

Bassins paléogènes salifères de l'Est de la France (Valence, Bresse et Haute-Alsace) *

*Paleogene salt basins of eastern France
(Valence, Bresse and Haute-Alsace)*

Georges BUSSON ⁽¹⁾

avec la collaboration de Marie-Madeleine BLANC-VALLERON ⁽¹⁾,
Annie CORNÉE ⁽¹⁾, Alain CURIAL ⁽¹⁾, Gilles DROMART ⁽³⁾, Daniel DUMAS ⁽³⁾,
Robert MORETTO ⁽⁴⁾, Jean-Marie ROUCHY ⁽¹⁾ et Charlotte B. SCHREIBER ⁽⁵⁾

Mots-clés : Synthèse bibliographique, Évaporites, Paléogène, Argile, Roche carbonatée, Matière organique, Paléogéographie, Haut-Rhin, Bas-Rhin, Alsace, Drôme (Bassin de Valence), Ain, Saône-et-Loire (Bresse).

Résumé

Après avoir précisé dans une introduction l'importance des bassins salifères paléogènes français, tant du point de vue de la géologie fondamentale que de la géologie appliquée, on évoque dans un « aperçu méthodologique » certaines particularités des études synthétisées dans cet article. Les diagraphies les plus modernes disponibles ont pu recevoir une exploitation sédimentologique particulièrement poussée, grâce à la quantité exceptionnelle de carottes qui permettaient de confronter ces enregistrements de paramètres physiques à la réalité pétrographique. On évoque aussi les études qui permettent de mieux localiser — dans les inclusions fluides ou dans le réseau de la halite — des éléments tels que Br, K et Mg trop souvent mesurés globalement sur échantillon brut. Les bassins font ensuite l'objet d'une description générale (coupe type, principales unités stratigraphiques et lithologiques, répartition des isopaques). Puis l'on traite les principaux constituants de ces remplissages évaporitiques dans l'ordre suivant : détritiques terrigènes, argiles, carbonates, sulfates de calcium, autres sulfates, halite, potasse, silice, matière organique. Étant donné les quantités de halite présentes dans ces bassins, les phénomènes de dissolution ont dû être pris en compte très minutieusement. On a cherché à les dater puisqu'ils vont d'actions syngénétiques à des dissolutions très tardives. On a distingué par ailleurs les échelles centimétriques et décimétriques, l'échelle du banc, l'échelle décamétrique, la brèche au sommet du sel en Bresse et enfin les dissolutions à l'échelle de toute la formation salifère. Les phénomènes révélés par ces reconstitutions ont souvent éclairé avec une grande précision l'histoire sédimentaire, l'évolution tectonique, voire les phases climatiques dans les régions et les bassins considérés.

Un essai de synthèse stratigraphique et paléogéographique a porté sur la période s'étendant de l'Éocène moyen à l'Oligocène supérieur, l'accent étant évidemment mis sur les périodes principales de dépôt du sel massif : Ludien supérieur et Stampien. La synthèse tentée dans cet essai a englobé, outre les bassins salifères qui font l'objet de la note, les autres régions rhodaniennes et méditerranéennes, le Massif central et les Alpes Occidentales. Puis le schéma de répartition des grands groupes de faciès dans chacun des trois bassins salifères a été reconstitué, pour chaque époque grâce à l'exploitation systématique des données des diagraphies. Le modèle concentrique des sels de solubilité croissante et les anomalies qui l'affectent, les indices de classement antéro-postérieur ont été considérés comme des éléments importants dans l'interprétation de ces bassins et de leur remplissage. Le thème de l'origine continentale ou marine des sels a été examiné tout d'abord à la lumière des arguments paléogéographiques : possibilité de recyclage des évaporites triasiques et/ou d'alimentation à partir des mers paléogènes. Puis on a pris en considération les données pétrographiques et géochimiques (à l'exclusion des données isotopiques) et enfin les données paléobiologiques. Au terme de cette étude, la solution la plus probable serait d'invoquer des saumures d'origine marine : mais, en l'état actuel de nos connaissances, la conclusion ne saurait être catégorique. Les développements consacrés aux facteurs climatiques ont d'abord rappelé l'incon-

* Manuscrit reçu le 3 avril 1992, accepté le 25 juin 1992.

(1) Laboratoire de Géologie du Muséum, 43, rue Buffon, 75005 Paris.

(2) Diastata, 20 bis, rue Songieu, 69100 Villeurbanne.

(3) Centre des Sciences de la Terre, Université Claude-Bernard, 27-43, bd du 11-Novembre, 69622 Villeurbanne Cedex.

(4) Laboratoire de Géologie des Ensembles sédimentaires, Université Nancy I, B.P. 239, 54506 Vandœuvre-les-Nancy.

(5) Department of Geology, Queens College (CUNY) Flushing, New York 11 367 U.S.A.

turnable nécessité d'une grande aridité pour rendre compte de tels dépôts. On a également cherché une explication aux hypothèses de palynologistes qui invoquent des conditions beaucoup trop humides — à notre sens — ayant présidé à ces dépôts salins. La morphologie de ces bassins pendant leur remplissage et la profondeur de saumures sous laquelle se sont faits les dépôts sont examinées à l'aide de tous les arguments existants. Les critères de très faible profondeur — impliquant une morphologie très peu différenciée — ont surtout été évoqués dans les études analytiques. La différenciation très nette des faciès, souvent observée entre les aires centrales et les aires marginales, implique néanmoins obligatoirement une morphologie de bassin, sinon permanente du moins entretenue de façon répétée. Dans ce domaine il n'apparaît pas possible de dépasser les considérations qualitatives : en l'état actuel des connaissances, avancer des profondeurs chiffrées ne reposerait sur aucune donnée réelle.

