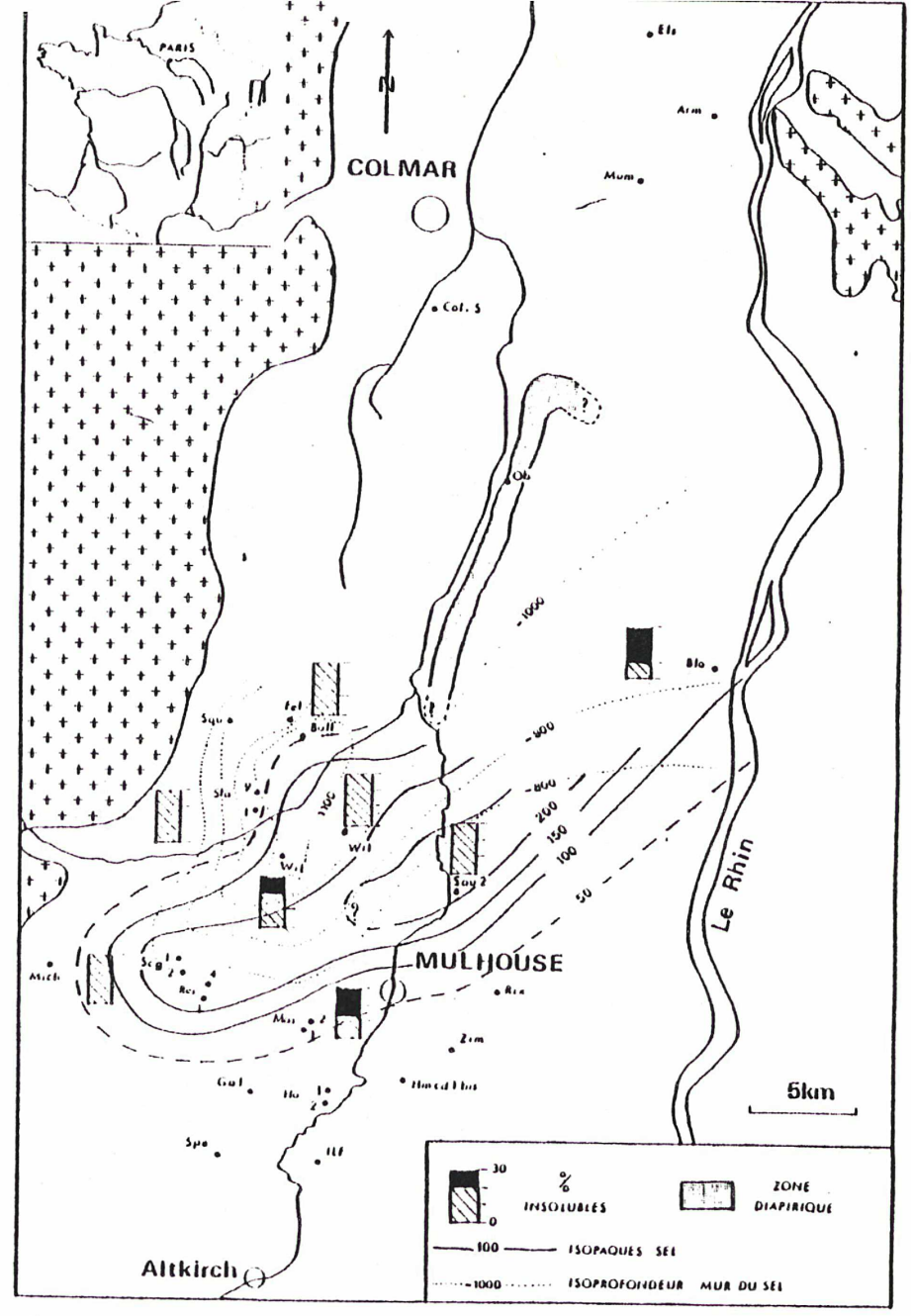


fig. 16b - L'ensemble salifère

fig. 16 - Le bassin de Mulhouse

fig. 16 c - Le faisceau salin

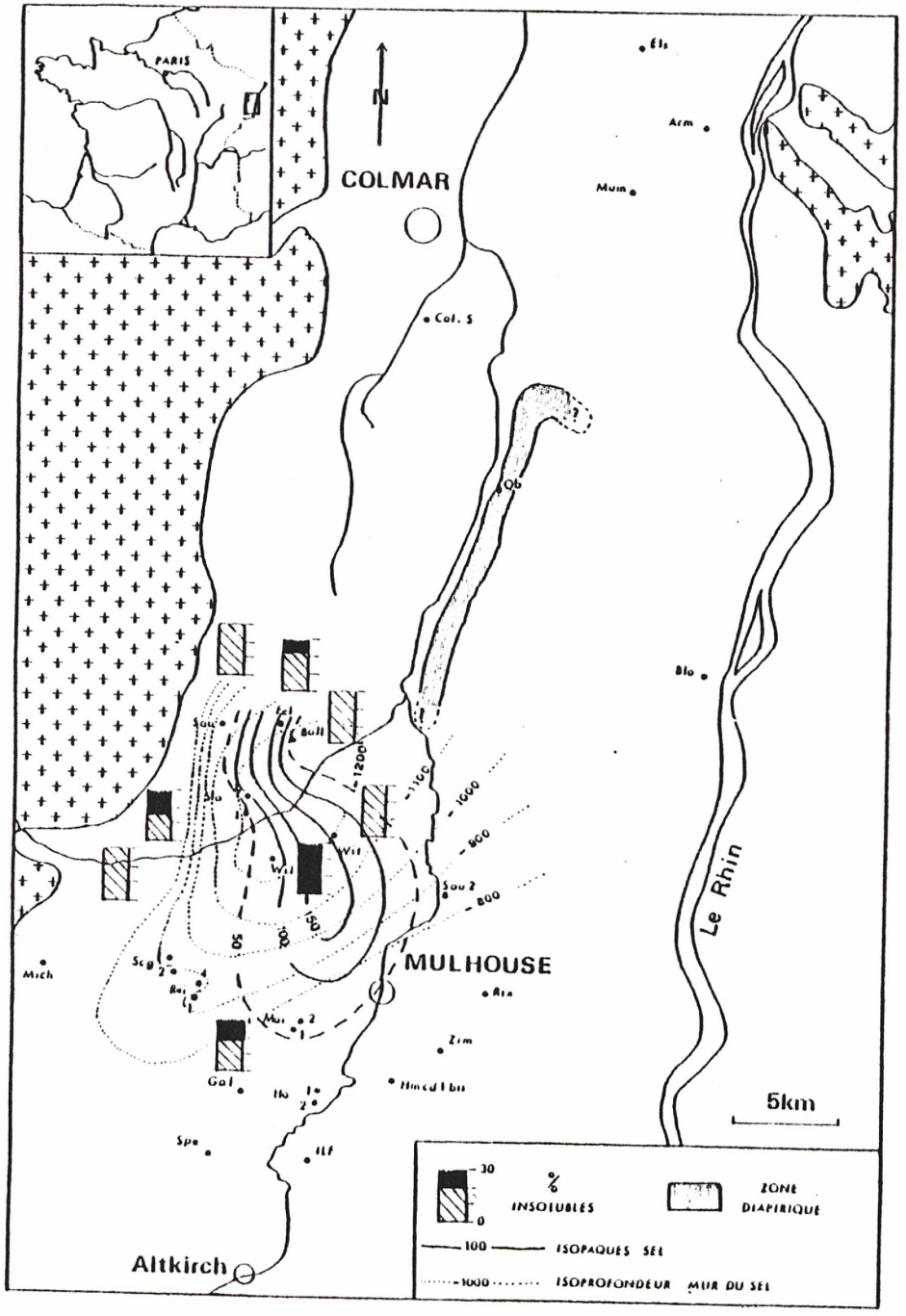
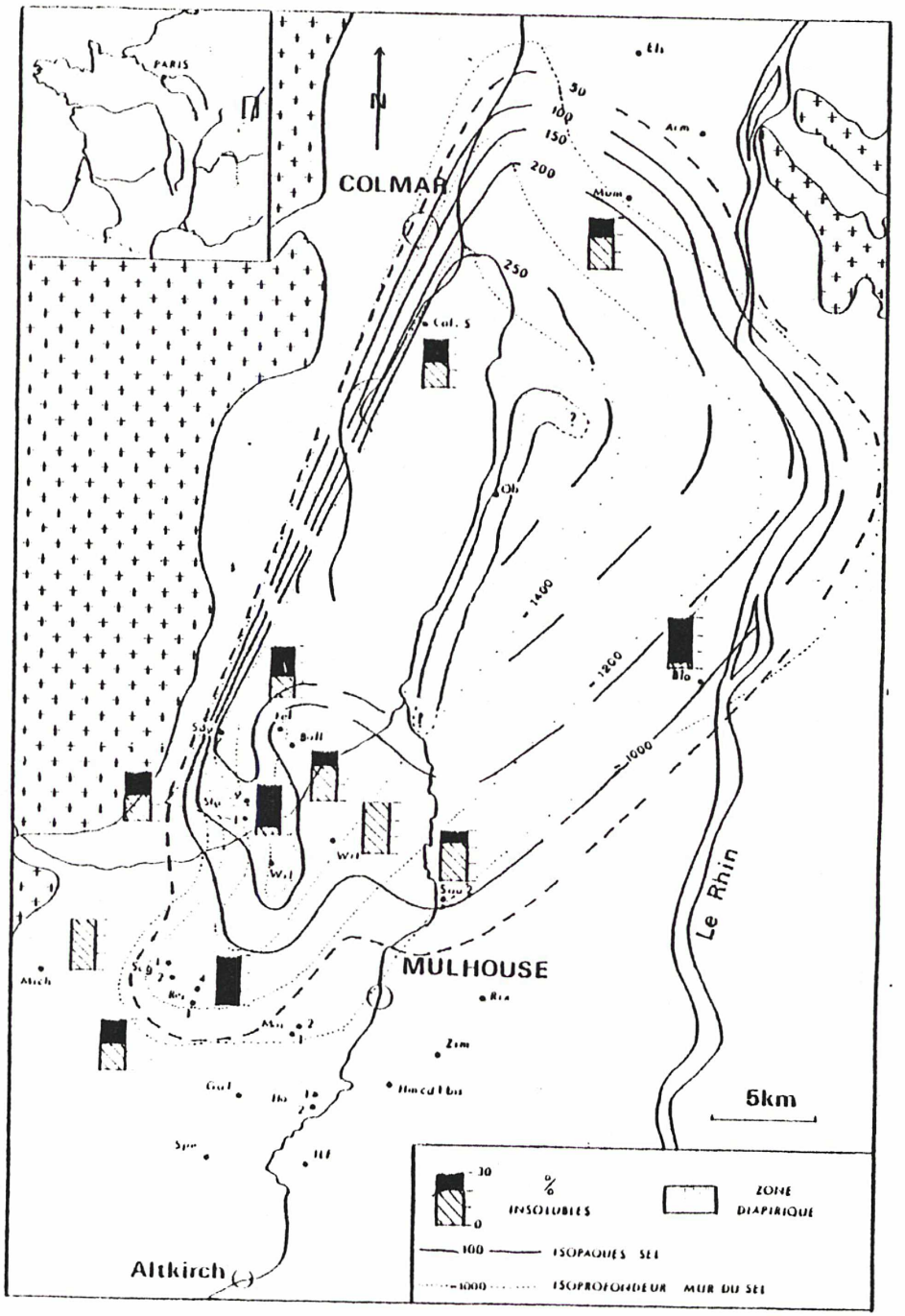


fig. 16d - Le grand banc de sel



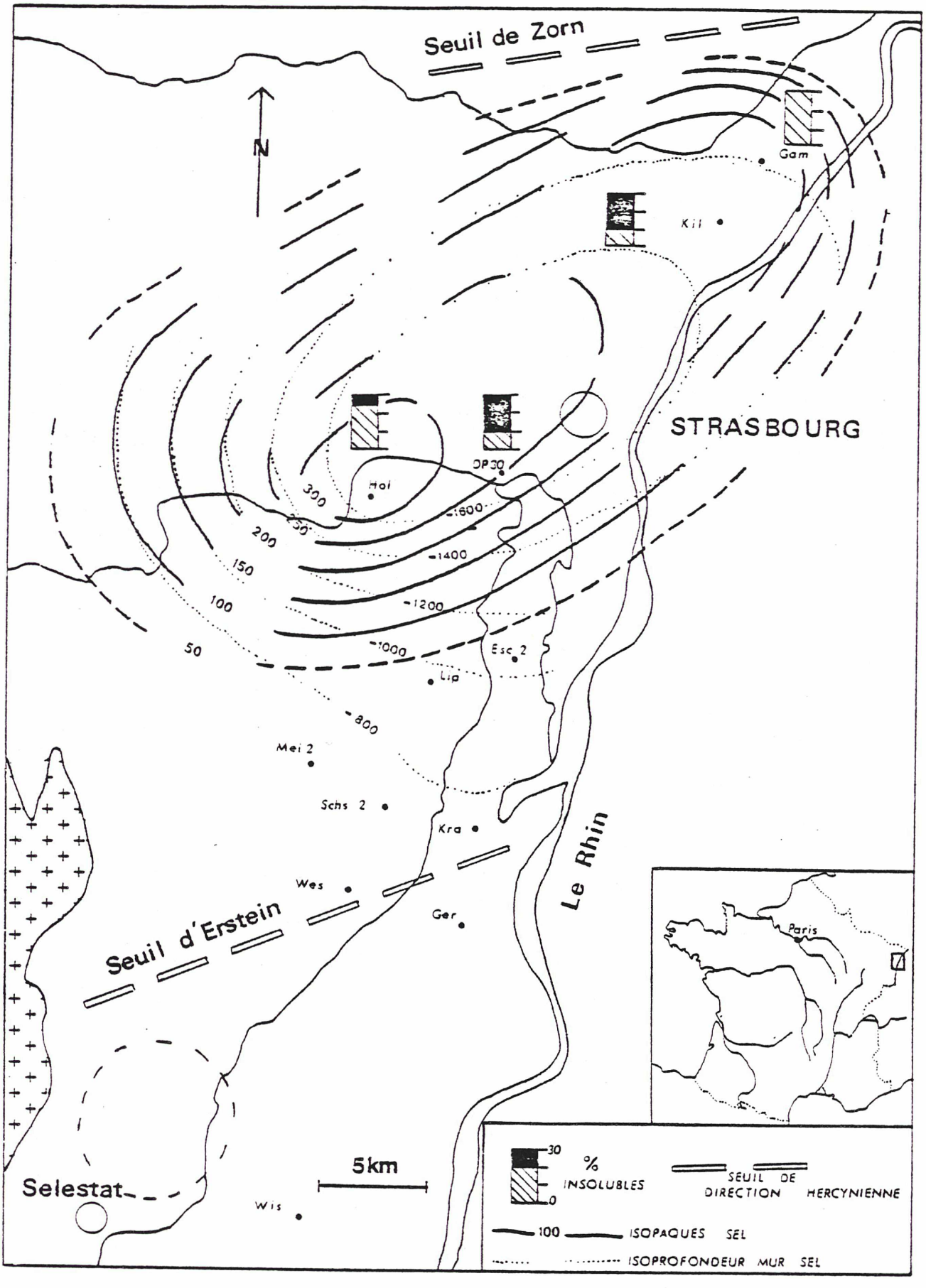


fig. 17 - Le bassin de Strasbourg : le grand banc de sel

situées à la base du Complexe salin (le moins profond). (.)
Bien que toutes représentées, les quatre unités n'ont pas la même extension; (fig. 16 a, b, c, d) ; en général les zones les plus épaisses en sel se superposent aux domaines profonds. Les deux unités intermédiaires (Ensemble Salifère et Faisceau salin) sont quelquefois contigues mais en général 50 à 80 mètres de marnes les séparent.

Le sel le plus pur est dans le Grand Banc de Sel : les logs indiquent "sel massif" et quelquefois "rares passées argileuses". Sa profondeur varie entre 1000 et 1600 mètres.

Le bassin comporte un zone diapirique quasi-affleurante visible sur les différentes cartes. (Le sondage de Oberbergheim (Ob.) a traversé 2000 m de sel). L'existence de sel en dehors de cette bande dans la partie centrale du bassin, (la question ne se pose que pour le Grand Banc de sel) est ainsi sujette à caution. Il est possible que le diapir ait absorbé tout le sel ; les courbes d'épaisseurs seraient alors sans objet.

- le bassin de Strasbourg

Seul le Grand Banc de sel existe les trois niveaux supérieurs sont remplacés par des argiles. Il est toujours aussi pur, assez épais (200 à 300 mètres), entre 1400 et 1600 mètres de profondeur. (fig. 17).

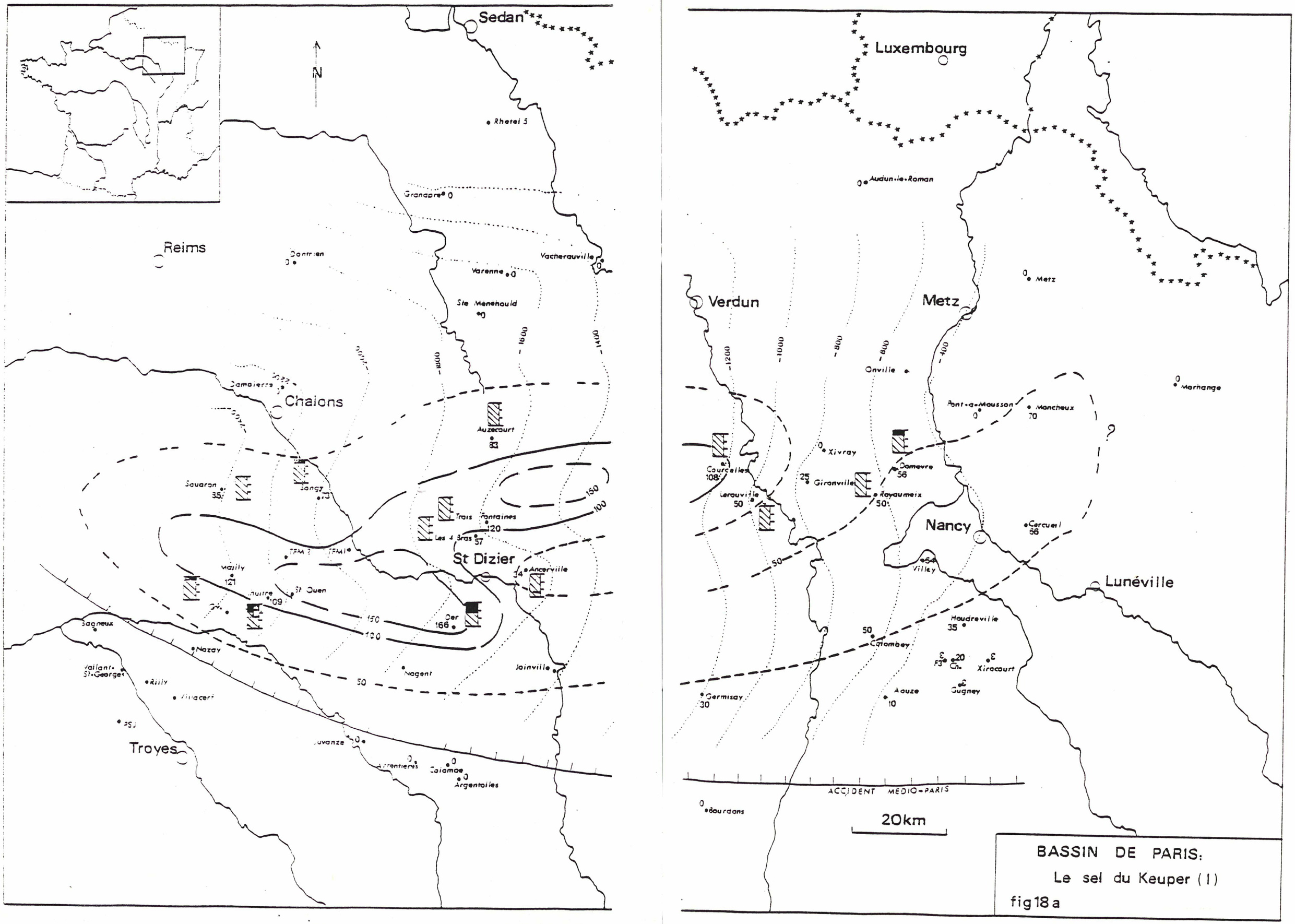
Le Bassin de Paris

Quelques chiffres donneront une idée de la densité de l'information : au début des années 70 sur l'ensemble du bassin 596 sondages pétroliers avaient été forés ; sur ces 596 sondages :

- 481 n'ont pas atteint le Trias,
- 66 ont atteint le Trias ; sel non rencontré,
- 34 ont traversé le Trias, pas de sel,
- 10 ont débité de l'eau salée,
- 5 ont traversé du sel.

La partie lorraine, peu profonde, est assez bien connu (MAUBEUGE, 1962). Une étude récente (C. MARCHAL, inédit) permet d'avoir une idée plus précise de l'extension du bassin salifère. En particulier une corrélation précise des diagraphies de sondages assure la continuité des niveaux entre le sel "lorrain" et le sel "champenois".

(.) L'exploitation de la potasse est faite en taille, avec foudroyage des terrains. Tout le sel du Complexe salin situé dans le périmètre d'exploitation est donc effondré et fracturé. Son utilisation s'en trouve sans doute compromise.



BASSIN DE PARIS:
Le sel du Keuper (1)

fig 18 a

Sedan
N
Rhetel S
Grandpre 0
Reims
Dontrien
Vacherauville
Varenne 0
Ste Menehould
0
1600
1400
1800
2000
2200
2400
Dampierre
Chalons
Auzecourt
83
150
??
Saudron
85
Sanga
73
Trois Fontaines
120
Les 4 Bras
57
115 Bz.
St Dizier
TFM 2
TFM 1
Ancerville
160
Mailly
121
Lhuitre
109
St Ouen
Gv.
166
150
100
50
Bagneux
Nozay
Vallant St Georges
Rilly
Villacerf
Nogent
Jainville
PSJ
Troyes
Juvanze
Arrentieres
Calomae
Argentolles
Luxembourg
Audun-le-Roman
Metz
Verdun
1200
1000
800
600
400
Onville
Pont-à-Mousson
Manoncux
70
Marnange
Dieuze
Xivray
Courcelles
108
Damevre
58
Gironville
25
Leravville
50
Royaumeix
50
90
Agincourt
114
Nancy
Cercueil
66
100
Toul 85
Villey
541
Lunéville
50
Haudreville
35
Calombey
50
Xirocourt
Gugney
Aauze
10
Germisay
30
Bourdons
ACCIDENT MEDIO-PARISIEN
20km

BASSIN DE PARIS:
Le sel du Keuper (II)
fig 18b

Les données "brutes" des sondages pétroliers ont fourni une première carte. En utilisant les travaux de C. MARCHAL (et les données complémentaires des sondages de Bazincourt, Toul Dongermain, Champigneulles et Agincourt) une deuxième carte a été tracée. (fig. 18 a et b).