Abstract

In the introduction the importance of french salt basins is stated from both academic and applied point of view. Then in a section « methodology outline » some peculiarities of here summarized studies are evoked. The available up-to-date electric logs have been thoroughly exploited from a sedimentological point of view, owing to the uncommon amount of cores which allowed to compare the physical parameter records to petrographic data. A section concerns studies which allow a better localisation — in fluid inclusions or in halite network — of elements like Br, K, Mg too often analyzed on total sample. Then a general description of the more thoroughly studied basins (Alsace, Bresse, Valence) is given: typical section, main stratigraphical and lithological units, isopach distribution. The main components of these evaporitic infillings are treated as follows: terrigenous clastics, clays, carbonates, calcium sulfates, other sulfates, halite, potash, silicium, organic matter. In consideration of large halite amounts of these basins, solution processes had to be thoroughly studied. An attempt was made to date them because they result from syngenetic actions as well as from very late solutions. Different scales have been distinguished: centimetric and decimetric, bed scale, decametric, breccia at the top of the salt in Bresse, and finally the solutions at the scale of the entire formation. Phenomena shown by these reconstructions often enlightened the sedimentary history, tectonic evolution, and even climatic stages of the studied areas and basins. An attempt of stratigraphical and paleogeographical summary concern period ranging from middle Eocene to upper Oligocene, main periods of salt deposition being emphasized: upper Ludian and Stampian.

In addition to salt basins treated in the present paper this summary includes other rhodanian and mediterranean areas, the Massif Central, and Western Alps. Then the distribution pattern of different facies in each of three salt basins is reconstructed for each of time owing to a systematic utilization of log data. The concentric model of increasingly soluble salts and its anomalies, the indications of proximal-distal segregation are considered as significant data for the interpretation of these basins and their infillings. The continental or marine origin of the salts has been examined from paleogeographical data : possibility of recycling triassic evaporites and/or supply by paleogene seas. Then petrographic and geochemical (excluding isotopic data) and finally paleobiological data have been considered. From this study it appears that marine brines would be most likely, but as far as we know this conclusion cannot be categorical.

Sections about climatic factors have first recalled that a great aridity is essential to account for such deposits. An explanation is searched for assumptions of palynologists who call upon too much wet conditions — in our opinion — prevailing at the time of deposition of these salts. Basin morphology during the infilling and brine depths are examined according to all extant arguments. The criterion for a very shallow environment — involving a not very differentiated morphology — are mainly evoked in analytical studies. Nevertheless the very clear facies differentiation, often noted between central and marginal areas, necessarily implies a differentiated basin morphology, if not permanent at least sustained repeatedly. For the matter in question, it seems impossible to go beyond qualitative considerations: after that we know, to suggest figures for the deposition depth would not be supported by any actual data.

Avant-propos

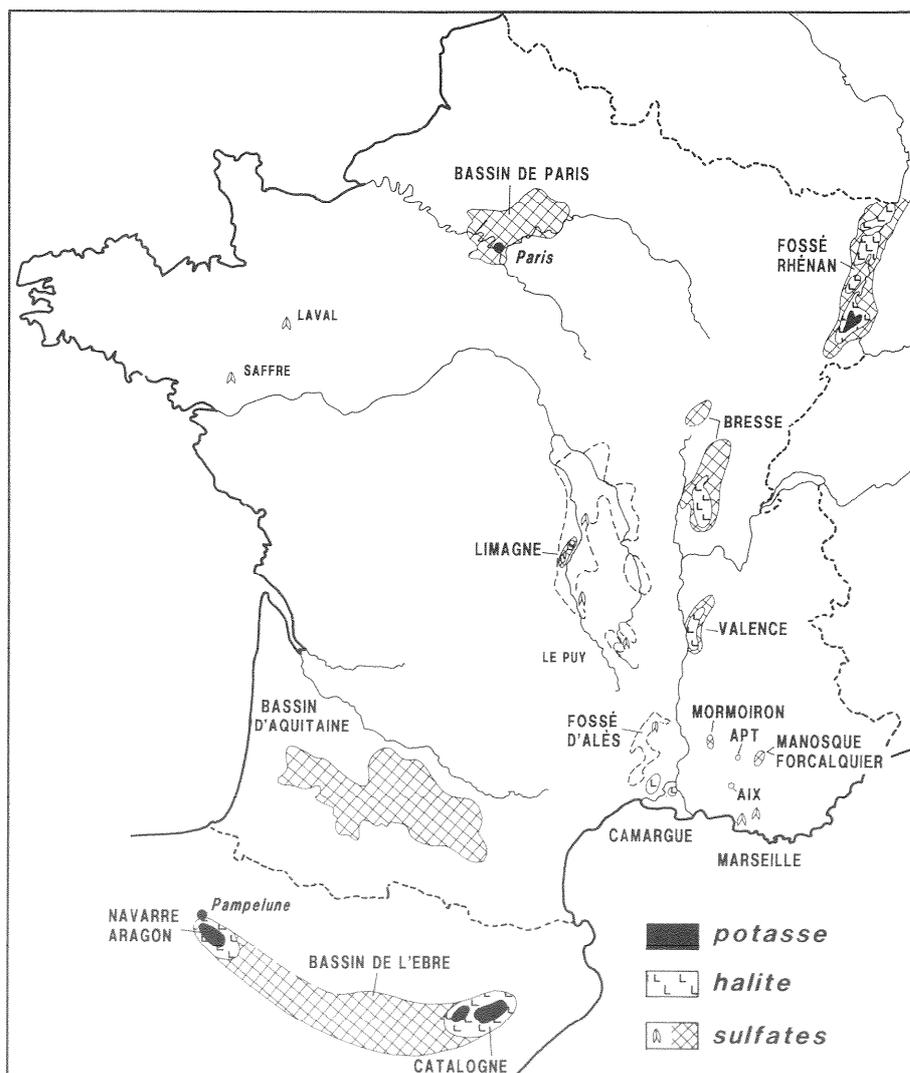
Le présent article correspond à une tentative de synthèse d'un certain nombre de données tirées de travaux fondamentaux, exécutés — totalement ou partiellement — dans le cadre de la formation de recherche du CNRS « Nature et Genèse des Faciès confinés » (1977-1991). Citons ainsi la thèse d'état de Marie-Madeleine Blanc-Valleron (1981-1990) sur le Paléogène évaporitique d'Alsace ; les thèses de Robert Moretto (1984-1986) et de Alain Curial (1984-1986) sur le remplissage évaporitique du bassin de Bresse burgienne ; la thèse de Daniel Dumas (1985-1988) sur le Paléogène évaporitique du Bassin de Valence. Dans ces travaux fondamentaux, se trouvaient réutilisées ou évoquées les données réunies antérieurement par d'autres chercheurs de notre équipe : Y. Guillevin, G. Goy, D. Mas-

son, M. Kiener, D. Couilloud qui avaient déjà participé activement à nos travaux.

En janvier 1987, Georges Busson invitait Charlotte B. Schreiber — spécialiste d'évaporites de renommée internationale pour un examen des résultats ainsi obtenus sur les bassins évaporitiques paléogènes français. C.B. Schreiber, après étude des documents et rencontre de tous les chercheurs encore impliqués dans cet effort, concluait à l'opportunité de réaliser un volume de synthèse dont le projet a depuis lors été accepté par Columbia University Press. Depuis cette date, C. B. Schreiber a participé activement à la mise en œuvre des données obtenues et à la préparation de cet ouvrage, qui doit également intégrer certains des résultats dégagés par notre même équipe sur les milieux confinés actuels, ainsi qu'une description importante des bassins paléogènes évaporitiques du Nord de l'Espagne. Dans le cadre de la préparation de cette étude, des collaborations nouvelles ont été suscitées. Ainsi Jean-Marie

Fig. 1. - Carte schématique des évaporites (sulfate de Ca, halite et potasse) de l'Éocène supérieur et de l'Oligocène inférieur en France et au Nord de l'Espagne. En Bresse, le bassin le plus septentrional ne comportant pas d'évaporites n'a pas été figuré sur cette carte. D'après M.-M. Blanc-Valleron (1990-1991), fig. 161 modifiée.

Fig. 1. - Sketch map of the Late Eocene and Early Oligocene evaporites (Ca sulphate, halite, potassium) in France and northern Spain. In Bresse, the northernmost basin is not shown as it does not contain evaporites. After MM. Blanc-Valleron (1990-1991; Fig. 161 modified).



Rouchy a rédigé le manuscrit d'une synthèse sur le contexte structural et géologique de ces bassins évaporitiques paléogènes. Gilles Dromart, de son côté, rédigeait le chapitre sur le bassin de Valence à partir des données de Daniel Dumas.

Cependant, il ne m'a pas paru pensable que des recherches menées pour l'essentiel par des chercheurs français et intégralement financées par des fonds français ne reçoivent d'exploitation synthétique que sous la forme d'un ouvrage américain. J'ai donc décidé de rédiger, avec le concours permanent d'Annie Cornée, les pages qui suivent. Le choix des éléments retenus pour cette synthèse, les points de vue adoptés, les interprétations proposées relèvent entièrement de la responsabilité du rédacteur de ces lignes. Sur tel ou tel point de détail, toutes ne recueilleraient pas forcément l'adhésion de chacun des signataires.

I. Introduction

En France, les évaporites du Paléogène (fig. 1) sont connues depuis fort longtemps. De nombreux gisements de gypse — tels que ceux de la région parisienne — ont même été exploités des siècles avant que

naisse la stratigraphie et que, par conséquent, l'on connaisse leur âge paléogène. Quant à la présence d'épaisses couches de sel, elle a été décelée en Haute-Alsace, dès le tout début du siècle, ainsi que l'existence de deux intercalations potassiques, objet, depuis cette époque, d'une intense exploitation.

Les bassins salifères auxquels nous nous intéresserons dans ce texte sont ceux de Haute-Alsace, de Bresse du Sud et du Valentinois. Avant les recherches qui vont être évoquées ci-dessous, ces bassins avaient fait l'objet de prospections importantes et d'études scientifiques approfondies. Dès le milieu du siècle, les Mines de Potasse d'Alsace foraient en position relativement centrale le remplissage salifère de Bresse et du Valentinois. Grâce à un carottage continu, ces coupes ont fait l'objet de descriptions excellentes restées malheureusement en grande partie inédites. Les utilisateurs du sel gemme (Géostock, Rhône-Poulenc, etc.) ont également apporté des données précieuses, dans des aires parfois jusqu'alors peu reconnues. En dehors du bassin de Haute-Alsace, où l'immense majorité des données provient des MDP, l'exploration pétrolière a suscité les forages d'implantation la plus dense et relativement la mieux répartie. Certes, dans ces forages, les évaporites n'ont pas été carottées ; mais les diagraphies constituent une mine d'informations précises. Plus récemment, Gaz de France pour ses besoins de stockage

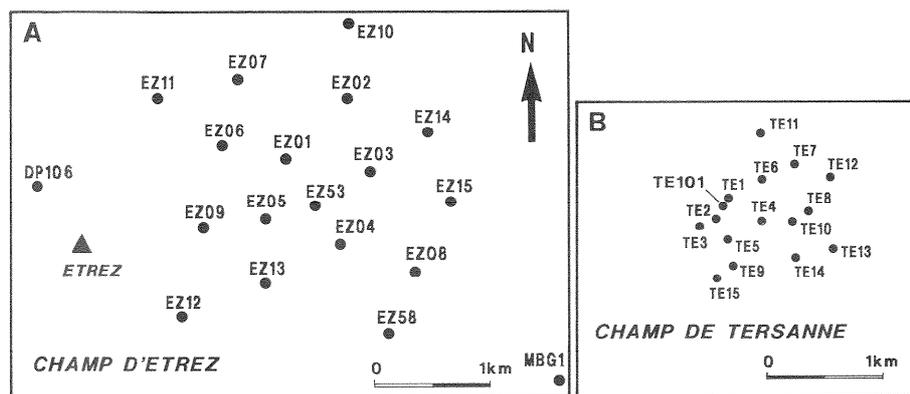


Fig. 2. - Carte d'implantation des sondages A) dans le champ d'Étrez (Bresse), B) dans le champ de Tersanne (bassin de Valence). D'après A. Curial (1986-1987), fig. 3 et D. Dumas (1988), fig. 2. Pour l'implantation de ces concessions voir les cartes de la figure 3.

Fig. 2. - Drill-hole site map A) in the Étrez field (Bresse), B) in the Tersanne field (Valence Basin). After A. Curial (1986-1987; Fig. 3) and D. Dumas (1988; Fig. 2). See Fig. 3 for location of the concessions.

souterrain de gaz liquéfié, a entrepris l'exploitation des concessions d'Étrez (en Bresse du Sud) et de Tersanne (dans le Valentinois). Sur ces deux champs localisés dans les dépôts-centres salins, un réseau de sondages dense (fig. 2), largement carottés et très complètement « loggés » a considérablement enrichi notre connaissance de ces bassins. Les sondages, ainsi rapidement et incomplètement évoqués ici, ont été évidemment précédés et complétés par un grand nombre de profils sismiques dont les études que nous présentons dans ce texte ont largement bénéficié, même si ces profils ne font pas ci-dessous l'objet d'une illustration.