La comparaison des deux montre une modification du secteur champenois ; celle-ci est liée au sondage de Bazincourt (115m de sel) mais surtout à la différence d'interprétation du sondage d'Ancerville. En particulier le sel serait plus massif et plus pur dans la seconde carte.

La limite ouest des dépôts salifères est mal définie : les sondages utiles les plus proches sont à 50 km ; de toute façon le sel y sera très profond (plus de 2400 mètres). Par contre, entre Toul et Ancerville le mur de sel serait entre 1000 et 1600 mètres ; l'extension de la zone épaisse est malheureusement impossible à prévoir, faute de sondages.

L'ensemble des résultats a été synthétisés sur une carte de France (fig. 19) qui précise la position de chaque gisement et les critères le concernant. On remarquera leur concentration à l'Est sur un axe sensiblement orienté Nord-Sud.

Ce rapide inventaire confirme l'abondance du sel en France ; mais les gisements sont très variés, tant par leurs caractéristiques (étendue, profondeur, pureté...) que par l'état des connaissances les concernant.

Ils intéresserons tous un jour ou l'autre les différents utilisateurs ; leurs positions actuelles sont donc particulièrement importantes.

LES GISEMENTS DE SEL EN FRANCE

Fig. 19

Bassins Oligocenes (cououre à 50m)

" Liasiques

" Keuper id.

" Muschelkalk id.

Niveaux salifères superposes

Zones favorables au stockage
E > 100m
P > = 1600m
i < 20 %

Faille majeure

BASSIN AQUITAIN
(d'apres GANNAT, 1980)

0 50 100 150Km

BASSIN DE PARIS

ALSACE

JURA

BRESSE

VALENCE

MONTPELLIER

MANOSQUE

GREOUX

VAUVERT

- 8 - LES DIFFERENTS PARTENAIRES

Les producteurs de sel -

Substance de faible valeur à la tonne, le sel supporte mal les surcoûts ; les consommateurs de sel se sont toujours appliqués à s'installer au voisinage d'une source d'approvisionnement, comme en témoigne l'implantation déjà très ancienne de l'industrie de la soude en Lorraine.

Le sel de mer est le procédé le plus avantageux ; pourquoi s'en priver, dans une région où les gisements de sel sont profonds ? En outre il bénéficie auprès des consommateurs d'un label "naturel" très prisé.

De même en Lorraine la mine de Varangéville reste-t-elle ouverte dans une conjoncture difficile, car le prix de revient du minerai demeure plus avantageux que celui du sel ignigène (obtenu à partir de saumure saturée), surtout quand son usage est le déneigement. (Sauf pour l'exportation où les Allemands exigent 95 % de teneur contre 92 % en Lorraine).

La distance entre les usines chimiques et la source de saumure doit être la plus petite possible. (Aussi Solvay s'est-il installé en Lorraine dès 1880 !) Ainsi chacun agit en fonction de sa propre situation et ses impératifs :

- Solvay et Rhône-Poulenc veulent préserver le marché français (voire européen) de la soude contre le dumping des pays de l'Est ou le minerai naturel américain [il n'existe plus qu'une seule soudière en activité aux Etats-Unis !] Elles hésitent à une remise en cause de leurs méthodes actuelles d'exploitation (par pistes, contrairement à CSMSE) : le surcoût inévitable qui en résulterait, les pénaliserait gravement, malgré la part assez faible de cette matière première dans le prix de la soude.

- La constitution du triplet, Stockage-Gisement pour Saturation-Usine chimique, constitue un exemple très remarquable dans ce contexte de parcellisation et de rigidité du marché, d'une solution harmonieuse du point de vue de l'intérêt général.

Solvay en Bresse dispose d'un saumodoc de 80 km entre le stockage et son gisement. Lorsque celui-ci viendra à s'épuiser, il sera tentant de proposer au stockeur (Gaz de France) de lui creuser ses cavités et de récupérer une saumure à des conditions avantageuses.

Rhône-Poulenc est dans une situation faborable dans le Valentinois : Gaz de France ne pouvant rejeter sa saumure, a construit à ses frais un saumoduc entre Tersanne et Hauterives et paie une redevance pour la saumure livrée (elle doit être saturée à Hauterives).

- Enfin l'exploitation du Gisement de Vauvert (pour alimenter l'usine de Lavéra) relève d'une volonté d'autonomie d'approvisionnement en sel pour maintenir des prix bas. De plus le sel de mer et le sel (contrat de secours) de Manosque paraissent devoir nécessiter un traitement d'épuration complexe donc coûteux

En 1980 Vauvert a été cédé à Chloé Chimie (filiale d'ATO chimie). La gérance de la pétrochimie est une charge lourde pour une société "extérieure" comme Rhône-Poulenc. Avec le coût croissant du pétrole, la tendance semblerait en faveur d'une pétrochimie faite par les pétroliers.

Chacun optimise donc au mieux et pourtant des contradictions apparaissent déjà : en Lorraine le sel est exploité pour le sodium (fabrication de carbonate de soude), et on rejette...le chlore (sous forme de chlorure de calcium) qui est extrait à grand-peine 800 km au Sud.

- La situation des MDPA est délicate : outre la potasse (2 millions de tonnes par an), 7 millions de tonnes de sel sont produites chaque année(.). L'essentiel est jeté dans le Rhin. Plusieurs solutions ont été suggerées :

Les MDPA ont avancé l'idée de l'injection dans la nappe profonde de la Grande Oolithe, qui est déjà salée (20 à 40 g/l et surtout impropre à toute consommation humaine, contenant de nombreuses hydrocarbures sulfurés. Cette solution partielle (1 million de tonnes par an) a provoqué une vive réaction de la part des alsaciens.

On a proposé un saumoduc parallèle au Rhin qui collecterait les déchets français, allemands, belges et hollandais, pour les rejeter en mer du Nord. Les paysans ont refusé (en cas de fuite du saumoduc les terrains seraient gravement endommagés) et surtout le coût du projet a été dissuasif.

Une saline de 1 million de tonnes a été refusée par tous les producteurs de sel, qui mettent en avant la récession qu'ils subissent.

Chaque année les MDPA rejettent donc près de deux fois la production française (au rythme maximum de 250 kg/s) ; ils commercialisent une petite partie pour le sel de déneigement (300 à 400 000 tonnes).

(.) production fatale due à l'exploitation de la potasse.

Les stockeurs -

Les deux grands stockeurs en France sont GEOSTOCK et Gaz de France [la SNEA à Viriat (2x100 000 m3) et Salies de Béarn (30 000 m3) ou Rhône Poulenc au Grand Serre (70 000 m3) sont très modeste en comparaison avec eux] .

La société Géostock gère le stockage d'hydrocarbures liquides de Manosque. Après le second choc pétrolier, les pays consommateurs ont constitué des réserves importantes ; le volume disponible a donc été largement utilisé. 27 cavités sont autorisées et 9 en cours de lessivage dont 6 pour le stockage et 3 pour la production de saumure (.). Il n'est pas prévu de nouvelles cavités pour l'avenir : les pétroliers vont sans doute réduire leur production et craquer des molécules de plus en plus lourdes dans les raffineries. Manosque aurait donc atteint sa taille idéale.

En cas d'un doublement du niveau obligatoire de réserves (6 mois au lieu de trois) la capacité pourrait être doublée voire triplée. Cependant le gisement est mal connu et les partenaires ne souhaitent pas investir dans un programme de reconnaissance qui s'avérerait inutile ; de plus le stockage de fuel ou de gas oil immobilise des sommes considérables (investissements de 8 à 10 milliards de francs).

Le gisement lui-même est de belle qualité : le sel possède des caractéristiques mécaniques excellentes (viscosité, module d'Young, résistance en compression...). Les indications de fluage restent très faibles, de l'ordre de grandeur de la précision actuelle des mesures.

Enfin la société possède un périmètre en Bresse, où elle pourrait éventuellement créer un stockage. (Une petite cavité existe à Viriat).

Gaz de France exploite quant à lui 9 stockages souterrains dont 2 dans le sel à Etrez (Bresse) et Tersanne (Valentinois). Ces deux installations sont situées sur un des grands axes européens, l'axe Rhin-Rhône, reliant la Méditerrannée à la mer du Nord (gaz Algérien - gaz hollandais). Elles sont indispensables surtout dans des régions où les structures aquifères font défaut.

Les problèmes techniques sont -ils furent à peine affleurés (I, C)- nombreux. L'évolution rapide du volume des cavités pose de sérieux problèmes. Un nouveau modèle tenant compte de la viscosité du sel a été élaboré pour tenir compte de cette difficulté.

(.) 2 contrats sont en cours : un avec Rhône-Poulenc qui arrive à échéance en 1985 et l'autre avec PCUK qui s'achève en 1988 mais sera prolongé car une unité nouvelle de chlore vient de démarrer.

L'avenir des stockages dans le sel est en balance : les nouvelles structures en aquifères sont de moins en moins nombreuses, plus chères et localisées dans les mêmes régions. Mais il suffit d'une structure gigantesque équivalente en taille au total du volume des autres sites, dont la découverte reste malgré tout possible, pour bouleverser la politique de stockage. Aussi les choix définitifs n'ont-ils pas été déjà arrêtés. Tersanne et Etrez continuent à se développer au rythme d'une cavité supplémentaire tous les ans.

Une des grosses difficultés est l'élimination de la saumure : dans le Valentinois comme en Bresse, le gaz de France a dû construire en totalité ou pour moitié un saumoduc (80 km en Bresse, une dizaine en Valentinois). Il doit même acquitter une redevance auprès de Rhône-Poulenc. Le développement des stockages dans le sel devra tenir compte de cette forte contrainte : la proximité d'un utilisateur de saumure.

L'Administration -

La parfaite logique du comportement individuel des industriels aboutit à une situation incohérente au niveau national : ici on jette du chlore que l'on exploite ailleurs, là on paie pour être débarassé d'une saumure que l'on extrait à grand peine un peu plus au sud, deux fois la production annuelle de sel est rejetée dans le Rhin.

Face à une situation complexe, l'Administration doit d'abord assurer la première de ses tâches, qui est de veiller à la sécurité des installations. La tenue des terrains autant pour l'exploitation que le stockage est une de ses préoccupations. De même la stabilité des cavités de stockage est l'objet de soins attentifs. La question des rejets dans le Rhin est débattue au niveau européen.
Elle supervise les demandes de périmètres d'exploitation ou de stockage ; enfin elle évite un gaspillage des ressources naturelles.

En dépit de ses efforts multiples l'Administration a du mal à peser sur l'évolution des situations établies depuis trop longtemps. Cette évolution est autant freinée par un climat difficile dû à la récession dans un contexte international toujours plus concurrentiel, que par des habitudes prises depuis plusieurs décennies. L'opinion publique admet cependant de moins en moins les atteintes par l'industrie à l'environnement et les progrès réalisés dans ce domaine par d'autres industries, y compris dans le secteur de l'exploitation du sous-sol, appellent à l'évidence la définition d'une politique cohérente d'utilisation des ressources en sel gemme.

III L'AVENIR DU SEL

- INTRODUCTION

-A- QUELLES PRIORITÉS ?

-B- RÔLES ET MOYENS DE L'ADMINISTRATION.

INTRODUCTION

La partie précédente peut être assimilée à une photographie de la situation : les gisements de sel français y sont décrits avec certaines caractéristiques. (profondeur, épaisseur, pureté) ; les industriels ont été présentés avec leurs préoccupations, leurs difficultés. Envisager l'avenir du sel consiste, tâche assez difficile, à insuffler le mouvement, la vie, à cet "instantané".

Deux questions ont émergé au travers des discussions et des recherches ayant orienté ce travail :

- quelles priorités pour le sel ?

- quel rôle et quels moyens doit avoir l'Administration ?

Toutes deux sont triviales dans leur formulation, mais les réponses le sont d'autant moins que la matière comporte un certain nombre de tabous que les années ne finissent pas de lever. Il ne s'agira pas ici de contester le bien-fondé de telle ou telle décision, toujours explicable par des raisons historiques, économiques ou politiques, mais plutôt d'envisager l'évolution toute prochaine d'une situation complexe, replacée dans son contexte économique, social, voire humain.

Tableau 8

	1974	1975	1976	1977	1978	1979(*)
Δ (consommation − production) (milliers de tonnes)	- 21	- 115	- 429	+ 359	+ 76	- 1311
% $\frac{\Delta}{\text{production}}$	- 0,8 %	- 4,6 %	- 13,8 %	+ 16,5 %	+ 2,6 %	- 30,2%

(*) année exceptionnelle : la production de sel de mer a atteint un niveau record (1,814 million de tonnes) après deux années très mauvaises (0,5 et 0,8 millions de tonnes).

-A- QUELLES PRIORITÉS ?

Le sel est une matière première *indispensable*. On peut remplacer le pétrole par le charbon, l'énergie nucléaire ou solaire, l'industrie chimique n'a pas de produit de substitution pour fabriquer le chlore ou la soude.

Le sel est aussi un magasin où peuvent être entreposés divers produits. Il y a cette fois des alternatives (mine, aquifère...) mais toute souplesse de choix se trouve limitée par les disponibilités géographiques.

La question est précisément de savoir comment vont s'harmoniser dans les dix, quinze voire vingt prochaines années les différentes utilisation du sel.

La situation économique -

L'analyse du marché ne peut être faite que sur les chiffres du sel cristallisé car la saumure est le plus souvent une consommation interne de l'industrie chimique. Si l'on reprend les chiffres du tableau 4 (I,B page 24), on s'aperçoit qu'entre 1974 et 1977 la consommation de sel cristallisé a fluctué entre 2 350 et 2 700 milliers de tonnes ; en 1978 et 1979 elle a augmenté de 20 % environ mais uniquement pour le sel de déneigement. La même constatation se fait à partir du tableau 5 (I, B, page 25) où le total (Industrie chimique + autres débouchés) est en baisse de 7 % sur la période 1974-79.

La crise économique ayant provoqué un ralentissement général de l'activité explique la stagnation de la chimie. En outre celle-ci s'approvisionne en saumure, dont la production intégrée s'adopte aux besoins : à ce niveau il n'y a guère de risque de fermeture.

Quant à la surproduction de l'industrie salinière, elle peut être évaluée par l'écart Δ = (consommation-production) et le rapport de cet écart à la production totale (tableau 8). Exception faite de l'année 1979 les écarts sont à l'intérieur d'une fouchette de 15 % en plus ou en moins. Quant à l'année 1979, elle est particulière avec une production record de sel de mer (1,814 millions de tonnes).

Si l'on recalculait l'écart (-30 %) en prenant pour le tonnage de sel de mer la valeur moyenne des cinq dernières années (1,02 millions de tonnes), le résultat serait de -16 %, chiffre situé dans l'intervalle de fluctuations de 15 %.

Sans nier le problème, il convient d'employer le terme de surproduction avec prudence ; pour 1979 on peut parler de stagnation conjoncturelle. Il serait d'autant moins raisonnable de condamner certaines unités de productions qu'elles sont situées dans des régions durement touchées par la récession :

- le Languedoc, avec les marais salants ; en outre ce mode de production est économe en énergie, puisqu'utilisant l'énergie solaire. C'est sans doute un moyen d'avenir pour les pays en voie de développement.

- la Lorraine, déjà très éprouvée par la crise de la sidérurgie, où se poserait en plus le problème de l'approvisionnement des industries chimiques.

Si dans ce domaine il y a peu d'espoir de voir une croissance forte et continue, les stockages semblent destinés à un important développement. Parmi les produits intéressés, le gaz naturel occupe, comme nous allons le vérifier, une position privilégiée. Il a cependant deux concurrents potentiels : les déchets nucléaires et les hydrocarbures liquides.

Les déchets nucléaires -

Le combustible nucléaire utilisé est envoyé dans une usine de retraitement (la Hague, en France). Après cette opération il reste des produits radioactifs, dégageant de la chaleur pendant des milliers d'années. De nombreux travaux sont en cours depuis plusieurs années, recherchant les *sites géologiques* favorables pour les entreposer.

Trois types de sites sont envisagés : le granite, les argiles et le sel. Dans ces trois cas les déchets seraient stockés dans des mines existantes ou bien des cavités aménagées à cet effet.

Au sein de la communauté européenne, la Grande-Bretagne et la France travaillent sur le granite, l'Italie et la Belgique sur les argiles, l'Allemagne Fédérale sur le sel. Cette dernière procède à des essais dans la mine d'Asse, mais pour des déchets de "faible activité". Elle a également un projet de cavité pour ceux de "haute activité".

Le B.R.G.M. publiera prochainement une étude particulière relative aux sites géologiques favorables. Dans cet atlas européen (9 tomes) le sel occupe peu de place. De fait les allemands sont les seuls actuellement à développer cette voie (la Recherche, Juin 1981) ; parmi les difficultés on peut mentionner la (possible) grande vitesse ascensionnelle des dômes de sel (quelques centimètres par an) : le stockage s'élevant dans les couches supérieures se rapprocherait de la surface et risquerait à brève échéance la destruction par dissolution au contact d'une nappe aquifère. Le comportement d'une cavité soumise à une température élevée est également un facteur mal connu.

Dans les perspectives actuelles de recherche le sel n'apparait pas comme une priorité dans ce domaine, où de plus aucune décision ne saurait être prise avant plusieurs années.

Les hydrocarbures liquides -

Le pétrole sous diversesformes est stocké avec une obligation pour les sociétés pétrolières de trois mois de réserve. Le stockage de Manosque, d'une capacité de 7,5 millions de m3 a été largement utilisé ces deux dernières années.

Mais en fait la part du pétrole dans nos sources d'approvisionnement en énergie ne cessera pas de décroître dans les prochaines années : 117 M tep en 1973, 108 en 1979 et 70 à 80 M tep estimé pour 1990. Le poids relatif passera de 67 % en 1973 à moins de 30 % en 1990. Le développement des stockages stratégiques est donc peu vraisemblable. Sauf à doubler les réserves en en fixant le niveau à 6 mois de consommation. Cette hypothèse est intéressante dans le contexte d'une situation internationale très tendue mais elle oblige à des immobilisations coûteuses. De toute façon le gisement de Manosque semble suffisamment grand pour doubler la capacité actuelle.

Un autre type de stockages d'hydrocarbures liquides pourrait se développer, les petits stockages tactiques de produits tels l'éthylène, le propylène ou le G.P.L. Il en existe déjà : le Grand Serre (Bassin de Valence), Viriat (Bassin de la Bresse). Bien que la taille modeste (20 à 50 000 m3) ils pourraient entrer en compétition avec le gaz du point de vue de l'utilisation des gisements.

Le gaz naturel -

Le problème du Gaz de France est clair : il stocke en souterrain son gaz, pour assurer l'approvisionnement continu de ses clients. La capacité actuelle représente environ deux mois moyens de consommation, la part du sel s'élevant à 5 %. L'incertitude du maintien de nos approvisionnements (pays en conflits tels l'Iran et l'Irak,...) ayant contribué à réduire l'importance du pétrole, les autres sources d'énergie verront leur poids s'accroitre ; le gaz naturel en seconde place derrière l'électricité d'origine nucléaire. Les mêmes estimations évoquées plus haut donnent les chiffres suivants :

	1973	1979	1990
Gaz naturel	15 Mtep	23 Mtep	37 Mtep
	8,5 %	12,2 %	15 %

En une dizaine d'années l'augmentation *en volume* est supérieure à 50 %. Pour simplement maintenir les réserves actuelles il faudra accroitre dans des proportions analogues (+50 %) la capacité de stockage. Quelques incertitudes existent tout de même (il faut souligner ici que la France importe 75 % de son gaz !) :

- au plan politique les négociations avec l'Algérie sont difficiles ; d'autre part le projet de contrat avec les Soviétiques pose le problème d'une éventuelle contremodulation (la France est au bout de la chaîne d'approvisionnement).

- la chaîne GNL (gaz naturel liquéfié) n'a pas encore démontré toute sa fiabilité, en particulier pour l'usine de liquéfaction.

Mais a-t-on le choix ? le pétrole étant progressivement écarté les trois sources majeures seront le charbon, l'électricité d'origine nucléaire et le gaz. Il s'agit donc bien d'une priorité.

L'alternative en matière de stockage se situe entre l'aquifère et le sel ; le nombre de nouvelles structures aptes au stock en aquifère ne cesse de décroître. La solution du sel est-elle inéluctable à moyen terme ? L'argumentation développée ici va en fait montrer la complémentarité de ces deux techniques.

L'aquifère est moins cher que le stockage dans le sel : 1,50 F/m3 utile contre 2,5 F/m3 à Tersanne. Cet argument est trop brutal. Le débit de pointe dispomible est plus faible ; si donc on définit un nouveau paramètre, à savoir le volume utile divisé par le débit de pointe, on obtient un nombre mesurant la durée nécessaire pour vider le stockage au débit maximum :

Aquifère : 50 jours

Sel : 17 à 23 jours

Le calcul du coût, repris avec ce nouveau paramètre, donnerait un résultat inverse au précédent.

L'utilisation de chacun d'eux est très différente :

- les gros aquifères modulent *les variations saisonnières,* et ne peuvent moduler à l'échelle de la journée car le temps de réponse exigé est trop court,

- les stockages dans le sel assurent la distribution lors des pointes hivernales, assurant par leur gros débit un approvisionnement "instantané".

Or, s'ils peuvent assurer un gros débit, les stockages dans le sel devraient pouvoir a fortiori assurer un débit plus faible. La difficulté tient au mode d'exploitation du stockage. Il fonctionne comme un poumon (et non pas avec de la saumure comme pour les hydrocarbures liquides) ; utilisée comme un aquifère, la cavité se trouvera décomprimée pendant plusieurs mois (fin novembre à fin février). La pression intérieure de la cavité restant basse, sa stabilité est mise en cause (cf I-C). Ainsi les cavités de Tersanne ont perdu 25 à 30 % de leur volume initial après seulement quelques années d'utilisation. Mais la profondeur intervient dans le critère de sécurité :

- Pour les gisements profonds (plus de 1200 à 1400 mètres) l'utilisation traditionnelle est donc la valorisation sur des pointes de 15 à 20 jours.

- En couches peu profondes (les gisements existent : Bresse, Alsace) -600 à 1000m au plus- on peut descendre très bas en pression. Les études ont donné un optimum vers 35 bars. Le stockage pourra fonctionner comme un aquifère, en modulation journalière et les problèmes de tenue de la cavité seront probablement évités, le critère proposé par P. BEREST (1981) sera toujours satisfait.

(Celui-ci indique que la différence Pression extérieure-Pression intérieure ne doit pas excéder 220 bars. A 800m le poids des terrains atteint à peine 200 bars. Mais on ne descendrait pas à la pression 0 car le coût de recompression du gaz deviendrait alors prohibitif, d'où un optimum situé vers 35 à 40 bars).

En ce qui concerne le coût des installations, il est certain que l'utilisation des stockages dans le sel comme un aquifère nécessiterait une modification du réseau de gazoducs existant. Or sa part dans les investissements est aussi grande que celles des infrastructures. Le coût global (par exemple pour le sel peu profond de la Bresse) pourrait se réveler défavorable au sel.

Cependant l'aquifère a également un sérieux handicap : il immobilise du gaz "coussin" (dont une partie est irrécupérable) nécessaire pour assurer le fonctionnement du réservoir. Ceci représente près de 50 % des investissements, et si le prix du gaz continue d'augmenter, le prix de revient en sera d'autant affecté.

Finalement ces deux outils sont complémentaires ; l'étude économique d'une *utilisation conjuguée* de ces moyens a justement démontré sa viabilité. La question n'est pas de décider pour le Gaz de France

qui n'a pas encore effectué les choix définitifs, mais il faut poser le problème, et avec le souci d'exploiter aux mieux les richesses du sous-sol, ne négliger aucun aspect. Celui du gaz naturel n'est pas mineur, la preuve en est faite.

Précisément il ne s'agit que d'un aspect : l'utilisation du sous-sol, en particulier pour le sel, met en cause plusieurs partenaires. Parmi ceux-ci l'Administration occupe une position privilégiée : attentive aux problèmes de chacun, elle donne son assentiment aux divers projets.

Quelle doit être la portée de son intervention et comment pourra-t-elle faire valoir son point de vue ? Est-elle en mesure de la faire ? La dernière partie de cet exposé essaiera de répondre à ces questions.

-B- ROLE ET MOYENS DE L'ADMINISTRATION -

La question que l'on peut se poser est celle-ci :

L'Administration a-t-elle besoin de documents comme ceux présentés ici ?
La réponse à cette interrogation renseignera évidemment sur le rôle qu'elle devra jouer.

L'exemple du gaz naturel -

L'importance au plan national du gaz naturel suggèrerait l'existence d'un organisme -tel le B.R.G.M.- lié à l'Administration qui fournirait aux sociétés (en l'occurence le Gaz de France) et à l'Administration tous les renseignements utiles.

Un tel point de vue est déraisonnable. Cet organisme n'aurait pas les moyens de "suppléer" les divers société sauf à des coûts prohibitifs. En matière de structures favorables (du type d'un aquifère) il en va de même qu'en prospection minière ; la géophysique donne des indications d'indices ou de sites mais seul un sondage renseigne précisement.

Prévoir un stockage n'est en outre pas seulement reconnaitre un bon gisement, bien adapté ; toute la partie technique (lessivage de cavité,...) ne peut se résumer à un petit rectangle hachuré ou noir selon la pureté du sel. Ainsi le département "Réservoirs Souterrains" (chez Gaz de France) situé lui-même au sein de la Direction des Etudes et Techniques Nouvelles (DETN) dispose du personnel suffisant pour assurer le meilleur choix, qui relève lui-même (ceci a été largement détaillé) de critères économiques et techniques.

La solution envisagéeserait trop bureaucratisée et trop rigide, coûteuse et inutile puisqu'effectuant un travail en double.

L'occupation du sous-sol -

De fait un domaine plus vaste est mis en cause, l'occupation du sous-sol. Avant d'aller plus loin dans cette voie, en généralisant la réponse, un exemple tiré de la présente étude mettra le problème en exergue.

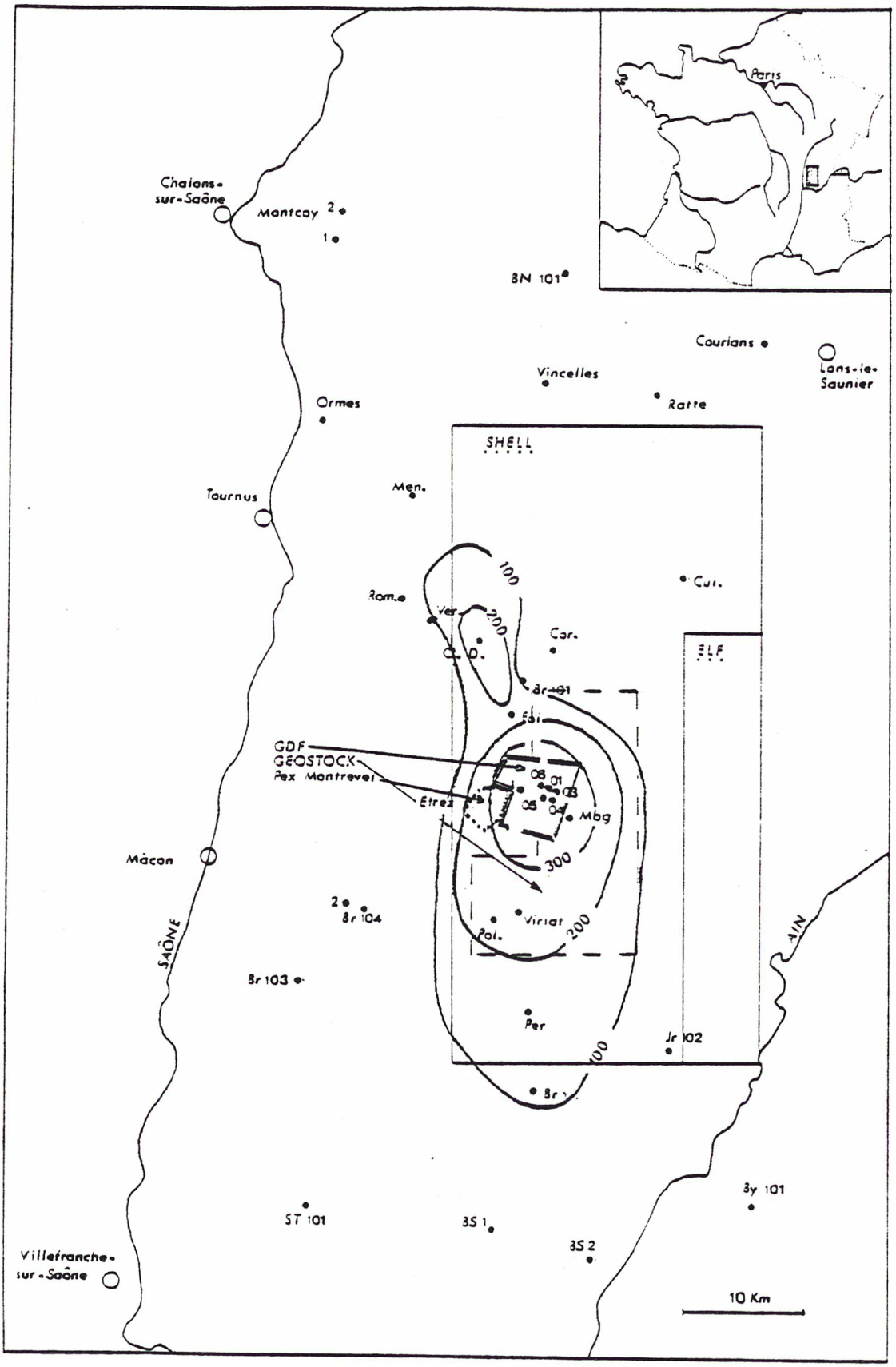


Fig 20

Le bassin de la Bresse: le gisement et les perimetres :

GDF — GEOSTOCK — Pex Montrevel (ex-C.S.M.E.)

Societes petrolieres — 100 Isopaques sel superieur (E_{1-3})

1) Le fossé bressan -

Il constitue sans doute un des plus beaux gisements de sel français (voire même le plus beau). Cette notion de beauté n'a rien à voir avec l'esthétique mais plus précisement avec la pureté du sel. Le bassin est petit : constitué de deux cuvettes allongées dans la direction Nord-Sud (fig. 20) il fait 10 à 15 km de large et 35 à 40 km de long. Le sel y est particulièrement pur (cf II, A), les insolubles sont disséminés dans la masse et leur pourcentage atteint rarement 10 %. Son épaisseur est considérable : répartie en deux niveaux séparés par une zone stérile d'environ 200m, la série supérieur (E1-3) dépasse 300 mètres et la série inférieure (E5) 200 mètres, en moyenne. Si l'on regarde de plus près la zone d'Etrez, les épaisseurs atteignent 400 mètres pour E_{1-3} et 600 mètres pour E_5. Quant aux profondeurs, le mur du niveau supérieur est à 1000m environ contre 1800m pour le niveau inférieur.

Son intérêt économique est considérable : il est situé entre Paris et Lyon, sur la route des grands pipes européens (l'Axe Rhin-Rhône) de gaz et de pétrole, enfin à proximité de consommateurs de saumures (Tavaux et Pont de Claix).

Toutes ces qualités justifient l'attrait puissant exercé par ce gisement : si l'on examine la situation des divers périmètres on s'aperçoit de sa complexité.

Faisons un rapide historique des titres miniers et de stockage :

- le gaz de France a déposé le 21 août 1971 une demande tendant à obtenir une autorisation de recherche de formations souterraines aptes au stockage de Gaz sur Etrez,

- la société Géostock a fait de même le 01 mars 1972 (stockage d'hydrocarbures) sur Marboz. Les deux périmètres se recouvraient ; pour éviter d'éventuelles difficultés, une "zone de sécurité" a été adoptée sur les recommandations de l'arrondissement minéralogique de Lyon. Les périmètres (stockage et protection) ont été placés à 375 mètres de part et d'autre de la limite de mitoyenneté.

- a l'Ouest, bordant le périmètre de Gaz de France, le permis d'exploitation de mine de sel de Montrevel (C.S.M.E.) retiré le 29 décembre 1975 pour inactivité. La société Solvay a alors contacté l'arrondissement minéralogique de Lyon afin de demander un permis d'exploitation de mines. Il n'a pas été donné une suite favorable à la demande de Solvay ; ce refus peut sans doute être analysé comme une réserve faite sur l'utilisation de ce gisement, à un moment où de ce point de vue la situation apparaissait insuffisamment éclaircie.

- enfin les périmètres d'Etrez et Marboz sont entièrement situés à l'intérieur du périmètre exclusif de recherche de mines d'hydrocarbures de "Bourg en Bresse". Sa demande a été déposée le 16 avril 1975 par la Société SHELL Française. (Elle a par ailleurs provoqué le dépôt d'une demande concurrente, le 05 août 1975 par la Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine (SNEA(P)). Compte tenu de l'antériorité des travaux du Gaz de France, les observations faites par le Gaz de France ont été retenues (l'exploitation du stockage n'est pas incompatible avec la recherche d'hydrocarbures, mais elle le serait avec une implantation anarchique des ouvrages pétroliers) : à savoir contact préalable entre les deux opérateurs et coordination de toute opération située sur le périmètre d'Etrez.

Enfin Gaz de France et Solvay ont construit en commun un saumoduc (80 km environ) d'Etrez à Poligny. Solvay utilise ainsi la saumure fatale de lessivage ; elle est saturée à Poligny (dans du sel d'âge Keuper) avant d'être envoyée à l'usine chimique de Tavaux par un saumoduc de 10 km de long construit par Solvay.

Sans y mettre aucune conotation péjorative, on voit clairement que ce gisement intéresse beaucoup de personnes. Si le Service des Mines (arrondissements de Lyon et Dijon) doit donner sa avis (par exemple pour le Pex de Montrevel, sur quelles données géologiques va-t-il s'appuyer ? Ainsi en 1976 un permis fut-il refusé. Sans mettre en cause la décision, celle-ci, fondée sur des documents comme ceux présentés ici, aurait sans doute un poids plus grand.

2) Les grands thèmes -

Cet exemple montre bien ce que seront -peut être- les problèmes de l'occupation du sous-sol dans quelques années. Cette question est chère à M. DUFFAUT et c'est lui que je citerai avant d'en tirer les conséquences :

" En souterrain, tout projet doit être défini avec plus de soin qu'à la surface, car toute modification ultérieure, tout agrandissement, y serait beaucoup plus difficile. En vérité, rien ne peut y jouer le rôle de la démolition et il est toujours impossible de rétablir le terrain dans son état initial.

Comme les conditions géologiques ne permettent d'implanter des grandes excavations souterraines qu'en un nombre limité de sites (à l'exception de quelques régions favorisées en ce domaine), ce sont les meilleurs sites qui constituent la ressource la plus précieuse, au niveau national ou même au niveau de plusieurs nations, au même titre que les gisements de combustibles minéraux et les corps minéralisés ; comme ces corps et gisements, les sites ca-

pables de grandes cavités souterraines ont un caractère exceptionnel. Leur rareté justifie une politique de recherche, d'inventaire et de réservation. S'il s'agit par exemple de cavités destinées au stockage, de tels sites pourraient être appelés gîtes de stockage (en anglais store-bodies, construit sur le modèle de ore-bodies, que désigne les gîtes de minerais)."

(DUFFAUT, 1978)

et dans le même texte :

"Les problèmes de coexistence entre utilisateurs du sous-sol ne sont pas limités à l'espace souterrain urbain. Pour chaque type d'usage le concept de site favorable doit être défini. Comme les meilleurs sites sont en nombre limités, notamment pour les plus grands volumes, il est souhaitable de les inventorier, de les réserver et de les protéger par une législation appropriée."

Cette idée de plans d'occupation du sous-sol (P.O.S.S) par analogie avec les plans d'occupation du sol est très attrayante. Malheureusement ce projet est beaucoup plus difficile à mettre en oeuvre : l'information est beaucoup moins accessible à cause de "l'opacité" propre au domaine du souterrain.

En outre le coût d'une telle entreprise serait considérable : L'Administration n'a ni les moyens financiers ou en personnels pour la mener à bien. Et bien souvent il s'agirait d'un travail inutile car redoublant diverses études des sociétés.

Une carte du sel pour l'Administration -

L'idée de cet inventaire des "meilleurs sites" se concrétise avec les documents (même partiels) faisant l'objet de ce texte. Ils pourraient aider l'Administration lors de prises de décision, comme par exemple en Bresse.

Mais ce qui est important, voir fondamental, c'est qu'elle les "fabrique" elle-même, pour son propre compte. On peut très bien imaginer les situations où l'Administration a besoin de renseignements géologiques pour approuver ou refuser une demande de permis minier : que fait-elle faute d'avoir ses propres documents ? Elle se tourne vers le B.R.G.M. Malheureusement dans le cas

du sel, il ne dispose pas de documents. L'étude la plus récente est celle déjà citée, d'un atlas européen en 9 tomes, sur le problème des déchets nucléaires. Le sel n'y occupe de toute façon qu'une place mineure.

L'Administration peut avoir le souci de posséder ses propres synthèses (que les sociétés n'éprouvent pas le besoin d'effectuer car elles sont intéressées par un site précis) pour pouvoir juger du point de vue de l'intérêt général dont elle seule est comptable, en particulier en matière de sécurité et d'environnement mais aussi de gaspillage des richesses naturelles.

Et bien qu'elle n'ait pas les moyens d'un suivi systématique, elle doit, lorsque certaines situations sont "critiques", (comme celle du sel aujourd'hui), pouvoir se doter des moyens d'une politique d'ensemble.

Ainsi les problèmes posés par le sel sont multiples : on l'exploite en mine, on fabrique de la saumure, on creuse des cavités, on jette du sel dans le Rhin (deux fois la consommation française), on poursuit une exploitation difficile car située à grande profondeur (Vauvert), on paye pour être débarrassé de sa saumure (Tersanne)...

Pour pouvoir définir une politique globale, l'Administration devra avoir sa propre documentation comprenant entre autres choses un solide inventaire du sel au niveau national. Une bonne gestion du sous-sol ne pourrait admettre que le décideur soit à la fois juge et partie : sans ses dossiers l'Administration sera réduite à des décisions par "oui" ou par "non" sans pouvoir juger vraiment au fond du sujet.

Le point suivant est délicat : établir des documents nécessite de rassembler des informations. Cette étude aura montré l'importance de cet aspect : d'aucun considérerait que le côté géologique n'est qu'une pure question de technique, de routine presque. Puis la décision sera prise par le service compétent certes, mais déconnecté du circuit de recherche.

De fait la tâche qui s'offre à l'Administration est loin d'être évidente. Même si à son seul nom s'ouvrent -presque toujours- les portes, encore faut-il savoir que ces portes existent ! Dans un domaine aussi vaste que la géologie, les contacts entre l'Administration et la recherche sous toutes ses formes (Universités, CNRS, BRGM,...) sont absolument indispensables ; ils l'assurent des connaissances les plus récentes.

Au fond, le but n'est pas de prendre une décision juste ou injuste, partiale ou impartiale, mais c'est bien de choisir la meilleure, compte tenu de tous les impératifs, y compris celui de la Technique. Pour y parvenir, tous les moyens sont bon, mais le meilleur consiste quand même à regarder soi-même.

CONCLUSION

Une exploitation rationnelle du sel en France implique la définition d'une politique globale ; les difficultés actuelles sont de deux natures :

- dans le domaine de la sécurité et de la préservation de l'environnement les problèmes sont encore mal (ou partiellement) résolus : choix des méthodes d'exploitation en Lorraine (mines, pistes ou cavités), la stabilité des cavités profondes (Tersanne) et dans l'avenir, la sécurité des stockages géologiques dans le sel.

- dans l'utilisation optimale du sous-sol et des ressources naturelles : il règne, *à première vue* sinon un gaspillage, du moins une certaine anarchie ; ce désordre deviendrait très grave s'il conduisait à stériliser les meilleurs gisements par des utilisations insuffisamment valorisantes.

Seule l'Administration peut prendre en charge une tâche aussi complexe :

- De fait, elle veille déjà à la sécurité des installations et se préoccupe déjà des stockages géologiques (déchets nucléaires) par un travail concerté au niveau européen.

- L'impression d'apparente anarchie qui ressort d'un examen superficiel est à tempérer : chaque opérateur individuel tente d'optimiser -ambition légitime- sa situation. Dès lors, si une politique globale s'avère nécessaire, elle seule est susceptible de la mettre en oeuvre.

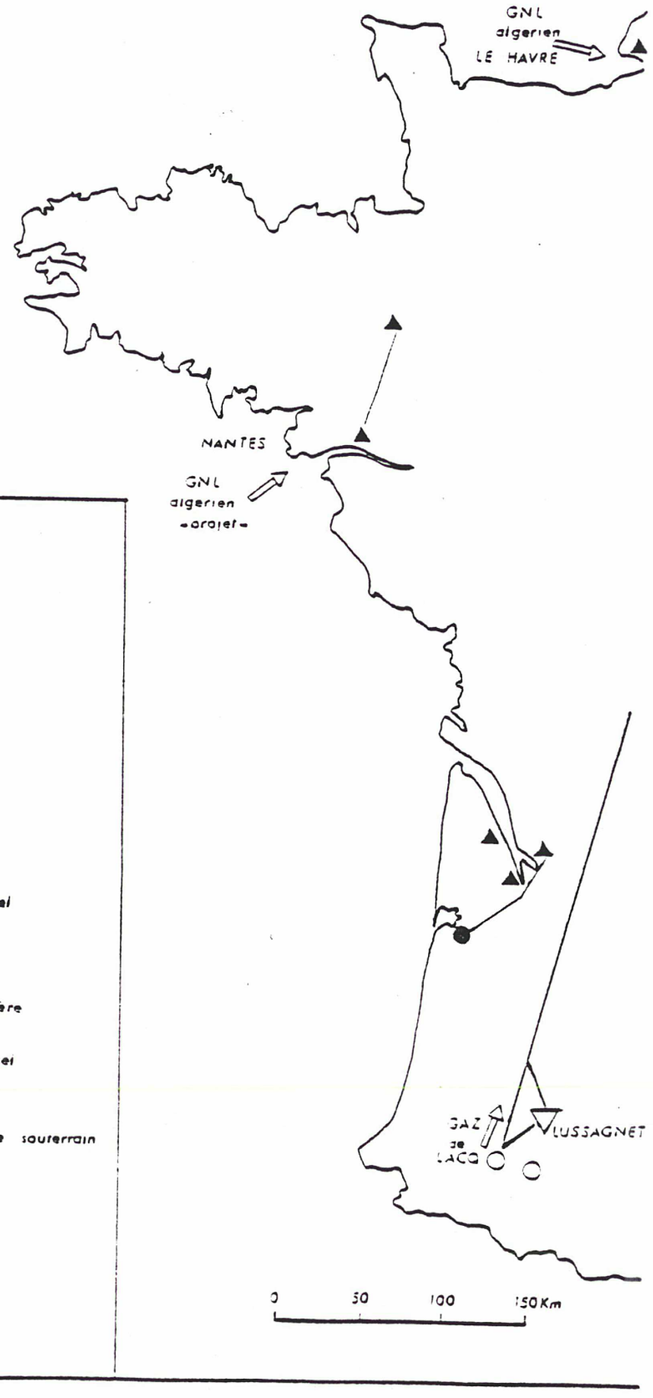
Je n'ai pas eu l'ambition de définir cette politique globale ; mais pour savoir si elle est nécessaire, il faut rassembler des informations de qualité. Cela a été l'objet de ce travail, en réunissant les premiers éléments techniques indispensables.