La synthèse des connaissances sur le Paléogène du Sud-Est de la France, établie récemment à l'initiative du BRGM (Cavelier *et al.*, 1984), fournit une remarquable mise au point des études antérieures aux recherches de notre propre équipe. Elle nous évitera d'alourdir cet article de considérations historiques qui feraient double emploi avec cette mise au point.

La présente étude sur les bassins salins paléogènes de France n'est pas exhaustive. Nous n'y traiterons pas des bassins alsaciens de Sélestat, Pêchebron et Strasbourg, ni des bassins de Riom (Grande Limagne), de Vauvert (Camargue) (fig. 1). Nous n'évoquerons pas non plus la série salifère de Manosque, trop souvent intégralement attribuée au Tertiaire, alors que seule la partie la plus superficielle est d'âge paléogène, superposée à une épaisse série triasique (communication orale J.-M. Schlund). Notre choix a été dicté par le fait que tous ces bassins — absents de la présente étude — n'ont pas bénéficié de données aussi nombreuses, aussi denses, aussi précises que les trois bassins que nous envisageons ; ou que ces données n'aient pas été aussi bien conservées ; ou que ces bassins aient été plus tectonisés ou enfin que plusieurs de ces circonstances défavorables se soient trouvées réunies. Même réduit à la considération des trois bassins de Haute-Alsace, Bresse du Sud et Valentinois (fig. 3), un bref essai de synthèse nous a paru important de deux points de vue différents.

1) Les études universitaires — thèses en particulier — menées par notre équipe ont été entièrement alimentées par les données d'analyses apportées par les travaux de géologie appliquée (mines, profils sismiques, carottages et diagraphies, etc.). A l'égard des exploitants futurs, il nous a paru de notre devoir d'évoquer dans cet article quelques-uns des résultats de nos études, aux échelles les plus variées, et de faire connaître en même temps les références des mémoires où elles sont exposées en détail.

2) Le Paléogène, et plus particulièrement l'époque couverte par les étages Ludien et Stampien, correspond à une phase évaporitique de grande importance sur notre territoire national. Volumétriquement, ces sels occupent la seconde place — après ceux du Trias — et précèdent de loin les accumulations évaporitiques de toutes les autres époques de l'enregistrement géologique. La considération de ces trois principaux bassins salins, synchrones, nous a donc paru intéressante sur un plan fondamental et général. Les rapports et différences offerts par ces remplissages salins, dans des positions structurales et en contextes paléogéographiques différents, nous ont paru précieux pour tenter de mieux comprendre les conditions de genèse de ces dépôts. Ces conditions font encore l'objet d'après discussions dont l'origine marine ou continentale des saumures ne représente qu'un aspect... Dans le grand effort international entrepris pour mieux interpréter la genèse de ces faciès salins, il eut été regrettable de ne pas apporter le fruit des études opérées sur des bassins qui comportent des informations d'une richesse exceptionnelle, à l'échelle du monde entier, par leur abondance, leur densité et leur précision.

II. Aperçu méthodologique

Il ne saurait être question de passer en revue ici l'ensemble des méthodes d'observation, d'analyses et de mesures pratiquées au cours des études dont nous allons extraire quelques résultats (Blanc-Valleron, 1990-91 ; Curial, 1986-87 ; Dumas, 1988 ; Moretto, 1986-1987 ; Curial et Moretto, 1988 ; Curial et Moretto *in* Busson et Rouchy, 1987). Nous ne ferons qu'envisager quelques méthodes qui sans être réellement originales se sont avérées efficaces en fonction des données disponibles et des problèmes à traiter.

A. Exploitation sédimentologique des diagraphies

(Curial, 1986-1987, 1988 ; Curial et Moretto, 1988)

Dans chacun des bassins salifères étudiés, les diagraphies ont été utilisées pour analyser et quantifier les faciès principaux, en faire le cumul vertical dans chaque unité stratigraphique et exprimer ces cumuls en cartes (cartes en isolithes et en isopourcentages). Cette expression, très révélatrice pour les paléogéographies successives, n'est pas originale en elle-même. C'est son

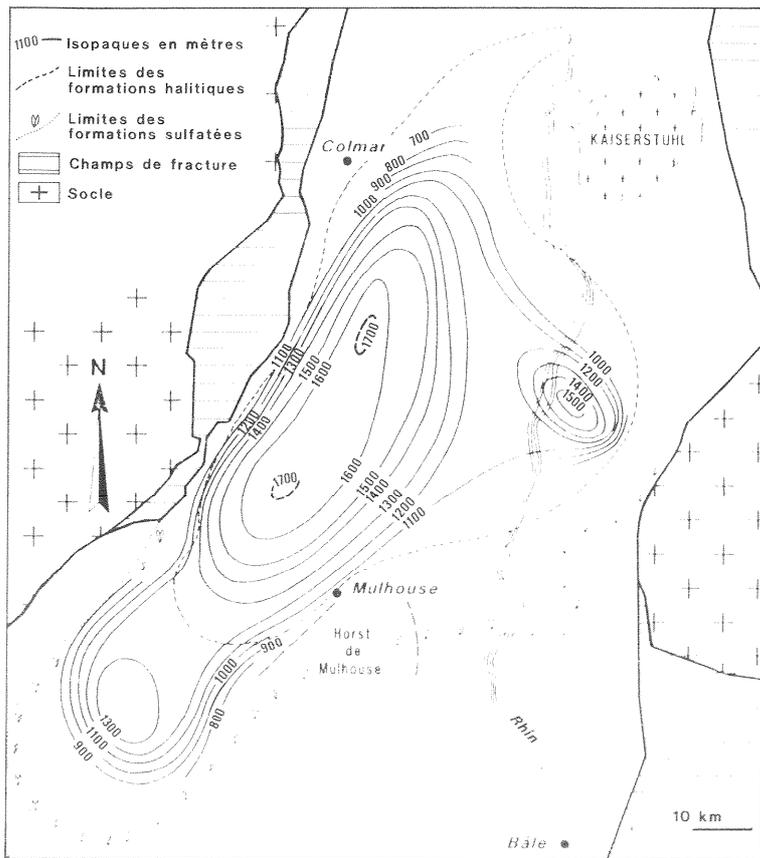


Fig. 3. A. - Carte des isopaques du Paléogène évaporitique (du mur des Marnes vertes à Linnées I au toit des Marnes sans sel) dans le bassin de Mulhouse. D'après les données de M.-M. Blanc-Valleron.