Une carte synthétise (fig. 21) les données économiques (terminaux pétroliers, raffineries, pipes, mais aussi les diverses exploitations salinières) et les sites potentiels susceptibles d'accueillir des stockages : leur tracé résulte de la triple intersection des critères, épaisseur supérieure à 100 mètres, pourcentage d'insolubles inférieur à 20 % et profondeur n'excédant pas 1600 mètres. On remarquera leur proximité des grands réseaux de distribution de gaz ou de pétrole.

Ce document est très imparfait : le Sud-Ouest par exemple n'a pas été abordé. Le recueil de l'information géologique est donc à poursuivre ; cette information est précisément souvent disponible mais méconnue.

On peut penser à d'autres idées, comme par exemple l'organisation d'un colloque réunissant géologues-exploitants-stockeurs sur les ressources françaises. Utile pour l'administration, il serait l'occasion donnée aux sociétés françaises (GDF, Géostock, MDPA...) de faire connaitre leurs techniques.

SITES DE STOCKAGE ET ENVIRONNEMENT ECONOMIQUE



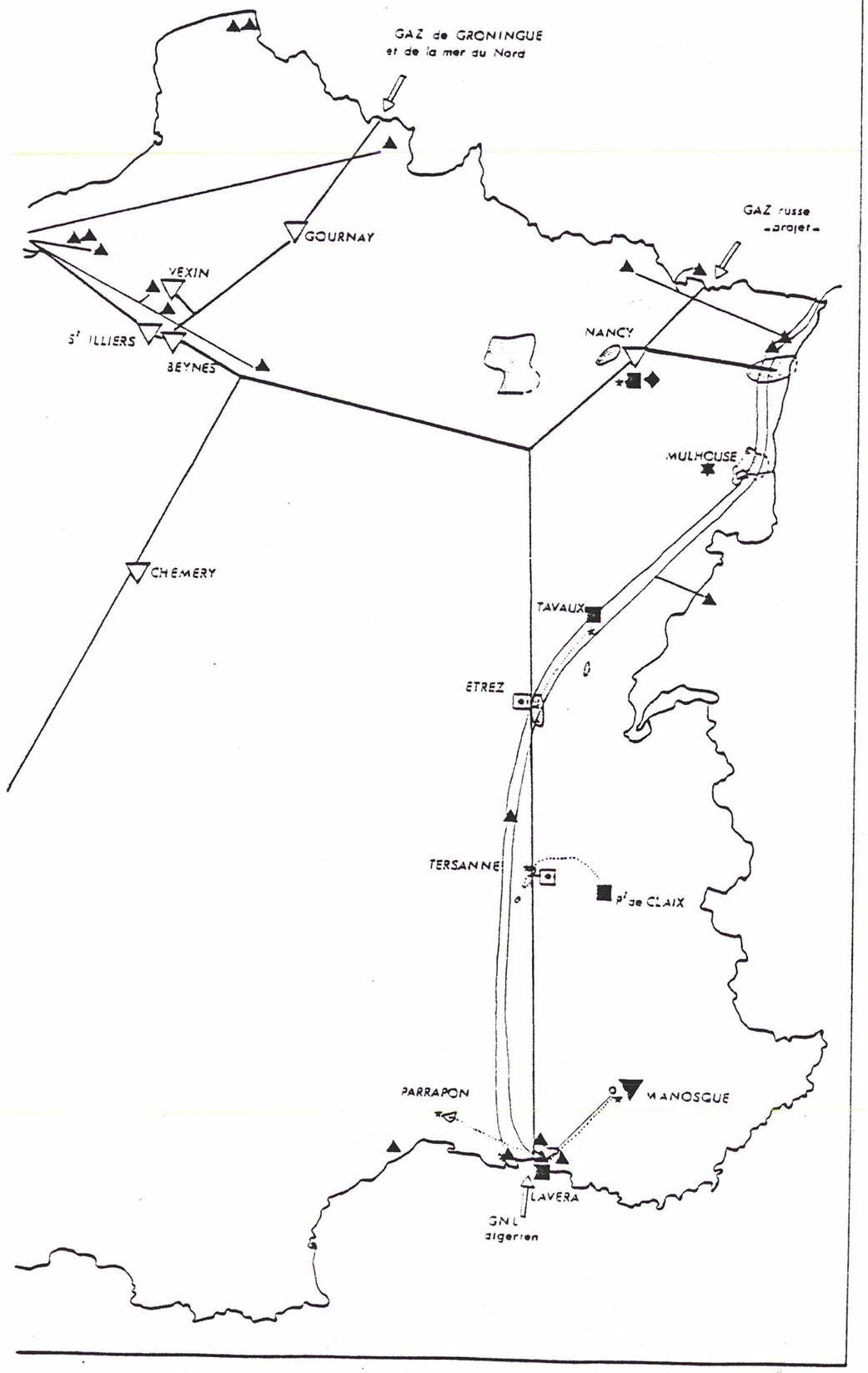


Fig 21

- Pipeline de petrole
- Pipeline de gaz naturel
- Saumoduc
- Gisement de petrole
- Raffinerie
- Stockage de brut dans le sel
- Gisement de gaz naturel
- Stockage de gaz en aquifère
- Stockage de gaz dans le sel
- Zone favorable au stockage souterrain dans le sel
- Production de saumure
- Industries chimiques
- Mine de sel gemme
- Mine de Potasse

TABLE DES MATIERES

Avant-propos p 1

Résumé p 3

Introduction p 5

I Divers aspects de la matière première "sel" p 7

-A- Géologie du sel

- Introduction p 9
- Répartition p 15
- L'halokinèse p 17

-B- Production, débouchés : le marché du sel

- Techniques de production et débouchés p 21
- Les données économiques p 23

-C- Les stockages dans le sel

- Les utilisations actuelles p 27
- Les techniques de lessivage p 31

II La situation actuelle p 35

-A- Inventaire des sites salifères susceptibles d'exploitation

- Les critères de jugement p 38
- Les différents bassins p 41

-B- Les différents partenaires

- Les producteurs de sel p 69
- Les stockeurs p 71
- L'Administration p 72

ANNEXES :

1 Géologie du sel

-A- Quatre modèles de bassins évaporitiques pA1

- La sebkha pA1
- La barre pA5
- Le sel profond pA9
- La tectonique globale pA11

-B- Evaluation de la taille d'un dôme de sel pA15

2 Création et exploitation des cavités de sel

-A- Schéma de création de cavité par lessivage pA19

-B- Le problème des insolubles pA19

-C- Le régime des pressions pA23

-D- Les inclusions fluides dans le sel et les déchets nucléaires pA27

3 Deux gisements oligocènes

-A- Le gisement de Vauvert pA29

-B- Le bassin de Manosque pA31

BIBLIOGRAPHIE

ABOUAF M, LEGAIT B (1978) - Les différentes utilisations du sel souterrain et leurs conséquences à long terme. (Dossier long, ENSMP).

BAUER J (1974) - Evaporites de rift. Revue de Géog. Phys. et Géol. Dyn. n° spécial Evaporites pp 209-234.

BEN ISMAÏL M (1980) - L'Oligocène salifère alsacien : quelques données générales fournies par les diagraphies et brèves synthèses bibliographiques. DEA de Sédimentologie Univ. Paris 6.

BEREST P (1981) - Stabilité des cavités de stockage d'hydrocarubres dans le sel. Données de l'expérience internationale. Revue française de géotechnique (à paraître).

BEREST P, LEDOUX E, LEGAIT B, DE MARSILY G (1979) - Effets thermiques dans les cavités en couche salifère. 4ème Congrès de la Soc. Int. de Mécanique des Roches. Montreux, Suisse.

BERTRAND J.P., JELISEJEFF A (1974) - Formation d'évaporites par des processus d'évaporation capillaires. Revue de Géog. Phys. et Géol. Dyn. n° spécial Evaporites pp 161-170.

BILLET J (1980) - Situation et évolution de l'industrie de la potasse. Industrie Minérale vol. 62 n° 5 pp 329-332.

BISHOP R (1978) - Mécanism for emplacement of piercement diapirs. A.A.P.G. vol. 62,9 pp 1561-1583.

BORCHERT H, MUIR R (1964) - Salt deposits. Van Norstrand Company. The University serie in Geology, LONDON.

BUSSON G (1968) - La sédimentation des évaporites. Mem. Mus. Nat. Hist. Nat. Série C, tome 19, fasc. 3 pp 125-169.

BUSSON G (1974) - Sur les évaporites marines : sites actuels ou récents de dépôts d'évaporites et leur transposition dans les séries du passé. Revue de Géog. Phys. et Géol. Dyn. n° spécial Evaporites pp 189-208.

COURTOT C, GANNAT E, WENDLING E (1972) - Le bassin potassique de Mulhouse et ses environs. Etude du Tertiaire. Sci. Géol. Bull. n° 25 2-3 pp 69-91, Strasbourg.

DUFFAUT P (1977) - Site reservation policies for large underground openings. Proc. Int. Symposium Rockstore, Pergamon Press.

DUFFAUT P., BREGEON J. (1981) - La variante souterraine comme solution aux problèmes d'environnements. Journées Géotechniques de Nantes, Ecole des Ponts et Chaussées.

FONTES J.C. (1974) - Echange de vue sur quelques aspects des évaporites. Revue de Géog. Phys. et Géol. Dyn. n° spécial Evaporites pp 147-150.

GANNAT E, MERIAUX M (1980) - Connaissances actuelles sur la potasse en France. Ann. Mines juillet-août pp 167-176.

GEORGES B (1976) - Le sel : exploitation par dissolution. Ind. Minérale nov. pp 219-226.

GERMAIN C.Y. (1980) - Les roches et le stockage souterrain. Bull. Cent. Rech. Prod. Elf Aquitaine n° 4 pp 479-493.

GOGUEL J (1948) - Memoires pour servir à l'explication de la carte détaillée de la France. Introduction à l'étude mécanique des déformations de l'écorce terrestre. Imp. Nationale, Paris 2ème édition. chap. 20, pp 359-372.

GOY G, BUSSON G (1980) - Inventaire des évaporites du sous-sol : les bassins profonds du Trias du Sud-Est français, du Paléogène de la Bresse et de Valence. Action concertée "valorisation du sous-sol" Mus. Nat. Hist Nat., DGRST.

LOTZE F (1957) - Sel gemme et sel de potasse. 3 fasc. BRGM, Paris.

MARCHAL C inédit - documents à paraître (*).

MARTINEZ J.D., THOMS R.L. (1976) - Salt Dome. Utilization and Environmental considerations. Symposiumheld at Louisiana State University, nov. 22-24.

MAUBEUGE P.L. (1962) - Le bassin salifère lorrain Nancy.

PERRODON A.(1968) - Introduction à la géologie des évaporites. Revue Ass. Fr. Tech. Pét. n° 190, pp 21-23.

PERTHUISOT J.P. (1974) - Les dépôts salins de la Sebkha el Melah de Zarzis. Revue de Géog. Phys. et Géol. Dyn. n° spécial Evaporites, pp 177-188

PERTHUISOT J.P. (1979) - La Sebkha el Melah de Zarzis : bassin paralique actuel (TUNISIE). Dépôts évaporitiques. Illustration et interprétation de quelques séquences. Technip pp 11-17.

PERTHUISOT V.(1972) - Evolution structurale d'un diapir tunisien : le Djebel Ech. Cheid. Revue de Géog. Phys. et Géol. Dyn. vol 14 n° 2, pp 145-152.

REYRE D.(1958) - A propos de tectonique du sel. Bull. Ass. Fr. Tech. Pét. n° 132, pp 571-578.

RICOUR J.(1962) - Contribution à une révision du Trias français Mem. Carte Géol. de France.

ROUX CH. B., NININ M (1976) - Le stockage souterrain du gaz naturel Ind. Minérale nov. pp 211-217.

RUGGIERI G, SPROVIERI R.(1976) - The "dessication theory" and its evidences in Italy and in Sicily. Messinian Evaporites in the Mediterranean. Mem. Soc. Geol. Italiana. vol 16, pp 165-169.

SITTLER C.(1965) - Le Paléogène des fossés rhénans et rhodaniens. Etudes sédimentologiques et paléoclimatiques. Mem. Ser. Carte. Géol. Alsace Lorraine n° 24

STRURANI C. (1976) - Messinian facies in the Piedmont basin. Messinian Evaporites in the Mediterranean. Mem. Sec. Geol.Italiana vol 16, pp 11-25.

THOMAS J.(1972) - Problèmes posés par les résidus salins des mines de potasse d'Alsace. Ind. Minéral vol 54 n° 6, pp 288-294.

(*) Je remercie vivement C. MARCHAL, Professeur Agregé au L.T.E. H. LORITZ Nancy (section Techniciens supérieurs, Géologue-Prospecteur). Laboratoire de Sédimentologie, Université de Nancy, d'avoir mis à ma disposition plusieurs de ses documents inédits sur le Bassin de Paris, établis dans le cadre de ses travaux de thèse de Doctorat d'Etat.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - La séquence évaporitique type (extrait de Perrodon 1968, fig. 5) p10

Figure 2 a- La série de l'Albien du Bassin du Congo (id.) p10
b- Le Zechstein de l'Allemagne du Nord(id.) p10

Tableau 1 - Principaux bassins salifères paléozoïques p12

Tableau 2 - Principaux bassins salifères postpaléozoïques p13

Figure 3 - Répartition spatiale des dépôts évaporitiques depuis l'ère primaire (extrait de BORCHER et MUIR 1964,fig3.1) p14

a- Cambrien
b- Siluro-Dévonien
c- Permo-Trias
d- Paléogène
e- Holocène

Figure 4 - Données expérimentales sur l'évaporation de l'eau de mer (Mer Méditerrannée) d'après USIGLIO (extrait de BUSSON 1974, fig. 4) p16

Figure 5 - Un dôme de sel type (extrait de Martinez et Thoms, 1976, fig. 10) p18

figure 6 - Intrusions diapiriques d'évaporites miocènes dans des sédiments tertiaires variés (Oligocène à Pliocène) (extrait de BORCHERT et MUIR 1964, fig. 20.7) p18

Tableau 3 - Production de sel des 6 dernières années (en milliers de tonnes) p24

Tableau 4 - Consommation de sel des 6 dernières années (en milliers de tonnes). (le sel cristallisé uniquement). p24

Tableau 5 - Evolution relative des divers débouchés du sel entre 1974 et 1979 p 25

Tableau 6 - Valorisation du sel cristallisé p 25

Tableau 7 - Les stockages de gaz en France p 30

Figure 7 - Lessivage d'une cavité dans le sel p 32

a- méthode "indirecte"
b- méthode "directe"

Figure 8 - L'influence des insolubles sur la forme des cavités (extrait de BEREST 1981, fig. 1b et 1a) p 32

a- une cavité à TERSANNE (Gaz de France)
b- une cavité aux Etats-Unis

Figure 9 - Extrait du log fondamental (à l'échelle du 1/2000e) du sondage d'Ancerville effectué en 1954. (source : SCG) p 40

Figure 10 - Le bassin du Sud-Est : le Trias salifère p 42-43

Figure 11 - Le bassin du Sud-Est : le sel oligocène p 44-45

a- les bassins méridioniaux
b- emplacement du bassin de Valence

Figure 12 - Le bassin de Valence : p 46-47

a- schéma structural
b- le sel "inférieur"
c- le sel "supérieur"
d- le sel chattien

Figure 13 - Le bassin du Jura :

a- le sel du Muschelkalk p 50
b- le sel du Keuper p 51

Figure 14 - Le bassin de la Bresse :

a- le sel "inférieur" p 52
b- le sel "supérieur" p 53

Figure 15 - Le fossé rhénan : les bassins salifères tertiaires (extrait de GANNAT et MERIAUX 1980, fig. 3) p54

Figure 16 - Le bassin de Mulhouse :

a- Le Complexe Salin p56
b- L'Ensemble Salifère p56
c- Le Faisceau Salin p57
d- Le Grand Banc de Sel p57

Figure 17 - Le bassin de Strasbourg : le Grand Banc de Sel p58

Figure 18 - Le bassin de Paris

a- le sel du Keuper (I) p60-61
b- le sel du Keuper (II) p62-63

Figure 19 - Les gisements de sel français p66-67

Tableau 8 - Evolution de l'écart (consommation-production) depuis 1974 p76

Figure 20 - Le bassin de la Bresse : le gisement et les périmètres p84

Figure 21 - Sites de stockage et environnement économique. p92-93

ANNEXE 1 :

Figure A1 - La sebkha de la Côte des Pirates : plan de situation (en traits obliques : aire approximative des dépôts carbonatés récents de la zone supratidale). (extrait de BERTRAND et JELISEJEFF 1974, fig. 1) pA2

Figure A2 - La sebkha de la Côte des Pirates : profil longitudinal schématique (id.) pA2

Figure A3 - Un cycle régressif de sédimentation avec surimposition d'évaporites de sebkha précocement diagénétiques (extrait de BUSSON 1974, fig. 1) pA3

Figure A4 - L'évolution diagénétiques des minéraux et des saumures dans les sebkhas carbonatées (extrait de BUSSON 1974, fig. 2) pA3

Figure A5 - Localisation géographique de la Sebkha el Melah de Zarzis. (extrait de PERTHUISOT 1979, fig. 4) pA4

Figure A6 - Coupe schématique du remplissage de la Sebkha el Melah (id., fig. 5) pA4

Figure A7 - Le déroulement de la sédimentation flandrienne dans la Sebkha el Melah (id., fig. 10) pA6-7

Figure A8 - Reproduction simplifiée de la carte bathymétrique de la Mer Morte (extrait de BUSSON 1974, fig. 7) pA 8

Figure A9 - Antériorité de l'intumescence crustale par rapport au rift. (extrait de BAUER 1974, fig. 3) pA12

Figure A10 - Structure de la croûte terrestre dans la région du rift rhénan, d'après les données sismiques. (d'après BAUER 1974, fig. 1-8) pA12

Figure A11 - Coupe NE-SW à travers le graben rhénan au niveau du bassin potassique de Mulhouse-Buggingen. (extrait de SITTLER 1965, fig. 50). pA13

Figure A12 - Schéma d'un dôme de sel (extrait de GOGUEL 1948, fig. 128) pA 14

ANNEXE 2 :

Figure A13 - Schéma de lessivage d'une cavité. (d'après GERMAIN 1980, fig. 1) pA 18

Figure A14 - La cavité de Kiel. (extrait de BEREST 1981, fig.1c) pA 20

Figure A15 - Le modèle simplifié de la cavité cylindrique pA 20

Figure A16 - Le lessivage par "passes" successives pA 22

a- le démarrage
b- les "passes" de lessivage

Figure A17 - Le "passage" d'un banc d'anhydrite. pA 22

Figure A18 - Un critère nécessaire de stabilité des cavités lessivées dans le sel (d'après BEREST 1981, fig.3) pA 24

Figure A19 - Influence de la température sur les contraintes exercées sur une cavité cylindrique creusée dans le sel. pA 26

ANNEXE 3 :

Figure A20 - Coupe NNW-SSE du gisement de Vauvert. (d'après GEORGES, communication orale) pA 28

Figure A21 - Les fractures dans le sel à Vauvert pA 28

Figure A22 - Coupe NW-SE du bassin de Manosque (d'après Géostock, in ABOUAF et LEGAIT 1978, fig. 5) pA 30

ANNEXES

ANNEXE 1 : GEOLOGIE DU SEL

- A - Quatre modèles de bassins évaporitiques

Suivant une classification proposée par M. BUSSON (1974) trois exemples feront précisement intervenir la notion de tranche d'eau (depuis une valeur faible voire nulle jusqu'au sel "profond"). Une autre approche, celle de la tectonique, sera illustrée par le dernier modèle.

- La sebkha (d'après BERTRAND et JELISEJEFF, 1974)

Des observations assez récentes (début des années 60) ont fait état d'imprégnations interstitielles de sel, résultat de processus subaériens et d'origine diagénétique, se déroulant sur des zones cotières émergées. Ces dépôts salins ne peuvent recevoir le nom d'évaporites, car ils résultent d'une déshydratation par migration au sein d'un sédiment.

La sebkha de la Côte des Pirates (région d'Abu Dhabi au Sud-Est du golfe persique, fig.A1,2) en est un bon exemple. La sebkha désigne une plaine côtière qui se forme aux dépens du domaine marin, sous l'action des vents et des vagues qui portent sur le rivage une partie des sédiments actuels. Aujourd'hui elle est longue de 300 km et large de 20 ; elle domine de 0,50 à 1 mètre le niveau des hautes marées. Son nom de sebkha est dû à la présence d'une crôute saline superficielle.

L'évolution du sédiment au-dessus et au-dessous du niveau hydrostatique est l'élément fondamental. Au-dessous se forme des tapis algaires d'une dizaine de centimètres d'épaisseur ; ils s'étendent jusqu'à une largeur de 1 km environ, correspondant (en hauteur) à l'écart entre le niveau des marées moyennes et des plus fortes marées de printemps. Ces tapis algaires reposent sur un substratum composé de sédiments à faciès marin : boues lagunaires, galets de ces boues.

Au-dessus et à l'amont se trouvent tous les sédiments supratidaux : les boues précédentes rejetées sur la sebkha lors des tempêtes ; du matériel carbonaté marin récent, très divers comme débris de coquilles, oolithes etc. C'est au sein de ces sédiments que cristallisent les minéraux de diagénèse précoce.

Sur le schéma (fig. 3), on voit l'importance de l'anhydrite tandis que les ions Cl^-, Na^+, K^+ ne semblent pas s'exprimer. La concentration de la solution n'a -il est vrai- guère augmenté et de plus le sel gemme se dépose en une fine couche superficielle très sensible à l'action du vent. (Il est possible qu'après enfouissement, les saumures résiduelles migrent vers le haut, en abandonnant de grandes épaisseurs de sel - in BUSSON, 1974, D.J. SHEARMAN, 1965-66).
En fait les ions Cl^-, Na^+ et K^+ n'ont subi qu'une concentration par rapport à leur teneur dans l'eau de mer et les saumures résiduelles dites "chlorurées-calciques" (enrichissement en ions Ca^{++} et Cl^-) pourront alimenter la formation de sel gemme ou de sylvine (fig 4).

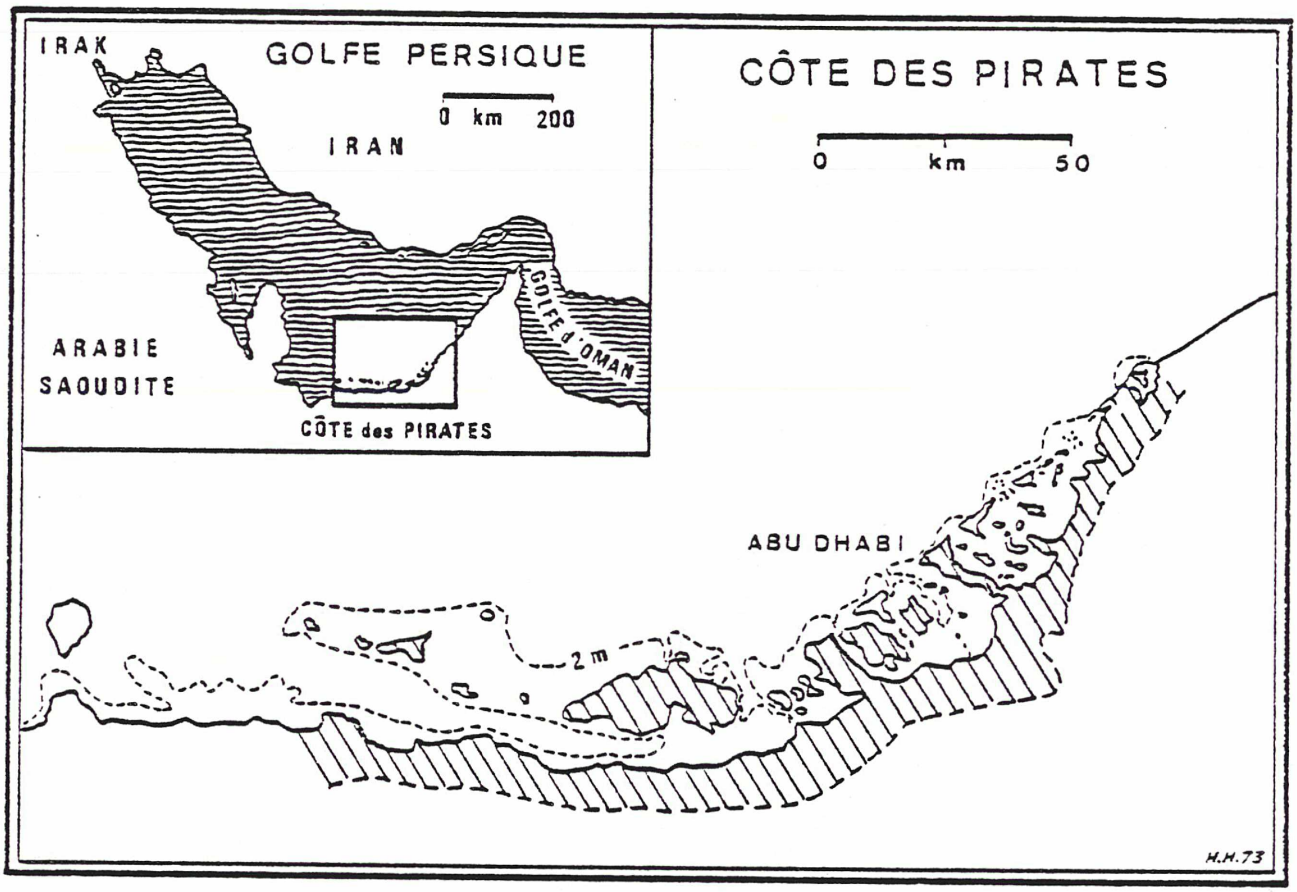


Fig. A1 - La sebkha de la Côte des Pirates : plan de situation. (En traits obliques : aire approximative des dépôts carbonatés récents de la zone supratidale). (extrait de BERTRAND et JELISEJEFF 1974, fig. 1)

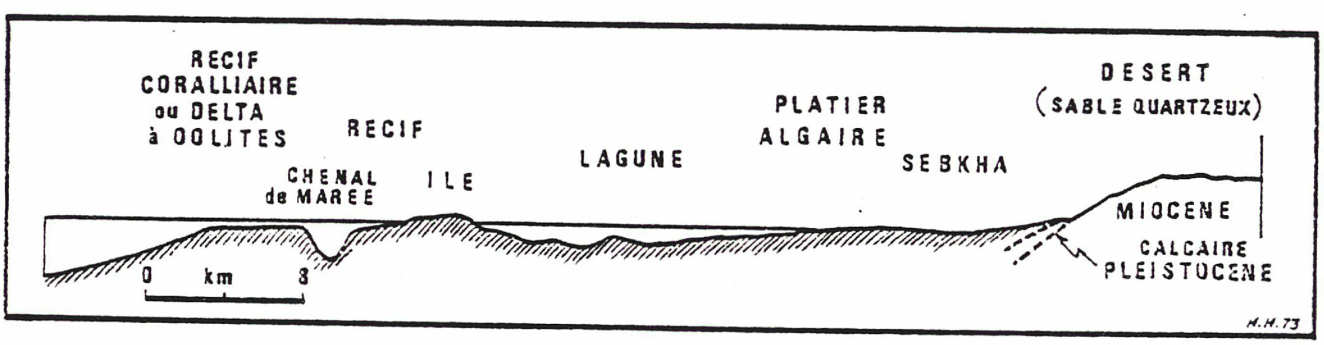


Fig. A2 - La sebkha de la Côte des Pirates : profil longitudinal schamétique (id.)

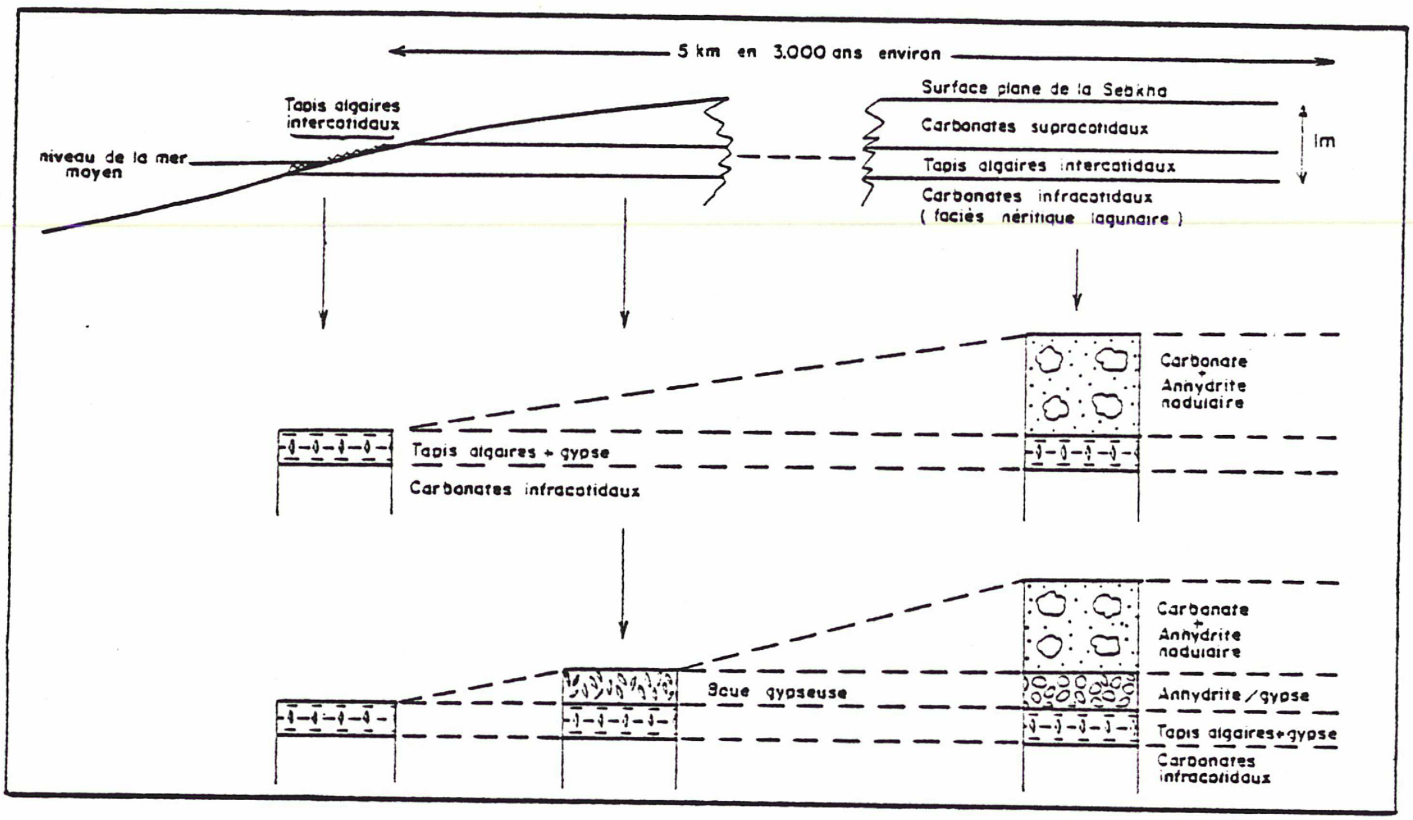


Fig. A3 - Un cycle régressif de sédimentation avec surimposition d'évaporites de sebkha précocement diagénétiques (extrait de BUSSON 1974, fig. 1)

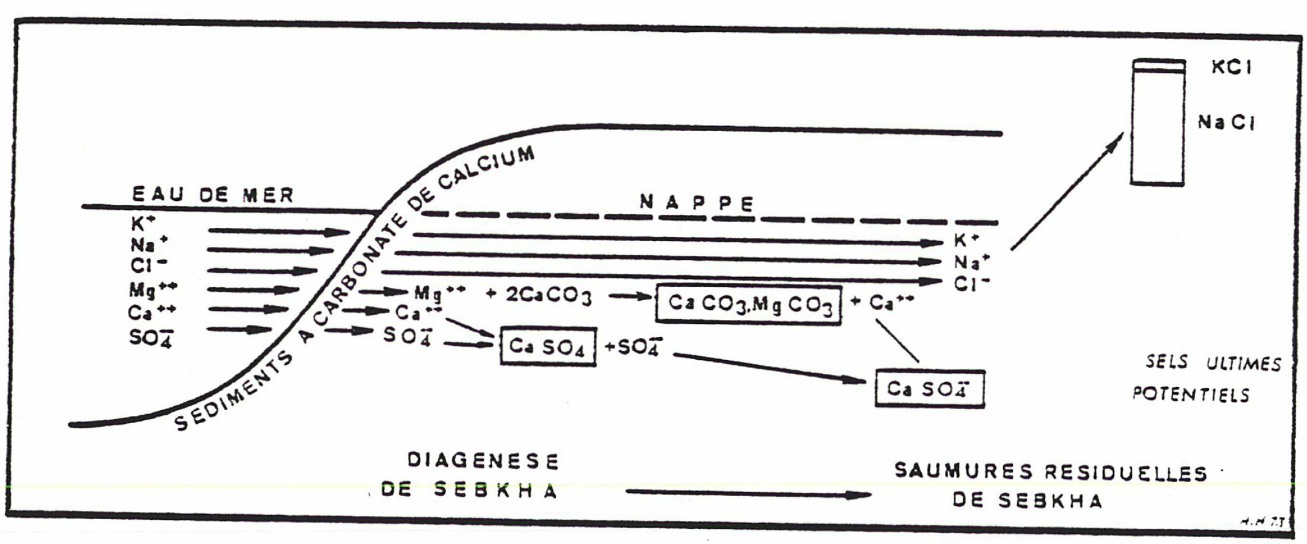


Fig. A4 - L'évolution diagénétique des minéraux et des saumures dans les sebkhas carbonatées (extrait de BUSSON 1974, fig. 2)

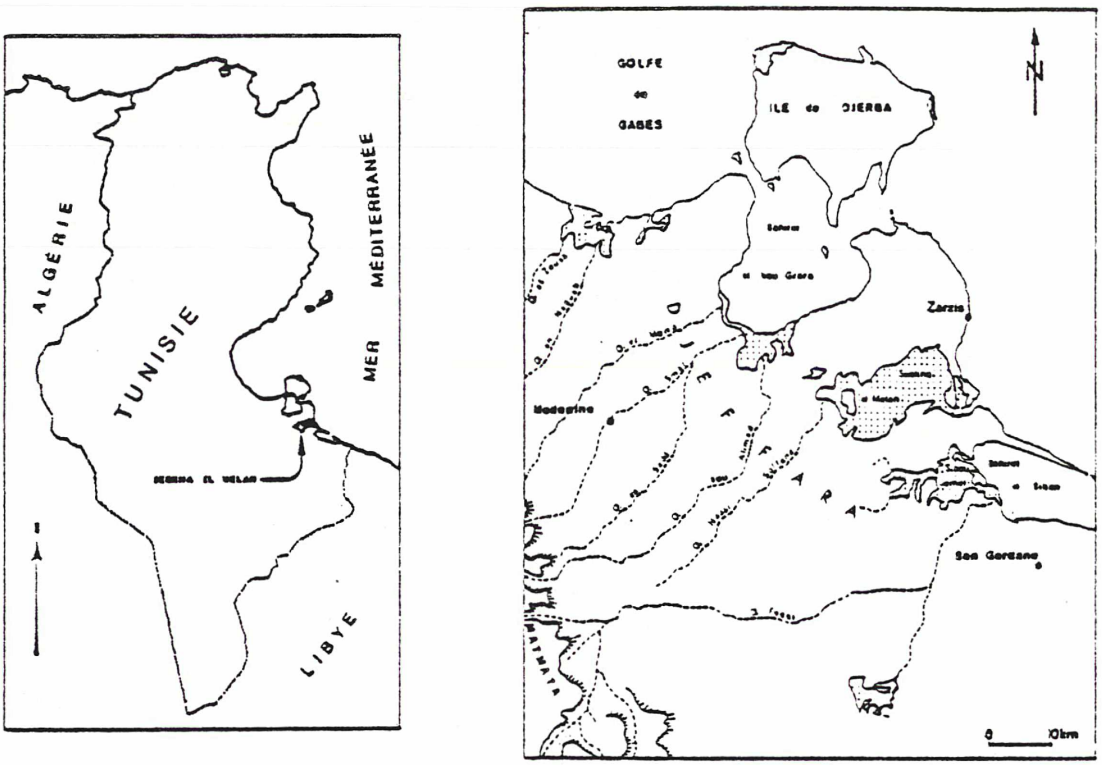


Fig. A5 - Localisation géographique de la Sebkha el Melah de Zarzis (extrait de PERTHUISOT 1979, fig. 4)

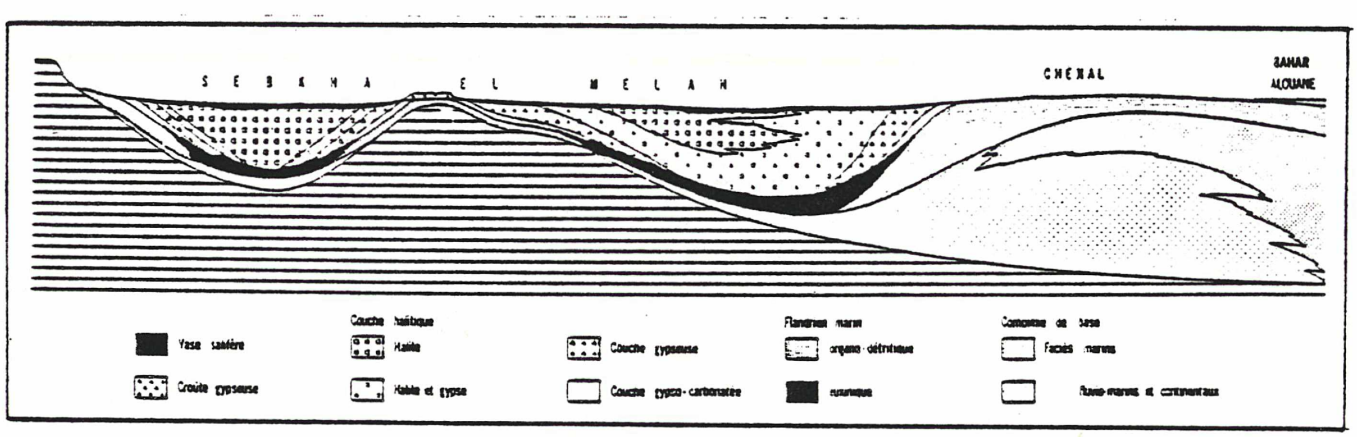


Fig. A6 - Coupe schématique du remplissage de la Sebkha el Melah (id. fig. 5)

L'intérêt de ce mode de dépôt par remplacement diagénétique est double : il précise des conditions de dépôt très particulières et souligne la généralité de dépôt au voisinage de la côte O, dans un monde où les grandes étendues plates ont dû dominer à diverses époques. L'examen de nombreuses séries anciennes, à la lumière de telles observations, a permis de les (ré)-interpréter.

- La "barre"

Le modèle précédent est assez récent ; le dispositif le plus simple conçu par les géologues a été celui des marais salants utilisés depuis des siècles par l'homme. Les théories "peu profondes" se sont ainsi développées, car si les auteurs admettent aujourd'hui que les grands gisements évaporitiques anciens ont pris naissance au fond de bassins reliés au domaine océanique, en revanche pour la bathymétrie des dépôts les avis sont allés jusqu'aux deux extrêmes.

Les dispositifs réellement assimilables à des marais salants peuvent être classés en deux catégories :

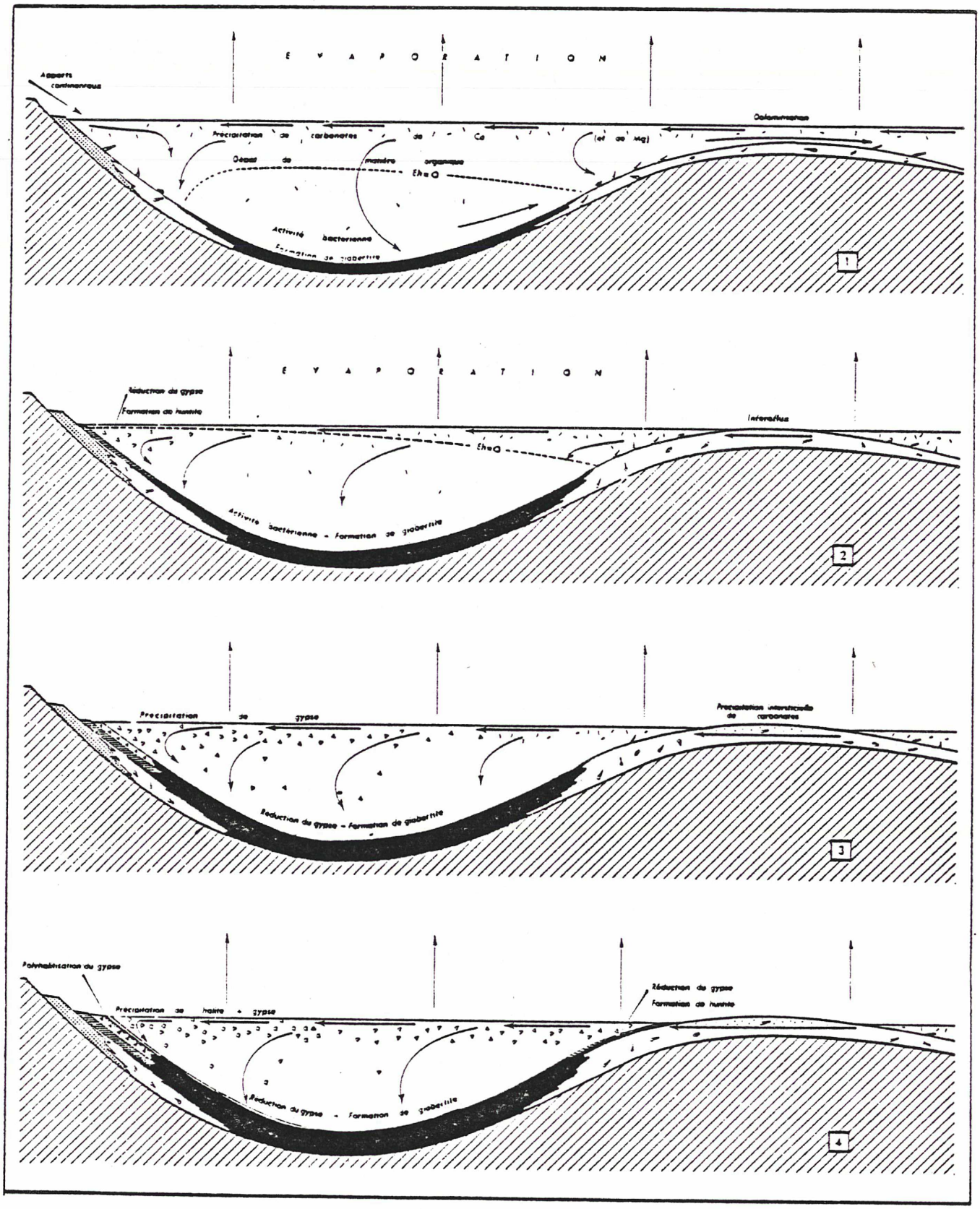
- les cuvettes et les plates-formes légèrement surélevées et inondées sporadiquement. Deux exemples en sont les bassins surélevés de la Salina Ometepec et d'Ojo de Liebre situés tous les deux en Basse Californie. Il s'agit d'anciens lagons en position amont par rapport aux platiers supracotidaux évoqués dans la sebkha de la côte des Pirates ; des vents violents coïncidant avec les grandes marées les inondent et outre quelques dépôts de sel d'origine diagénétique, on observe des dépôts évaporitiques dont la part peut être prépondérante (SHEARMAN 1970, in BUSSON 1974).