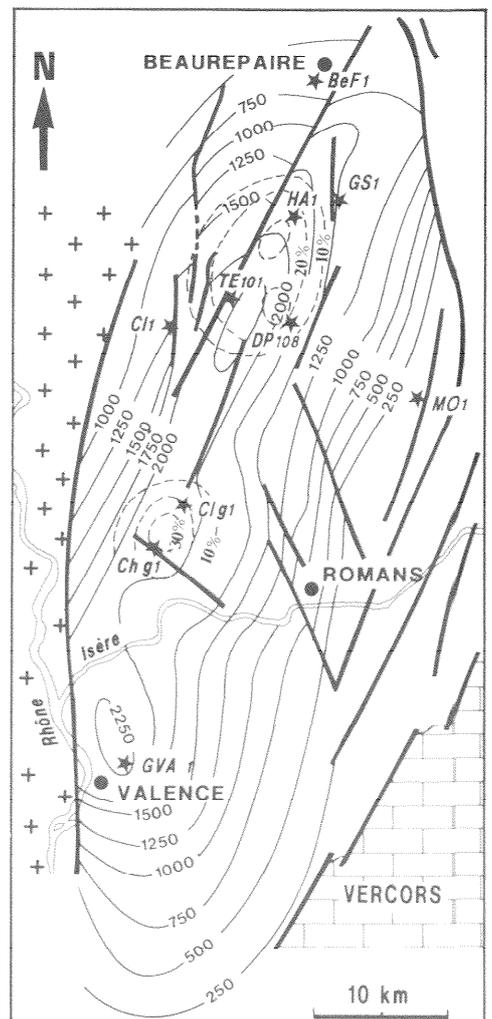
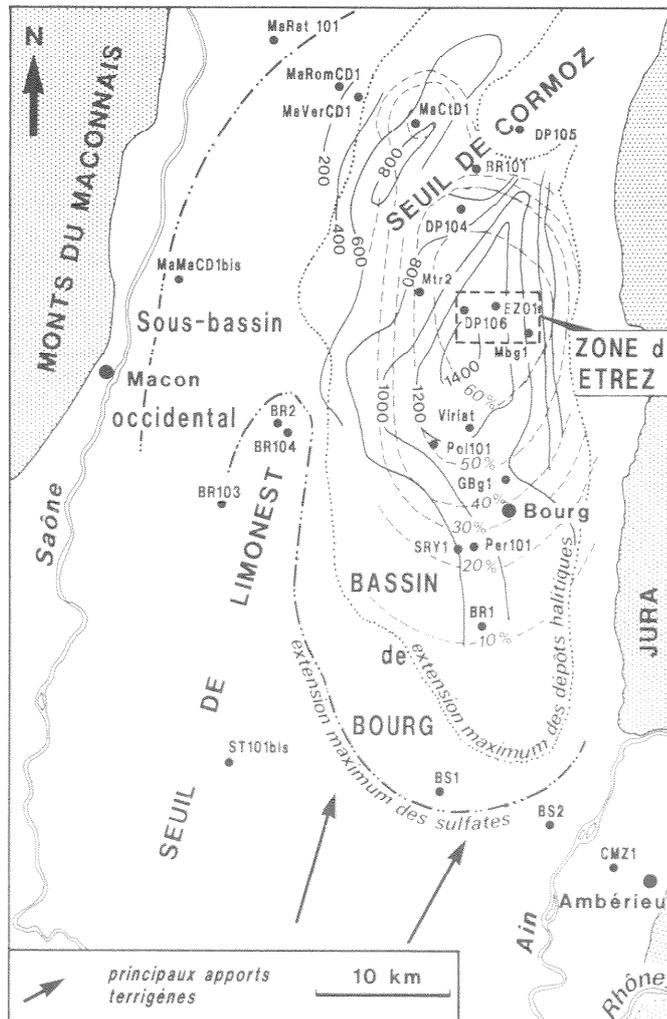
B. - Carte des isopaques du Paléogène évaporitique de Bresse et des isopourcentages de halite. D'après A. Curial et R. Moretto (en préparation) et G. Goy et G. Busson (1980), fig. B.14.

C. - Carte des isopaques du Paléogène évaporitique et des isopourcentages de halite du bassin de Valence. D'après D. Dumas (1988), fig. 14 et G. Goy et G. Busson (1980), fig. V.11.

Fig. 3. A. - Isopach map of the evaporitic Paleogene (from the Limnea I bearing green marl footwall to the non-saliferous marl hanging wall) in the Mulhouse Basin. After data provided by M.-M. Blanc-Valleron.

B. - Isopach map of the evaporitic Paleogene of Bresse showing halite isopercentage curves. After A. Curial and R. Moretto (in prep.) and G. Goy and G. Busson (1980; Fig. B.14).

C. - Isopach map of the evaporitic Paleogene in the Valence Basin showing halite isopercentage curves. After D. Dumas (1988; Fig. 14) and G. Goy and G. Busson (1980; Fig. V.11).



utilisation systématique qui est surtout à souligner. Les points qui vont être évoqués sont quant à eux relativement plus originaux.

1) L'évolution subtile d'un composant minéralogique au sein d'un ensemble pétrographique complexe

Le problème est de repérer, à l'aide des diagraphies habituelles (résistivité, neutron, sonic, densité), l'évolution subtile d'un composant quantitativement secondaire au sein d'un mélange. Par exemple, il est intéressant de déceler l'évolution géographique de l'importance relative de la phase argilo-carbonatée dans un intervalle, surtout salifère. La difficulté peut prendre sa source soit dans le fait que le constituant recherché est trop peu abondant pour se marquer de façon franche sur ces enregistrements, ou que son évolution ne soit que très légère dans le périmètre considéré, par exemple dans la concession d'Étrez (fig. 2).