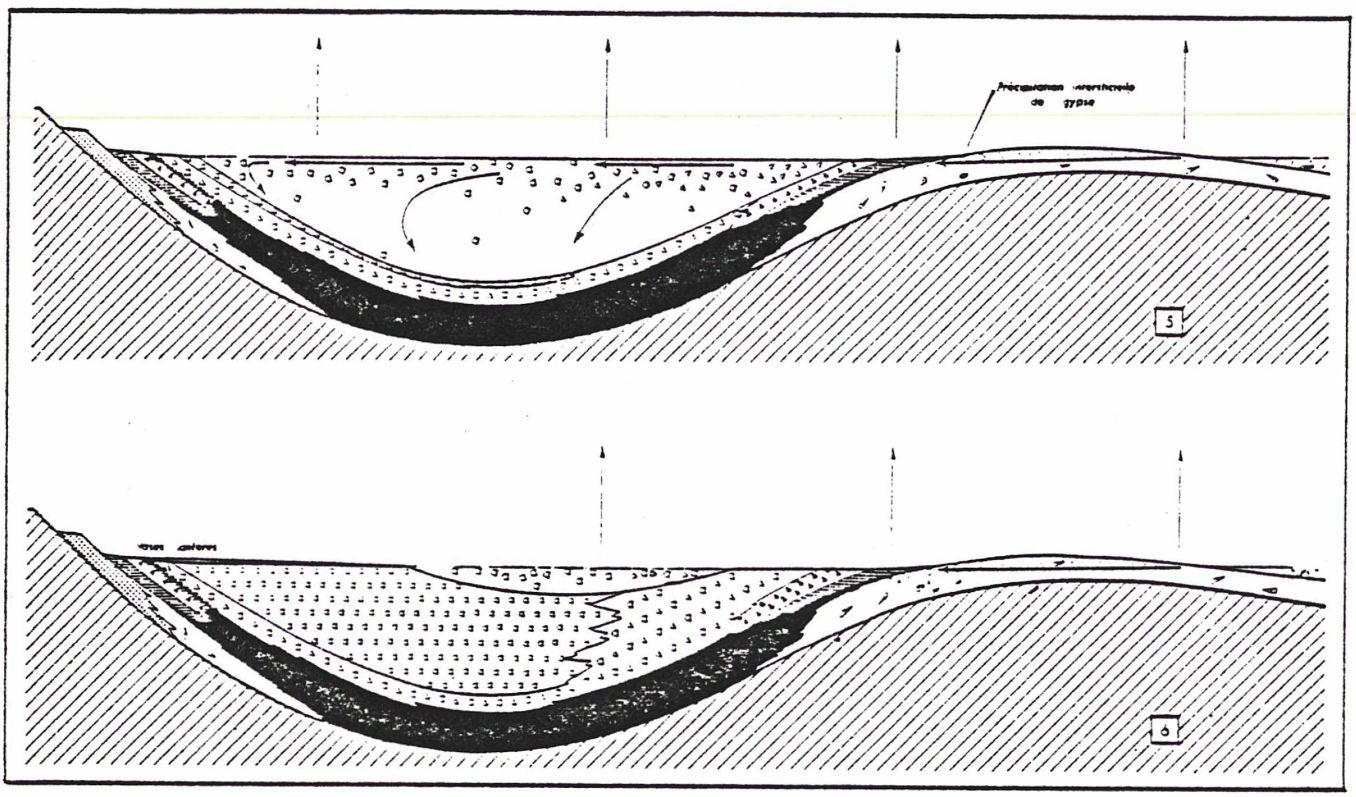
- le deuxième dispositif est sans doute le plus traditionnel : les bassins côtiers limités par une barre. Plusieurs remarques amènent à un tel modèle. La salinité des eaux ouvertes étant à peu près constante (3 à 4 %) et le rapport des ions indépendant de cette salinité, la précipitation des sels ne peut se concevoir que dans des zones isolées de la mer ouverte. Mais l'alimentation en eau salée doit être bien assurée : l'eau s'évaporant doit être renouvelée continûment. L'idée d'un cycle unique dévaporation se heurte à deux difficultés :

  - pour la série salifère principale du Mésozoïque saharien, le sel reconnu résulterait de l'évaporation d'une colonne d'eau de 1500 mètres, chiffre peu compatible avec les données géologiques sur le continent africain à cette époque,

  - le calcium aurait de toute façon entièrement précipité sous forme de sulfates et on ne pourrait en retrouver par la suite.

Fig. A7 - Le déroulement de la sédimentation flandrienne dans la Sebkha el Melah (extrait de PERTHUISOT 1979, fig. 10)





1. Maximum flandrien. La lagune est alimentée directement par la mer. Dépôt de la couche organo-détritique. Dès ce stade s'individualise en profondeur une lentille d'eau à rapport Mg/Ca élevé. Dans les parties profondes, euxiniques, l'activité bactérienne conduit à la formation de magnésite ($MgCO_3$).

2. Le niveau de la mer s'abaisse, l'alimentation du bassin se fait désormais par l'inféroflux à travers les sédiments du chenal. Le confinement augmente et un gradient de salinité s'établit sur le bassin. Le gypse commence à précipiter dans la partie distale du bassin. Il est attaqué par les bactéries sulforéductrices et remplacé par des carbonates très magnésiens (huntite, $CaMg_3(CO_3)_4$).

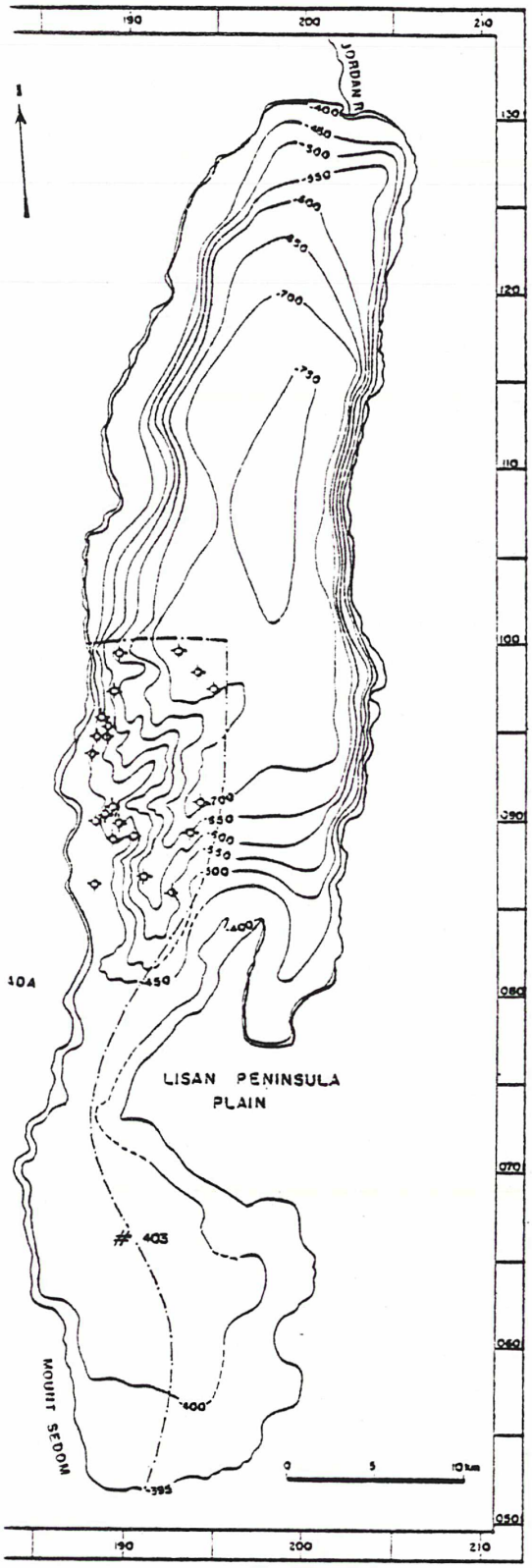
3. Le niveau marin continue à s'abaisser, ainsi que le plan d'eau dans le bassin. Le trajet en inféroflux augmente. Le gradient de salinité se resserre et se déplace vers la mer. La zone de précipitation du gypse gagne petit à petit sur l'ensemble du bassin. Dans la partie distale l'activité bactérienne est inférieure à l'apport de gypse et celui-ci peut persister sur le fond, tandis que dans les parties profondes la réduction bactérienne l'emporte sur la précipitation.

4. Les phénomènes précédents s'amplifient. La halite commence à précipiter à l'ouest (partie distale ou continentale) et simultanément le gypse précédemment déposé se transforme en polyhalite.

5. La précipitation de halite gagne l'ensemble du bassin, seule dans l'ouest, toujours accompagnée de gypse dans l'est.

6. Le bassin est pratiquement comblé et en voie de fossilisation sous les apports détritiques continentaux.

Le schéma final avec des termes salins emboîtés et concentriques, cache donc un dispositif instantané caractérisé par une ségrégation longitudinale des précipités salins en zones déterminées par le champ de salinité couvrant l'ensemble du bassin.



18 - Reproduction simplifiée de la carte bathymétrique de la Mer Morte (extrait de BUSSON 1974, fig. 7)

La solution a été imaginée voici plus de 100 ans par l'allemand C. OCHSENIUS et reprise par de nombreux auteurs. Une description assez conforme en est fait par L. de LAUNAY dès 1913 :

"Si l'on imagine un bassin fermé contigu à une mer plus vaste et communiquant avec elle par un détroit peu profond, dont le fond forme seuil sous-marin ou barre, un commencement d'évaporation sur le bassin fermé doit nécessairement amener la descente des eaux plus chargées de sel, donc l'impossibilité pour elles de retourner vers la mer dont elles sont séparées par la barre, tandis que le vide résultant est comblé au-dessus par un apport de nouvelle eau de mer superficielle. Ainsi doit progressivement s'augmenter la salure du bassin jusqu'au moment où, quelque soit son épaisseur, l'évaporation s'y réalise et le sel s'y précipite. Ce sel ayant en réalité une origine illimitée dans la mer voisine, il peut ainsi remplir un bassin fermé avec une épaisseur infiniment supérieure à celle qu'aurait comportée l'épaisseur d'eau initiale".

(de LAUNAY 1913, in BUSSON, 1968)

On peut illustrer cette théorie de la barre par les schémas théoriques proposés par OCHSENIUS puis améliorés par SLOSS (la ride), BORCHERT ou RICHTERBERNBURG (le seuil). Le dispositif du Kara-Bogaz est souvent choisi comme équivalent actuel : il est situé au coeur du continent eurasiatique ; mais les données les plus récentes ont une trentaine d'années. C'est pourquoi on lui a préféré pour cet exposé la Sebkha el Melah de Larzis (J.P. PERTHUISOT, 1974 et 1979) ; son mécanisme se complique certainement de phénomènes diagénétiques non négligeables dans la partie la plus amont mais il présente de la manière la plus moderne, une lagune alimentée par la mer et comblée au fur et à mesure par des dépôts d'abord organodétritiques, puis évaporitiques et enfin continentaux (fig. 5, 6 et 7).

On peut faire une remarque importante : les dépôts dans la région du seuil (sableux ou graveleux près d'une flèche, ou bien calcaires et/ou dolomitiques près de la barrière récifale) sont nécessairement moins profonds que ceux du bassin qu'ils délimitent, sinon il n'y a ni seuil, ni bassin mais une plate-forme. Les évaporites ne sont donc pas obligatoirement les dépôts les moins profonds de la série.

- <u>le sel "profond"</u>

Sans entrer dans le débat suscité par l'existence des dépôts profonds, on peut citer l'exemple des dépôts salins de la Mer Morte (fig. 8) :

"La mer Morte actuelle (NEEV et EMERY, 1967 in BUSSON, 1974) se caractérise, en particulier, par la superposition de deux corps d'eau différents : la masse d'eau supérieure, entre 0 et 40 m de profondeur, sujette à des variations saisonnières, sous-saturée en sel ; et la masse d'eau inférieure, de

40m au fond, saturée en sel et dont les propriétés demeurent stables, quelles que soient la température atmosphérique et la saison. En coïncidence approximative avec cette cote -40, la nature des sédiments actuels et sub-actuels change de façon très nette. En particulier, au-dessous de cette note, de nombreux carottages effectuée au fond ont traversé d'abord 10 à 80 cm de marnes semi-fluides, gris sombre, laminées, avec des lits blancs aragonitiques ; puis une couche de sel gemme massif, d'épaisseur non précisée -puisqu'il ne semble pas que cette couche ait été totalement traversée-.Entre une trentaine et une quarantaine de mètres sous la cote du plan d'eau actuel, on a rencontré en particulier un système de lamines doubles à halite et gypse cristallin. Au-dessus de 30 m de fond, les sédiments consistent le plus souvent en marne tendre, finement laminée, avec débris de plantes terrestres.

Dans la partie relativement profonde, qui contient du sel, on a pu noter l'abondance des restes végétaux dans un niveau intercalé entre le toit du sel et les marnes laminées qui le surmontent. Localement l'âge de ces débris a pu être établi : 930 ans. Il y a donc moins d'un millénaire, du sel gemme se déposait massivement au fond de la mer Morte, dont la profondeur ne saurait avoir été très différente dans un passé aussi récent. C'est un exemple indubitable de sel profond, puisque déposé sous plusieurs centaines de mètre d'eau (quelques mètres à 400m, à l'époque du dépôt). Les observations très complètes faites sur ce bassin donnent à penser que le dépôt d'halite a dû cesser quand la masse d'eau supérieure, plus dilué, s'est accumulée, scellant et isolant de l'atmosphère ce qui allait devenir la masse d'eau inférieure".

(BUSSON, 1974)

Le sel messinien du fond de la Méditerranée est lui aussi l'objet du débat entre sel peu profond et sel profond.(RUGGIERI et SPROVIERE, 1976 et STURANI, 1976).
Une telle disposition altimétrique des dépôts est classique dans les séries évaporitiques de plusieurs bassins anciens qui y verraient donc une réinterprétation du type de dépôt.

Ces quelques exemples montrent la diversité des mécanismes possibles pour la formation des séries évaporitiques. Ils réunissent un certain nombre de conditions importantes pour les bassin sédimentaires, sur lesquelles on n'a pas insisté :

- existence d'une solution de sels minéraux.
- la formation d'un bassin où les saumures peuvent se concentrer et se déposer, d'où :
  - une subsidence intense
  - une absence d'apports terrigène et d'eau douce
  - un climat chaud et sec.

Ces dépôts semblent se produire sous une tranche d'eau nulle (voire en milieu subaérien) ou à de grandes profondeurs (plusieurs centaines de mètres).

- La tectonique globale

Une vision toute différente (mais pas contradictoire avec les modèles précédents), radicale dans sa simplicité est celle de la tectonique des plaques. Les grandes fractures de l'écorce terrestre associées à des phénomènes de distension sont à l'origine de zones basses, effondrées. Leurs dimensions peuvent devenir suffisantes pour former des océans (la ride -ou rift- médioatlantique est une des plus célèbres) ou simplement de larges vallées envahies par les eaux marines si le phénomène de rift s'interrompt. On constate que de nombreux gisements d'évaporites sont liés à de telles structures (BAUER, 1974), se mettant en place sur les premiers débris des lèvres du rift.

Le rift est un trait structural fondamental de l'écorce terrestre : il est presque toujours associé à une méga-intumescence de celle-ci (fig.A9). La vallée est étroite et allongée (quelques kilomètres sur quelques dizaines de kilomètres), limitée sur ses bords par des escarpements de faille souvent abrupts. Dès la communication avec la mer, si le climat est convenable, les évaporites feront leur apparition : du fait des pentes, le bassin versant ne recevra qu'un faible apport à la saison des pluies et sa disposition longitudinale favorisera l'installation d'un seuil tectonique ou d'une barrière hydrodynamique. Ainsi dans son jeune âge, un rift apparaît comme voué à un avenir salifère.

Le graben rhénan en est un bon exemple en France. Sur la figure on l'a schématisé le long d'une coupe Est-Ouest (fig.A10). Les vitesses indiquées sont celles des ondes longitudinales se propageant dans le manteau supérieur. Normalement elles avoisinent 8 à 8,1 km/seconde. Au droit des rifts et des crêtes médio-océaniques, ces vitesses sont plus faibles (5 à 7 km/sec), indice d'une densité moindre. Cette zone plus légère remonterait selon la poussée d'Archimède et serait l'origine de l'intumescence de la croûte, qui porterait le rift.

Le fossé rhénan se précise vers la fin de l'Eocène ou au début du Paléogène. Le bombement amorcé au Secondaire a provoqué une érosion importante des marges du rift, tandis qu'au fond du graben les sédiments, protégés par l'effondrement, atteignent parfois le Jurassique Supérieur (Oxfordien). La mer oligocène venant du Sud (?), envahit tout le fossé qui renferme dans sa partie méridionale 1500 à 2000 mètres de marnes salifères passant vers le Nord à 500 m de marnes sableuses pétrolifères du Pechelbronn. Les formations évaporitiques sont situées dans l'axe du graben, tandis qu'au pied des flancs abrupts s'accumulent des dépôts torrentiels conglomératiques. La coupe SW-NE effectuée au niveau du bassin de Mulhouse en présente la disposition (fig.A11).

Il s'agit d'un rift très classique où les évaporites occupent presque toute la largeur.
L'existence d'un épisode salifère dans leur jeunesse devrait se vérifier dans les bassins côtiers du type atlantique. C'est effectivement le cas pour nombre d'entre eux (Gabon, Congo, Angola) sans que l'on puisse, dans

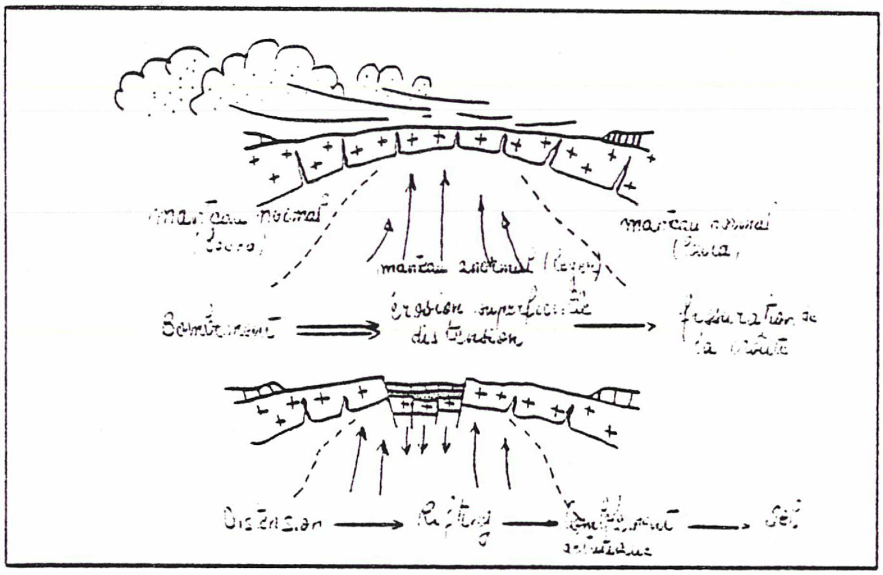
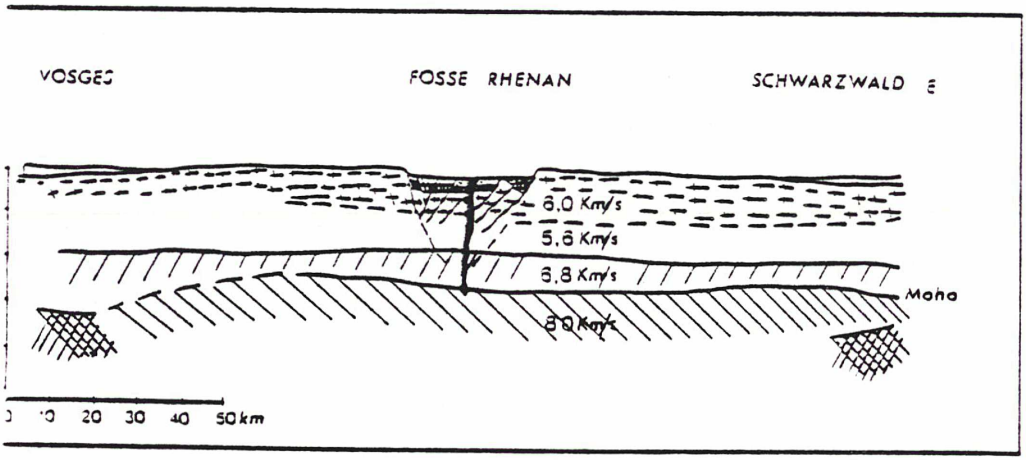


Fig. A9 - Antériorité à l'intumescence crustale par rapport au rift (extrait de BAUER 1974, fig. 3)



10 - Structure de la croûte terrestre dans la région du rift rhénan, d'après les données sismiques (d'après BAUER 1974, fig. 1-B)

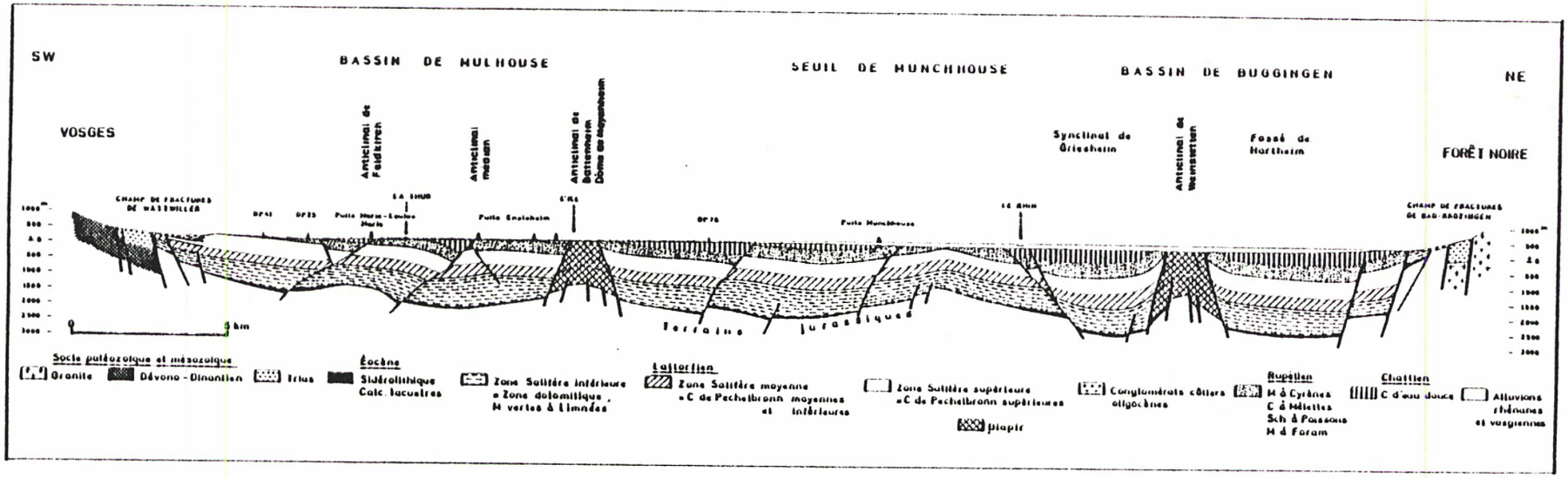


Fig. A11 – Coupe NE–SW à travers le grabeu rhénan au niveau du bassin potassique de Mulhouse–Buggingen (extrait de SITTLER 1965, fig. 50)

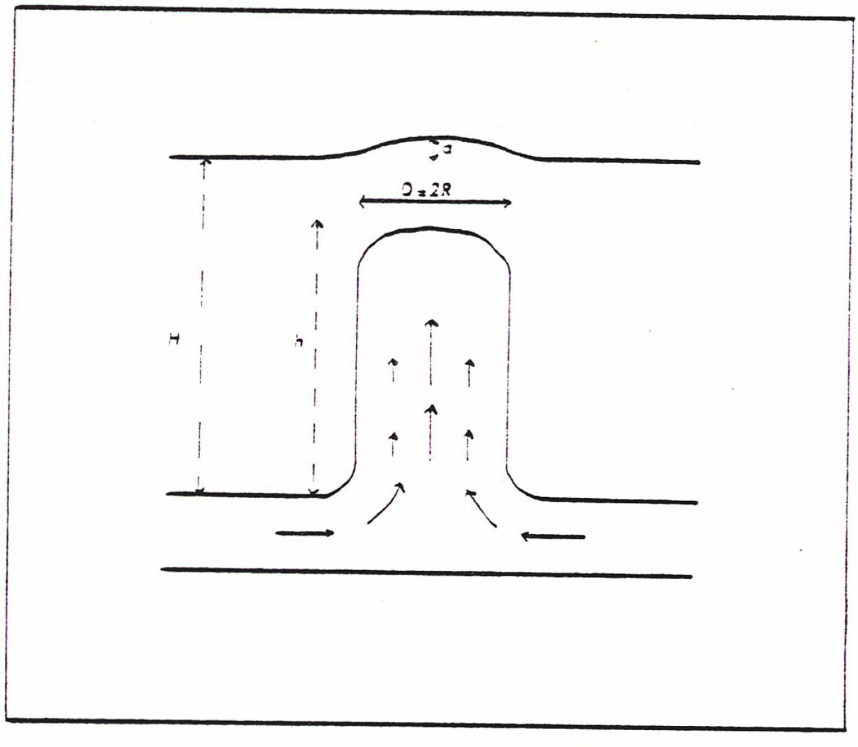


Fig. A12 - Schéma d'un dôme de sel (extrait de GOGUEL 1948, fig. 128)

l'état actuel des connaissances, affirmer qu'il s'agit là d'un lien systématique.

- B - Evaluation de la taille d'un dôme de sel (d'après GOGUEL, 1943)

A partir d'un modèle élémentaire, des calculs simples permettent de calculer le travail fourni par la pesanteur lors de l'élévation d'un dôme, ainsi que du travail obsorbé par les roches encaissantes et la déformation du sel. La comparaison de ces deux grandeurs permettra de dire si le mouvement se poursuivra ou non. Les conditions de naissance des dômes (épaisseur, profondeur du sel) seront évoquées.

Notations : densité du sel : ρ_0 — profondeur d'enfouissement : H
densité de l'encaissant : ρ_1 — hauteur du dôme : h
diamètre du dôme : $D = 2R$
(cf fig.A12) accélération de la pesanteur : g

Quand le dôme s'élève d'une hauteur x le travail fourni par la pesanteur vaut :

$$\mathcal{T}_p = \pi R^2 x \left[Pext - Pint \right] \quad (1) \qquad Pext = \rho_1 gH$$

$$\mathcal{T}_p = \pi R^2 x gh (\rho_1 - \rho_0) \quad (2) \qquad Pint = g(H\rho_1 - h(\rho_1 - \rho_0))$$

Si la surface du sol se soulève de (a) la pression à la base du dôme est majorée de $g\rho_1 a$; de ce fait elle neutralisera l'effet d'une hauteur de dôme de $\frac{\rho_1}{\rho_1 - \rho_0}$ plus grand soit jusqu'à près de 10 fois plus importante ($\rho_1 - \rho_0 \simeq 0{,}2$ à $0{,}3$).
Au contraire si le sol reste horizontal (érosion intense ou sédimentation importante, comblant les dénivellations), le phénomène sera favorisé. Des cas sont connus au Texas (Gulf Coast) ou en Alsace (Hettenschlag).

En ce qui concerne le travail absorbé et en négligeant en première approximation le seuil de plasticité du sel, supposé visqueux, on obtient pour un déplacement d'une valeur x (cas du cisaillement pur, d'une roche de seuil S) :

$$\mathcal{T} \text{ absorbé} = \pi SD(H-h)x \quad (3)$$

La condition nécessaire au mouvement est :

$$\tau \text{ fourni} = \tau_p \geqslant \tau \text{absorbé} \qquad \text{soit donc}$$

$$\frac{hD}{H-h} \geqslant \frac{4\,S}{g(\rho_1 - \rho_0)} \qquad (4)$$

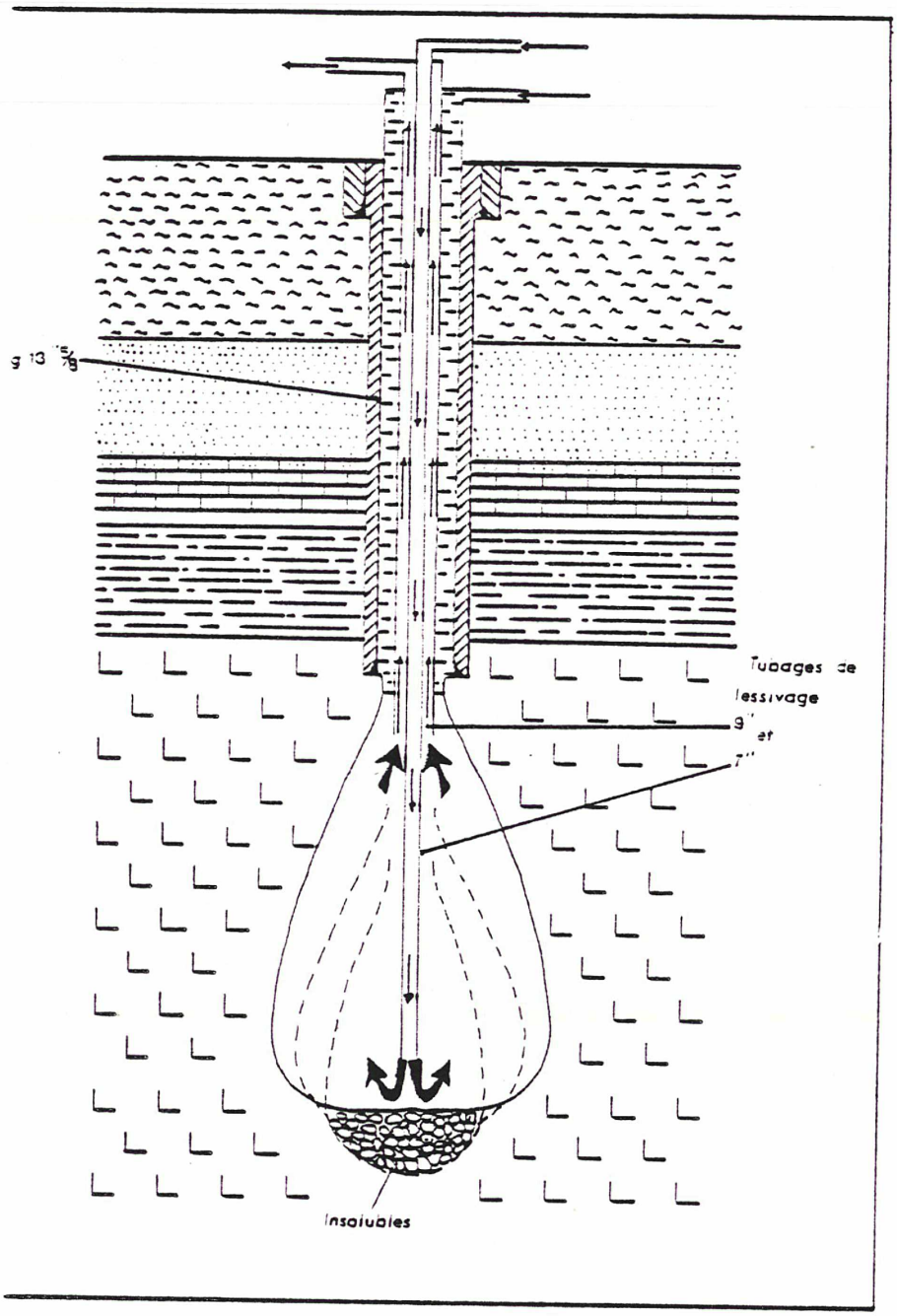
En prenant S = 30 kg/cm2 (calcaire tendre) de terrains tertiaires on obtient :

$$\rho_1 - \rho_0 = 0,2$$

H (mètres)	h (mètres)	D (Km)
1000	200	24
	800	1,5
2000	1000	6
	1800	0,66
3000	1000	23
	2500	1,2

L'hypothèse du cisaillement est sans doute inutile. En fait le sel cassera les bancs tendres en cisaillement et pour les bancs durs, le diamètre augmentera, le sel s'écoulant sous la surface inférieure, jusqu'à exercer une pression suffisante.

Les valeurs obtenues sont donc calculées par excès et en fait il n'est pas nécessaire d'avoir des diamètres considérables, surtout si la profondeur est importante. On peut rappeler les chiffres proposés par Martinez et Thoms 1976) : 1500m de diamètre et 3000m de hauteur.



A13 - Schéma de lessivage d'une cavité (d'après GERMAIN 1980, fig. 1)

Annexe 2

CREATION ET EXPLOITATION DE CAVITES DANS LE SEL

- A - Schéma de création de cavité par lessivage -

Le lessivage vertical est la technique la plus couramment utilisée. Elle comporte la réalisation d'un forage classique de type pétrolier dont le programme doit être adapté aux caractéristiques géologiques (profondeur de sel notamment) mais aussi aux impératifs liés au lessivage et à l'exploitation (dimension des tubages adaptée aux débits). Les programmes peuvent donc comporter de nombreuses variantes ; aussi l'exemple proposé sera celui d'une cavité réalisée à Manosque par la société GEOSTOCK avec le toit du sel à la profondeur de 600 mètres.(fig.A13).

On réalise un forage en gros diamètre (avec élargissage) -24pouces- jusqu'à une profondeur de 50 mètres environ. Puis on fore jusqu'à atteindre le toit du sel ; on descend un cuvelage (ou casing) qui est cimenté jusqu'en surface, l'étanchéité de la cavité étant complétée par un sabot. Dans le cuvelage (Ø 13 pouces 5/8) on descend le matériel de lessivage proprement dit, à savoir deux tubing concentriques (Ø 9 pouces 5/8 et 7 pouces) ; trois espaces interannulaires sont ainsi définis :

- un dans le 7"
- un dans l'espace 9"5/8 - 7"
- un autre dans l'espace 13" 5/8 - 9" 5/8.

L'eau douce est injectée dans le 7" et la saumure remonte par l'annulaire intermédiaire, tandis que l'espace extérieur est rempli d'un hydrocarbure plus léger que l'eau (huile, gas-oil) pour éviter la progression du lessivage au-dessus de la cote prévue.

En faisant varier les cotes de base respectives des tubing centraux et en modulant les débits de circulation, on conduit la progression du lessivage vers l'obtention des formes désirées. Cette méthode permet justement de résoudre les difficultés créées par les insolubles disséminés dans le sel.

- B - Le problème des insolubles -

Les insolubles rencontrés au cours des lessivages sont constitués d'anhydrite et d'argile, en billes ou blocs ou bien en grands bancs métriques à décamétriques. Ainsi à Manosque le sel est très tectonisé,

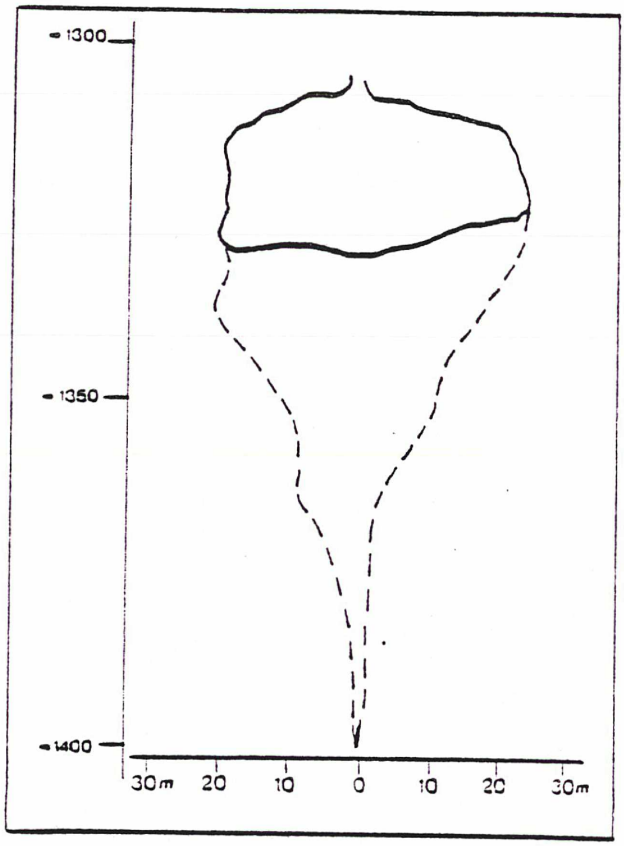


Fig. A14 - La cavité de Kiel (extrait de BEREST 1981, fig. 1c)

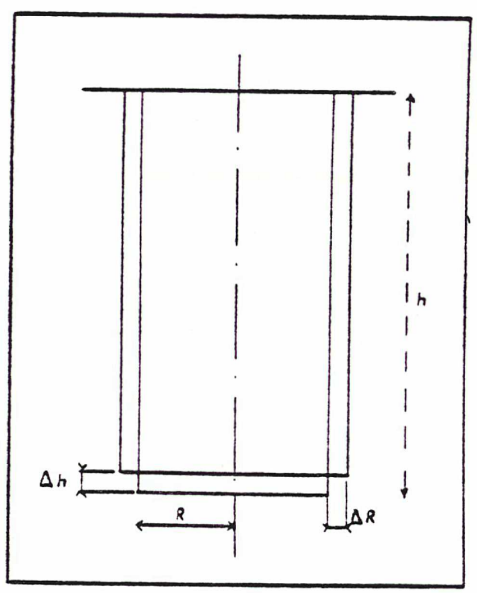


Fig. A15 - Le modèle simplifié de la cavité cylindrique

renfermant des bancs d'anhydrite cassés ; au contraire à Tersanne le gisement est en place mais il est traversé par de gros bancs.

Ces insolubles représentent 10 à 15 % du volume à lessiver, mais leur dépôt anarchique peut provoquer une remontée brutale du fond de la cavité réduisant considérablement le volume de la cavité. C'est ce qui s'est passé à Kiel (fig.A14) où les insolubles occupent 75 des 100 mètres de la cavité.

On peut analyser rapidement ce phénomène, à l'aide du modèle cylindrique simple (fig.A15) :

Notations
- R : rayon du cylindre
- r_o : rayon initial
- h : hauteur du cylindre
- h_o : hauteur initiale
- V : volume du cylindre
- α : pourcentage d'insolubles supposé constant par unité de volume

On a les relations évidentes :

$$V = \pi R^2 h \qquad (1)$$

$$dV = \pi (2Rh\,dR + R^2\,dh) \qquad (2)$$

$$\alpha\, dV = -\pi R^2 dh \qquad (3)$$

d'où

$$0 = (1+\alpha)\, R^2 dh + 2\alpha h R\, dR \qquad (4)$$

finalement par intégration on obtient :

$$\frac{h}{h_o} = \left(\frac{r_o}{r}\right)^{\frac{2\alpha}{1+\alpha}} \qquad (5)$$

La vitesse de remontée du fond de la cavité est mesurée par $\left[\frac{dh}{dR}\right]_{t=0}$ soit :

$$\boxed{\left[\frac{dh}{dR}\right]_{t=0} = \frac{-2}{1+\alpha}\,\frac{h_o}{r_o}} \qquad (6)$$

Avec : r_o=10cm

h_o=150 cm

=10 %

$\left[\frac{dh}{dR}\right]_{t=0}$ = -300 (vitesse de remontée considérable)

Pour remédier à cette difficulté, on peut soit augmenter r_o, ce qui revient à augmenter le diamètre de forage et est très coûteux, soit changer le h_o. C'est la méthode du lessivage en plusieurs passes, adoptée par le Gaz de France.

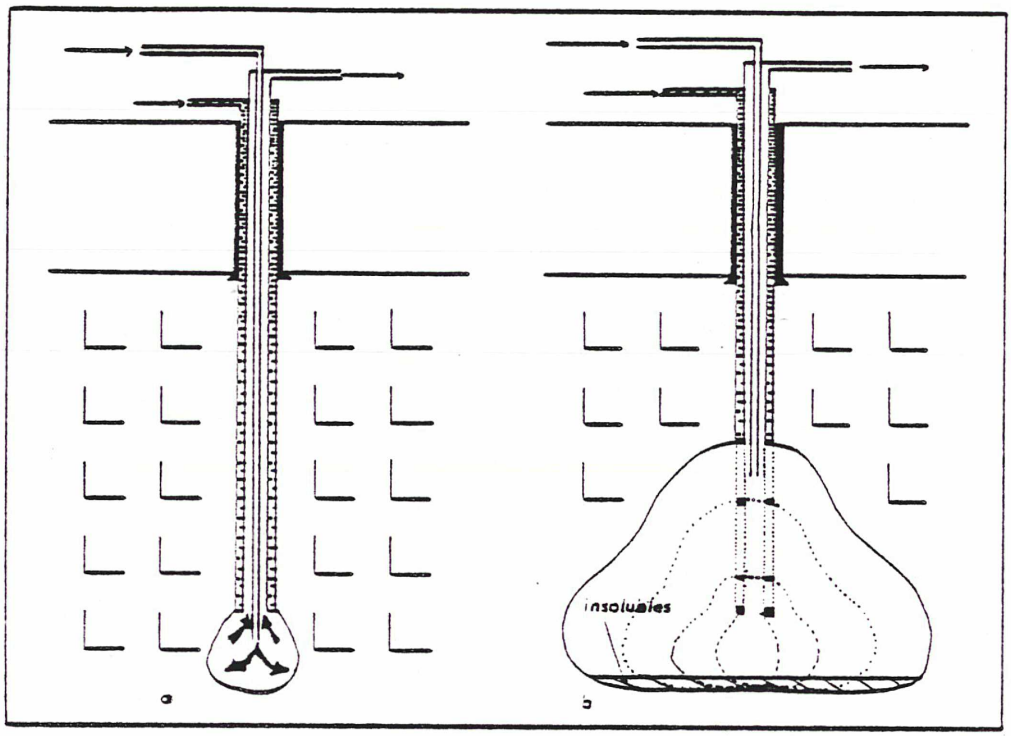


Fig A 16

Le lessivage par "passes" successives

a - le démarrage b - les "passes"

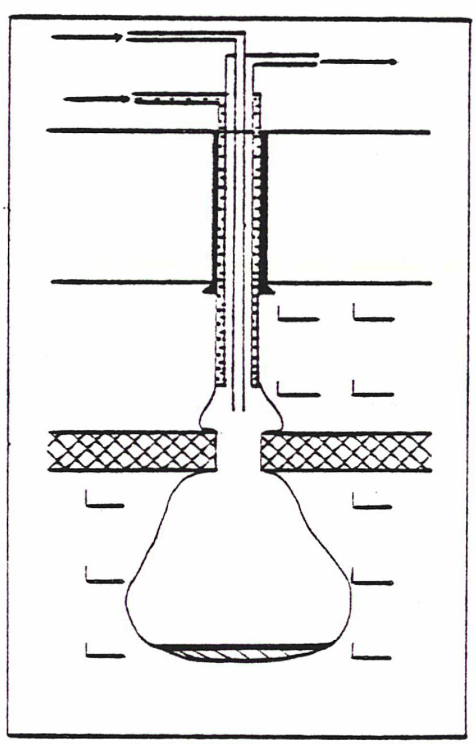


Fig A 17

Le "passage" d'un banc d'anhydrite

Par l'annulaire extérieur on injecte un fluide plus léger que l'eau de façon à ne lessiver qu'une petite cavité (fig.A16), puis on remonte l'ensemble et on recommence ; la vitesse de progression, mesurée par $\frac{dR}{dt}$ (on peut le montrer assez simplement) est à peu près constante sur toute la hauteur. Après plusieurs passes, on obtient une cavité assez régulière, pointue vers le haut (ce qui est favorable pour la stabilité), tandis que les insolubles n'occupent qu'une hauteur faible.

La solution pour les gros bancs -métriques- d'anhydrite est différente : on dégage le banc au dessous, en maintenant le tubage juste au-dessous (fig.A17), tandis que la cavité se développera plus lentement dans la partie supérieure. Si le banc est mince, il se cassera seul sous son propre poids ; sinon après avoir dégagé le banc on utilisera le procédé de l'air-lift (ou water-lift). On injecte une colonne d'air dans l'eau douce ; à 1000m sa pression (P = 0.012 H exprimée en atmosphère) sera de 120 bars. La saumure montante se trouvant très allégée, on espère que l'à-coup sera suffisant pour casser le banc.

Lorsque des bancs trop épais sont détectés (écholog), on restreint les cavités en dessous de ceux-ci pour éviter les problèmes de lessivage.