Deux méthodes ont alors été utilisées avec succès. La première est dite du cut-off. On mesure, dans une unité stratigraphique donnée l'épaisseur de séries cumulées où la valeur de l'enregistrement dépasse un niveau-seuil ou cut-off. Par exemple pour déceler la direction d'un enrichissement subtil en anhydrite, dans une série salifère massive, on placera un niveau-seuil à 2,5 sur un log densité. Puis on mesurera, dans chacun des sondages, l'épaisseur cumulée de séries dont la mesure densité se situe au-dessus de ce niveau-seuil. La comparaison de ces épaisseurs cumulées révélera le sens et la direction géographique du gradient d'enrichissement relatif.

L'autre méthode utilisée dans nos bassins a consisté à mesurer l'épaisseur de la surface limitée par la courbe diagraphique ; cette surface pouvant être rapportée à l'épaisseur de l'intervalle considéré. Dans le périmètre de la concession d'Étrez, ces méthodes ont pu révéler l'évolution de constituants subtils (carbonates, anhydrite) dans un intervalle salifère tel que E5, là où l'exploitation classique des mêmes enregistrements n'avait rien révélé.

Si ces méthodes en elles-mêmes ne sont pas complètement nouvelles, le fait intéressant est constitué par la confrontation permanente des résultats, issus d'une part de l'étude de ces évolutions subtiles sur le champ très limité d'Étrez (où sont cantonnées les diagraphies abondantes et relativement modernes) et d'autre part de l'évolution plus importante, et parfois plus totale, qui s'observe à l'échelle de tout le bassin de la Bresse burgienne. Dans tous les cas, cette confrontation a révélé la pertinence des évolutions subtiles qui avaient été décelées.

2) Le SHDT et la structure du sel

Le SHDT (stratigraphic high resolution dipmeter tool), avec ses huit électrodes et son pas de mesure très fin (2,5 mm), s'est avéré un remarquable outil d'étude du sel (fig. 6 *in* Curial, 1986-1987). Les exemples fournis, ici encore dans le bassin de Bresse, ont démontré que l'on peut reconnaître dans une série salifère différentes structures de halite qui ne sont pas distinguables sur les enregistrements classiques. Le sel primaire, régulièrement zébré par des lamines même très fines, vi-

sibles dès qu'elles dépassent quelques millimètres, argilo-carbonatées (plus conductrices que la halite), se repère nettement, chaque lamine se marquant au même niveau sur chaque courbe de résistivité ; sous réserve du moins que l'anhydrite ne soit pas trop abondante, ce qui diminuerait le contraste de résistivité avec la halite. À l'autre extrême, le sel phénoblastique présente un contraste frappant : les limites entre les phénoblastes de halite et les plages intercrystallines argilo-carbonatées sont rencontrées aux niveaux les plus divers par les différents patins et chacune des courbes présente donc des variations très fortes et sans corrélation les unes avec les autres. On conçoit également qu'une halite limpide, épaisse, d'origine secondaire, se marque de façon contrastée avec les deux exemples ci-dessus évoqués.

De la même façon, la présence d'anhydrite dans une série argileuse ou carbonatée, en épaisseur trop faible pour se marquer nettement sur une diagraphie classique, pourra s'observer fort bien sur un SHDT. On a même pu différencier une fine couche d'anhydrite se marquant au même niveau sur chaque enregistrement, de nodules isolés, recoupés seulement par un certain secteur du sondage et ne se marquant que sur un ou sur une partie des enregistrements (fig. 10 *in* Curial, 1986-1987).

Le SHDT peut ainsi permettre de quantifier, sur tout l'intervalle parcouru par un run, les espaces verticaux correspondant aux différents sels : sel lité primaire, sel phénoblastique, sel diagénétique plus tardif, etc.

3) Les diagraphies géochimiques

Ces enregistrements qui sont parmi les derniers-nés, ont amené des résultats remarquables en Bresse. Ainsi, le coefficient d'absorption photo-électrique ou P_e (LDT), en évaluant la présence de strontium, a permis de repérer l'existence de célestine dans une série où ce minéral avait pu passer inaperçu, même sur carotte (fig. 12 *in* Curial, 1986-1987). Les travaux en cours (Curial et Moretto) sur la confrontation entre les données de diagraphies évaluant Th, K et U d'une part, et d'autre part un grand nombre d'analyses minéralogiques, pétrographiques et géochimiques sur carottes, affinent considérablement l'interprétation du spectral-log (*cf.* § III. B. 2). Dans les séries de Bresse, sans entrer dans le détail, disons que le thorium s'avère un excellent instrument d'évaluation de l'argilosité et, plus précisément, des argiles détritiques ; l'uranium, un marqueur du confinement...

B. Les inclusions fluides et les teneurs en brome, potassium et magnésium du sel

L'étude des teneurs en brome de la halite, mesurées sur roche globale, et en adoptant un coefficient de partition expérimentale, est utilisée par tous les spécialistes du sel depuis plusieurs décennies. Dans nos bassins paléogènes salifères, plusieurs de nos études ont tiré parti de ces mesures brutes, soit pour caractériser les variations de concentration de la saumure pendant les cycles élémentaires du sel, soit pour caractériser des variations qui s'observent à l'échelle de formations entières et quelquefois en coïncidence remarquable

avec les variations palynologiques (cf. *infra* et fig. 4 et fig. 107 in Schuler, 1988-1990).

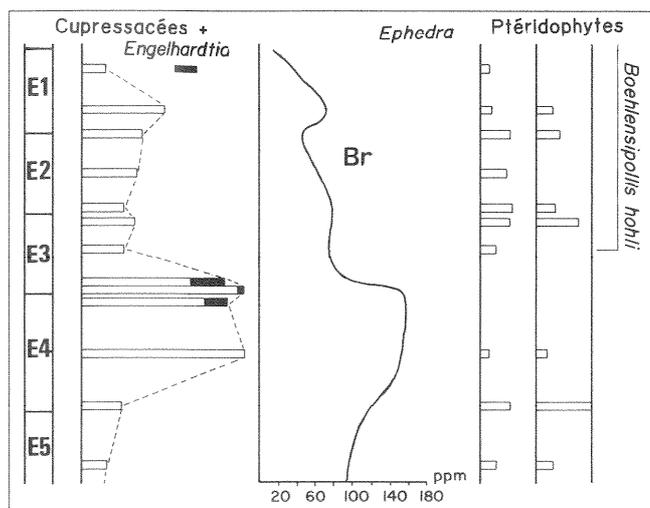


Fig. 4. - Distribution verticale des Cupressacées et d'*Engelhardtia* comparée à la courbe de distribution du brome dans la série salifère d'Etrez. Les pourcentages des spores de pteridophytes et de pollens d'*Ephedra* sont également mentionnés. D'après R. Moretto (1986-1987), fig. 66. Les données palynologiques sont dues à M. Schuler.