- C - Le régime des pressions - (d'après P. BEREST, 1981)

Parmi tous les critères dont l'influence est déterminante sur le comportement des cavités, le régime des pressions auquel le cavité est soumis est très important. Il présente en outre l'avantage d'être le plus facilement quantifiable.

La stabilité va dépendre manifestement de la profondeur et de la pression intérieure. L'effet de la profondeur se résume à une pression extérieure (au niveau de la cavité) isotrope résultant du poids des terrains susjacents, donc proportionnelle à leur épaisseur. (d = 2,3)

La pression intérieure sera celle de la colonne de saumure (d = 1,2) pour le cas des produits liquides. Dans le cas du gaz naturel la pression intérieure minimale (au déstockage donc) doit assurer un soutènement suffisant pour la cavité. Ainsi à Tersanne (Drôme), elle avait été fixée initialement à 8 MPa. Les cavités en gaz seront ainsi sollicitées plus fortement que celles en liquide car :

- la pression minimale y sera plus faible
- pour obtenir une pression maximale suffisante, les cavités en gaz seront située à plus grand profondeur
- les cavités en gaz subiront des variations de pressions importantes (entre 8 et 22 MPa à Tersanne), qui induiront des effets analogues à la fatigue des structures métalliques.

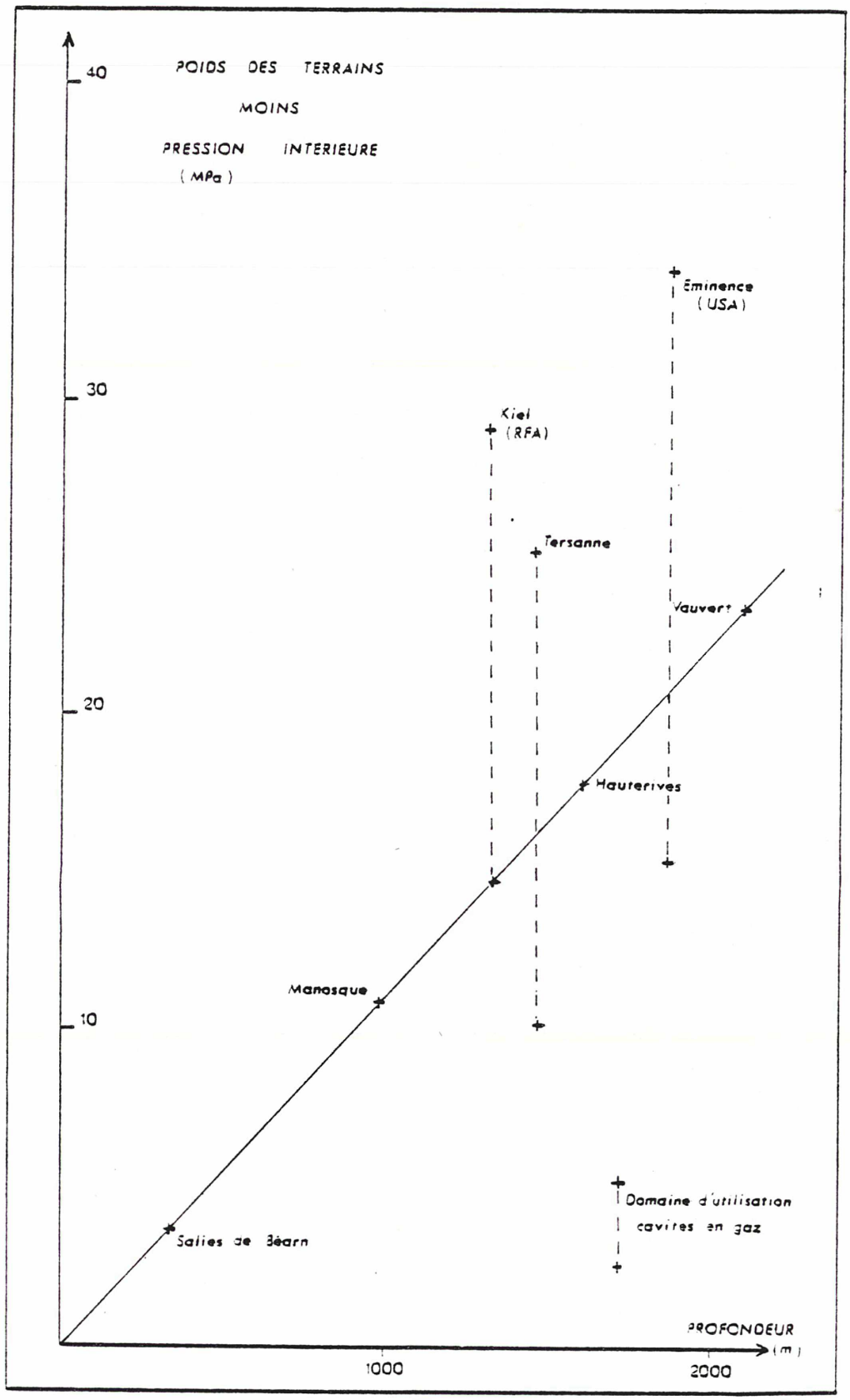


Fig A 18

Un critère nécessaire de stabilité des cavités (d'après BÉREST 1981 , fig3)

Quand on établi le bilan des informations à propos des sites du monde entier on peut alors constater trois points essentiels :

- pour l'ensemble des cavités étudiées, parfois depuis des dizaines d'années, aucun mouvement du sol n'a été constaté,

- aucune cavité en liquide ne parait avoir perdu de volume, dans la fourchette d'incertitude de 5 % inhérente à la mesure par sonar,

- les cavités en gaz profondes ont connu des mouvements importants, avec des pertes de volume considérables.

A Eminence Salt Dome (Mississipi, USA) la cavité de 30 mètres de diamètre, située entre 1725 et 1965 mètres, subissait des variations de pressions entre 7 et 28 MPa. Après deux ans d'exploitation, le fond est remonté de 36m, la perte totale de volume était de 40 %.

En Allemagne Fédérale, à Kiel, la cavité (cf fig.A14annexe2,B) située entre 1300 et 1400 mètres avait un volume initial de 68 000m3 (dont 28 000 m3 d'insolubles foisonnés). A la fin du lessivage la pression intérieure est tombée quasiment à zéro. Le toit s'est alors effondré de 3 mètres ; 45 jours après l'essai la perte de volume était de 7 500m3, et 5 mois plus tard on a mis en évidence une perte additionnelle de 1 900m3.

A Tersanne (Drôme, France), après 10 ans d'exploitation, deux cavités ont perdu un volume important (25% à 30%). Elles étaient situées entre 1 400 et 1 550 mètres, et avec un écart de pression de 8 à 22 MPa.

Ces travaux ont conduit à faire deux observations fondamentales concernant le comportement des cavités :

- les déformations paraissent avoir été progressives et étalées sur des mois, voire des années,

- les pertes de volume sont considérables pour les cavités en gaz.

Ce dernier point pourrait être détaillé plus avant ; on concluera avec le graphique ci-contre, indiquant une règle simple, nécessaire (mais non suffisante : d'autres critères sont à envisager, comme la forme, la distance intercavité, la nature de l'encaissant...) pour assurer la limitation du fluage d'une cavité : l'écart entre la pression extérieure (poids des terrains : 0,023 H) et la pression intérieure (poids de la saumure : 0,012 H ou pression minimale Pmin.) ne doit pas excéder 20 à 22 MPa.(fig. A18).

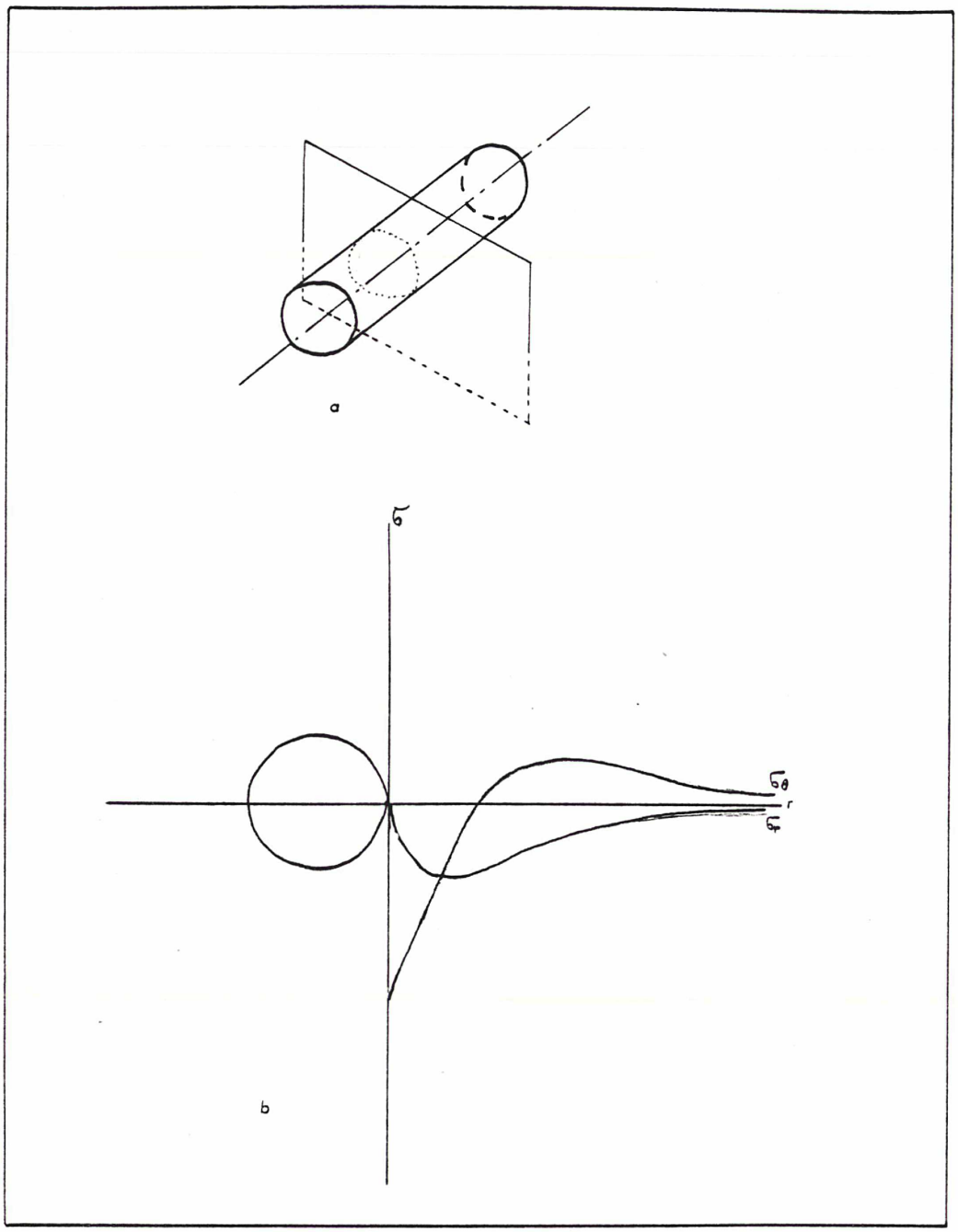


Fig. A19 - Influence de la température sur les contraintes exercées sur une cavité cylindrique creusée dans le sel

La limite inférieure est donc de 1800 à 2000m pour les liquides et de 1400 à 1600 mètres pour le gaz naturel.

- D - Les inclusions fluides dans le sel et les déchets nucléaires -

Sans approfondir la question du stockage des déchets nucléaires, ce dernier complément aux problèmes du sel soulignera l'existence des difficultés d'ordre théorique qui subsiste encore aujourd'hui.

La première d'entre elles est liée à la forte chaleur dégagée par les déchets. Nous allons l'illustrer avec un modèle simple : considérons la section plane d'une cavité cylindrique soumise à une température intérieure élevée. Lorsqu'on examine les composantes du tenseur des pressions σ_r, σ_θ (fig. b). Les calculs montrent que σ_θ est donnée par la formule :

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E T}{1 - \nu} \qquad (1)$$

avec E : module d'Young E 10^5 bars

ν : coefficient de Poisson $\nu \simeq 0{,}25$

α : coefficient de dilatation thermique $\alpha \simeq 10^{-5}$/bar x 0°C

donc

$$\sigma_\theta \sim T \qquad (2)$$

σ_θ (exprimée en bars) est de l'ordre de grandeur de la température (exprimée en degrés Celsius). Dans le cas des déchets nucléaires, elle pourrait atteindre 100 à 200°C ; on aurait donc 100 à 200 bars de compression. Des valeurs aussi élevées pourraient mettre en cause la tenue de la cavité.

D'autre part l'analyse du réseau cristallin du sel a revélé l'existence d'inclusions remplie d'eau salée, de gaz ou des deux à la fois. Le comportement de ces vacuoles, soumises à de fortes températures est encore une inconnue. Une des conséquences pourrait être la fuite vers l'extérieur de ces fluides, contaminés au voisinage des déchets.

Cette présentation soulève le problème et ne prétend pas avoir envisagé complètement la question ; des recherches très poussées continuent à éclaircir le sujet. Sa difficulté ne devait pas pour autant empêcher de le mentionner.

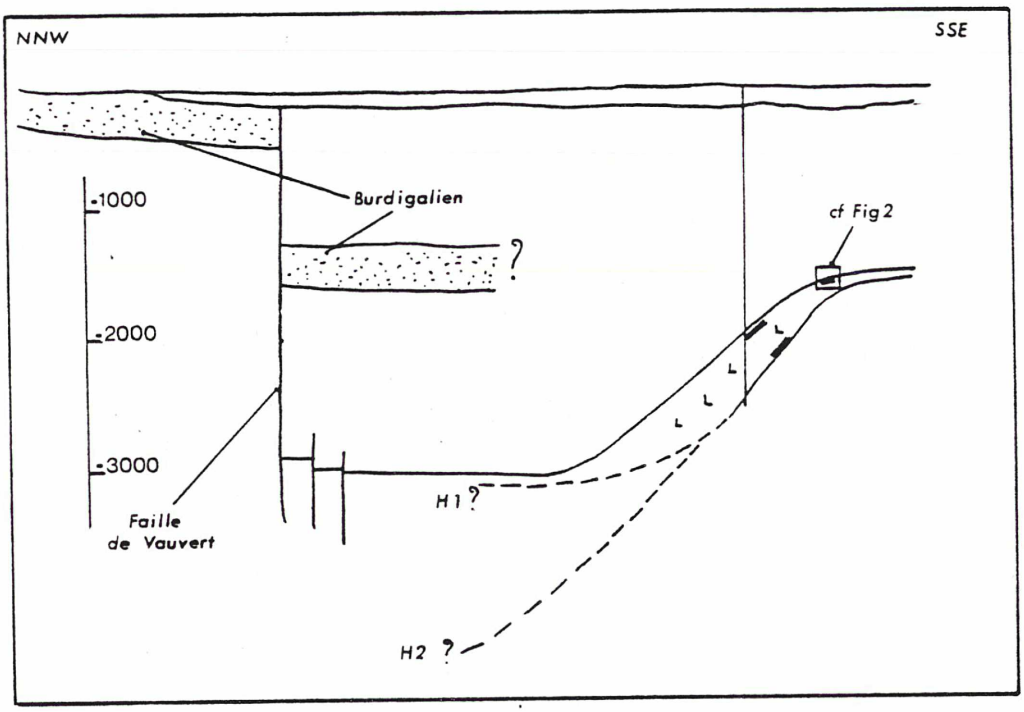


Fig A 20

Coupe NNW_SSE du gisement de Vauvert (B.GEORGES , communication orale).

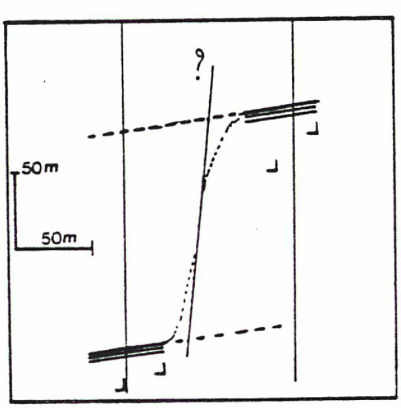


Fig A 21

Fractures dans le sel a Vauvert (id.)

ANNEXE 3

- A - Le gisement de Vauvert

Une coupe NNW-SSE (fig.) va préciser la partie connue du gisement. Entre la faille de Vauvert et les sondages de l'exploitation de Rhône-Poulenc, la sismique a confirmé l'existence d'une étendue plate vers la cote -3000. Au Sud-Est le sel remonte rapidement mais de façon anarchique : entre deux puits très proches (150m) on constate des décalages au toit du sel du même ordre de grandeur (150m) avec des pendages semblables (fig.). Le sel est donc haché par des fractures. Plus loin encore l'épaisseur du sel diminue pour atteindre seulement quelques mètres (20m à Gallician).

Enfin le sel est toujours bien lité au toit et au mur mais jamais dans sa partie centrale. Les pendages varient entre 20 et 60°. Deux hypothèses existent concernant la partie profonde et la position actuelle du sel :

- Hypothèse 1 (H 1) : le sel s'est déposé au centre de la fosse ; une pression (poids des terrains ?) verticale a chassé le sel sur le côté, expliquant le litage, les fractures et la remontée "bizarre". Il n'y a donc plus de sel au milieu.

- Hypothèse 2 (H 2) : le sel existe bien au centre mais il faudrait y faire un sondage car la sismique ne permet pas de répondre. Or le toit du sel serait à 3 000m mais la réponse pourrait se trouver 800 ou 1000m plus bas avec le mur à 3800 ou 4000m...

L'hypothèse 1 semble la plus plausible, comme l'indique la gravimétrie, mais en l'absence de sondages le débat reste ouvert...

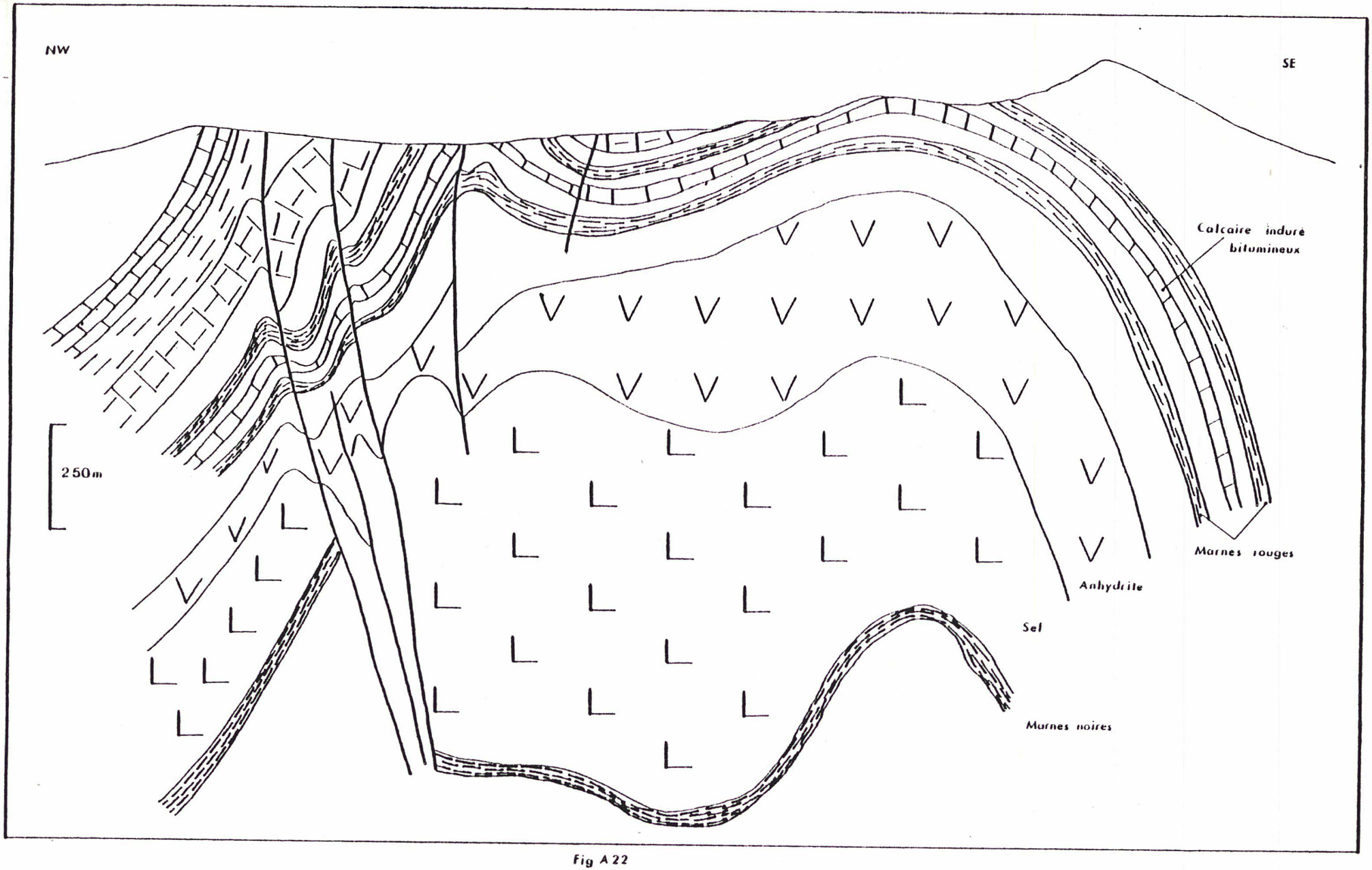


Fig A 22

Le bassin de Manosque : Coupe NW—SE, d'après Géostock

- B - Le Bassin de Manosque

Ce gisement est vraisemblablement en position diapirique ; la coupe NW - SE (fig.) montre une structure complexe où un niveau anhydritique sépare des couches de sel. De nombreux blocs sont disséminés dans la masse ; les carottages effectués révèlent un conglomérat cimenté par du sel. L'hypothèse classique est que des paquets entiers d'anhydrite se sont glissés comme des coins de bois dans la masse.

L'âge du sel est l'ojet d'un large débat : la majorité des géologues penchent pour un âge oligocène, mais certains, se fondant en particulier sur la corrélation des autres bassins oligocènes, y verrait un sel triasique, surmonté par un niveau oligocène.

Le Bassin lui-même n'est pas entièrement connu ; mais une reconnaissance complète exige des moyens que les associés ne sont pas disposés à engager.