Fig. 4. - Vertical distribution of Cupressaceans and *Engelhardtia* against the bromine distribution curve in the Etrez salt series. The percentages of Pteridophyte spores and *Ephedra* pollen are also shown. After R. Moretto (1986-1987; Fig. 66). The palynological data were provided by M. Schuler.

Mais il faut évoquer ici des recherches à caractère plus fondamental, menées en particulier par R. Moretto (1986-1987, 1988 ; Curial et Moretto, 1988). Dans un premier temps, cet auteur s'est intéressé, classiquement, aux teneurs en brome de la halite dans le but de remonter aux salinités des saumures-mères et de chercher à préciser l'origine marine ou continentale de ces eaux. Mais, il a rapidement étendu ses études à l'examen conjoint des teneurs en potassium et en magnésium, adoptant une démarche qui s'est avérée particulièrement fructueuse. R. Moretto est parti d'une constatation simple : les inclusions fluides sont riches en ces éléments-traces ; mais elles ont toute chance d'être à la fois inégalement riches (suivant la halite considérée) et très inégalement abondantes (suivant le type de halite, laiteuse ou limpide, cf. *infra*). Par conséquent, la mesure d'un échantillon brut globalise les teneurs en ces éléments à la fois du réseau cristallographique de la halite et, d'autre part, des inclusions fluides piégées dans ce réseau. R. Moretto s'est efforcé de séparer et d'évaluer ces deux contributions.

Dans un premier temps il a procédé au broyage à sec d'échantillons de halite, le broyat étant séché puis analysé. Mais lors du séchage, une partie importante du stock ionique des inclusions précipitait et s'ajoutait au sel. R. Moretto a donc procédé à un rinçage à l'alcool des saumures aussitôt après leur broyage. Le pourcentage d'élimination (c'est-à-dire le rapport entre les teneurs en éléments-traces mesurés sur échantillons rincés aux valeurs obtenues sur échantillons broyés à sec) s'est avéré particulièrement élevé pour les halites laiteuses qui tiennent ce faciès de leur richesse en inclusions fluides : le pourcentage a pu s'élever par exemple

à 75 % pour le Mg. R. Moretto a alors pris conscience du fait que l'échauffement causé par le broyage entraînait évaporation et par conséquent précipitation ; c'est-à-dire le passage indésirable d'une partie des ions des saumures à la halite. Dès lors, il a broyé les échantillons de sel dans l'alcool, évitant l'échauffement, l'évaporation et la précipitation à partir des saumures libérées par l'opération.

Grâce à cette méthodologie efficace les éléments-traces ont pu être localisés. Une série d'analyses sur des échantillons ayant subi des temps de broyage progressifs démontre que l'élimination des trois éléments-traces mesurés (K, Mg, Br) se fait de façon linéaire ; les inclusions fluides — même les plus petites — étant de plus en plus complètement libérées. Par ailleurs, la halite limpide (très pauvre en inclusions fluides) contient très peu de Mg qui ne rentre pas dans le réseau cristallographique du minéral et, dans ce type de halite, les teneurs en K et Br mesurées après broyage à sec sont peu modifiées en opérant dans l'alcool. Au contraire, dans le cas de halites laiteuses, le broyage dans l'alcool élimine une proportion considérable du Mg, jusqu'à 90 % de ce qui a pu être mesuré sur roche globale. Grâce au caractère linéaire de l'élimination de chacun des éléments, on peut évaluer les teneurs en K et Br du minéral halite correspondant à l'extrapolation du Mg = 0. On aurait alors les teneurs vraies du minéral en K et Br.

Ces études ont démontré combien il est illusoire et même fallacieux de chercher à remonter à la salinité de la saumure-mère par une mesure des teneurs en brome de la roche totale et par application du coefficient de partition. Un exemple d'application est à la fois significatif et de portée importante. La méthodologie mise au point permet de départager dans une halite laiteuse les ions des inclusions et ceux du minéral ; ce faisant, on a constaté que dans une même couche les teneurs en brome du minéral halite d'un sel laiteux (primaire) et les teneurs de halite limpide (diagénétique) sont très proches. Cette égalité ne peut être fortuite : elle signifie que ces deux types de halite ont été précipités à partir de saumures identiques ou à partir d'une seule et même saumure et que, par conséquent, la halite diagénétique est, dans ce cas, extrêmement précoce. Ce dernier fait sera d'ailleurs corroboré dans certains cas par des observations pétrographiques (cf. *infra*).

Le même auteur exploite cette méthodologie géochimique des éléments-traces pour arriver à une meilleure estimation du pourcentage représenté par les inclusions fluides dans le sel, pour une évaluation de la composition des saumures chimiques piégées et pour une évaluation des quantités de fluides susceptibles d'être mis en mouvement.

III. Descriptions

A. Coupes-types et généralités sur chaque bassin

1. Le bassin de Mulhouse (Blanc-Valléon, 1990-1991)

En Alsace, quatre bassins contiennent des évaporites dans les remplissages ludien et stampien (Mul-

house, Sélestat, Strasbourg et Pechelbronn) et sont localisés sur les cartes ci-jointes (fig. 3 et 5). Le premier, au sud du seuil de Colmar, le plus méridional, est le plus riche et il est le seul où la densité des informations (sondages, mines, sismique) a permis une étude de détail. Les extensions résiduelles approximatives sont les suivantes : couches potassiques de l'ordre de 500 km², halite 1 000 km². L'épaisseur maximale est d'environ 1 700 m.

L'unité pré-salifère (fig. 6), discordante sur le substratum jurassique, comprenant notamment le « Sidérolithique » est d'âge éocène moyen (et peut-être inférieur). L'épaisseur mesurée dans les sondages est extrêmement variable (4 m près de Colmar jusqu'à 120 m au centre du bassin) ; mais elle peut comprendre *pro parte* une certaine puissance de couches jurassiques altérées, voire de formations karstiques au sein de calcaires jurassiques — comme cela apparaît sur les affleurements allemands —. Lithologiquement, les

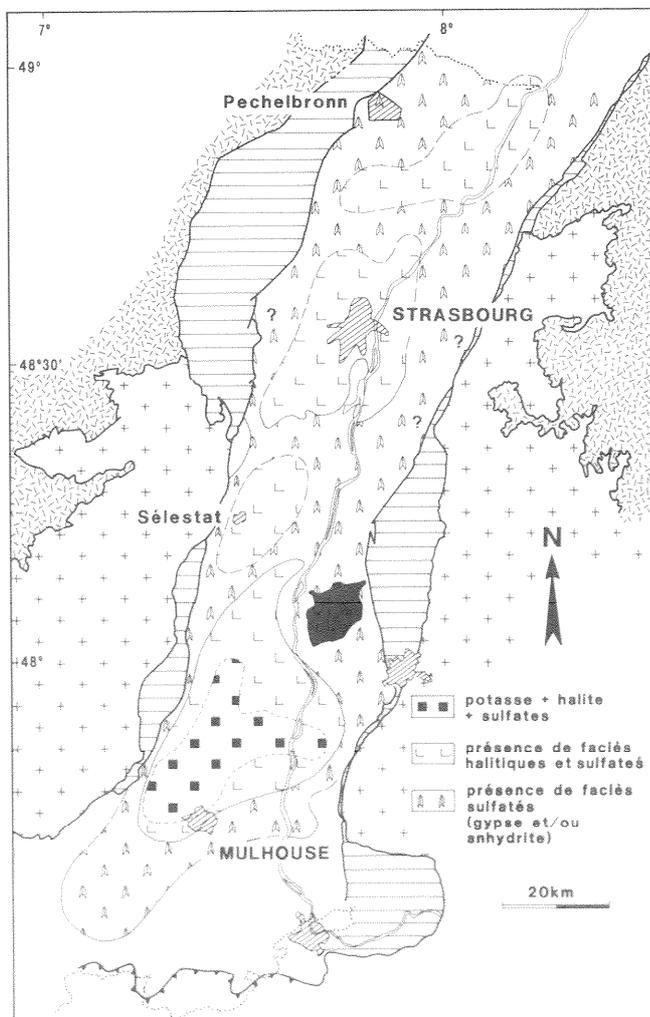


Fig. 5. - Carte des évaporites d'âge Éocène supérieur - Oligocène inférieur dans la partie sud du fossé rhénan (Alsace et territoires germaniques voisins). D'après M.-M. Blanc-Valleron (1990-1991), fig. 16 modifiée.

Fig. 5. - Map of Late Eocene - Early Oligocene evaporites in the southern part of the Rhine trough (Alsace and neighbouring German territory). After M.-M. Blanc-Valleron (1990-1991; Fig. 16 modified).

brèches et conglomérats existent à la base de cette formation et tendent à envahir les séries marginales. Ils sont surmontés de couches argileuses et argilo-gréseuses, bariolées, rouges, violacées, de type sidérolithique avec calcaires noduleux à *Planorbis pseudo-ammonius*. Dans la future partie la plus centrale, la plus épaisse du bassin salifère, existent dans ce Sidérolithique des nodules anhydritiques interprétées par M.-M. Blanc-Valleron (1990-1991) comme des formations *per descensum*. Il existe également dans ces parties centrales des couches argileuses, calcaires, bitumineuses. Celles-ci démontrent l'installation précoce d'un système à deux corps d'eau, dans les zones les plus éloignées des apports terrigènes, au sommet de cette formation présalifère.

Le Salifère inférieur, d'âge ludien, débute par les « Marnes vertes à Limnées I ». Les couleurs grises et vertes évoquent des milieux plus profonds que ceux des couches bariolées sous-jacentes. Ces marnes sont en général homogènes, plus rarement feuilletées, quelquefois bitumineuses. On y a signalé des grains calcaires détritiques, de l'anhydrite sous forme de nodules, plus rarement de strates, de la pyrite et des débris ligniteux. La faune présente est dulçaquicole. L'épaisseur de la formation ne dépasse pas 150 m.

Au-dessus, le Salifère I comprend d'abord le « grand banc de sel gemme » dont l'épaisseur peut atteindre 200 m. Au-dessus, sur une épaisseur du même ordre, il y a alternance de bancs de halite, parfois bitumineuse, jaunâtre à noire et d'aspect général hyalin et de marnes. Au nord de la concession des MDP, les Marnes vertes à Limnées II (fig. 7), très proches des MVL1, s'intercalent, de bancs halitiques. Des mélanies y ont été signalées et l'épaisseur de la formation peut atteindre 150 m. Le Sel II (fig. 8) présente sur une épaisseur atteignant 150 m, une alternance de couches de halite (50 % du total) de marnes et d'anhydrite. La halite est fréquemment striée de marnes et d'anhydrite en rognons et en strates, plus abondante que dans le Sel I.

Le Salifère moyen comprend d'abord le Sel III (environ 220 m) où la halite alternant avec les marnes représente jusqu'à 60 % de l'épaisseur totale (fig. 9). L'anhydrite atteint 10 à 15 %, en épaisseur cumulée, au centre du bassin. Les marnes sont gris foncé ou gris brunâtre, parfois laminées par des lits dolomitiques et peuvent être bitumineuses. Certaines intercalations contiennent une faune de mollusques, dont des Mytilidés. Ce Sel III passe latéralement à des formations conglomératiques vers la faille rhénane et aux « Calcaires à Mélanies » sur le horst de Mulhouse.

Au-dessus, débute la série stampienne avec la Zone fossilifère dont le premier membre, les « Marnes en plaquettes », est épais de 60 m. Ce sont des marnes gris brunâtre, avec filets d'anhydrite et comprenant encore des fossiles saumâtres ou marins. Au-dessus, des Marnes à Hydrobies (20 m) sont également caractérisées par des ostracodes et des Gammaridés. Ce dernier membre, fait de marnes homogènes, grises, brun verdâtre, avec baguettes et nodules de pyrite forme un bon repère diagraphique et son toit constitue un réflecteur sismique précieux, non seulement dans le bassin de Mulhouse, mais sur l'ensemble du fossé rhénan.

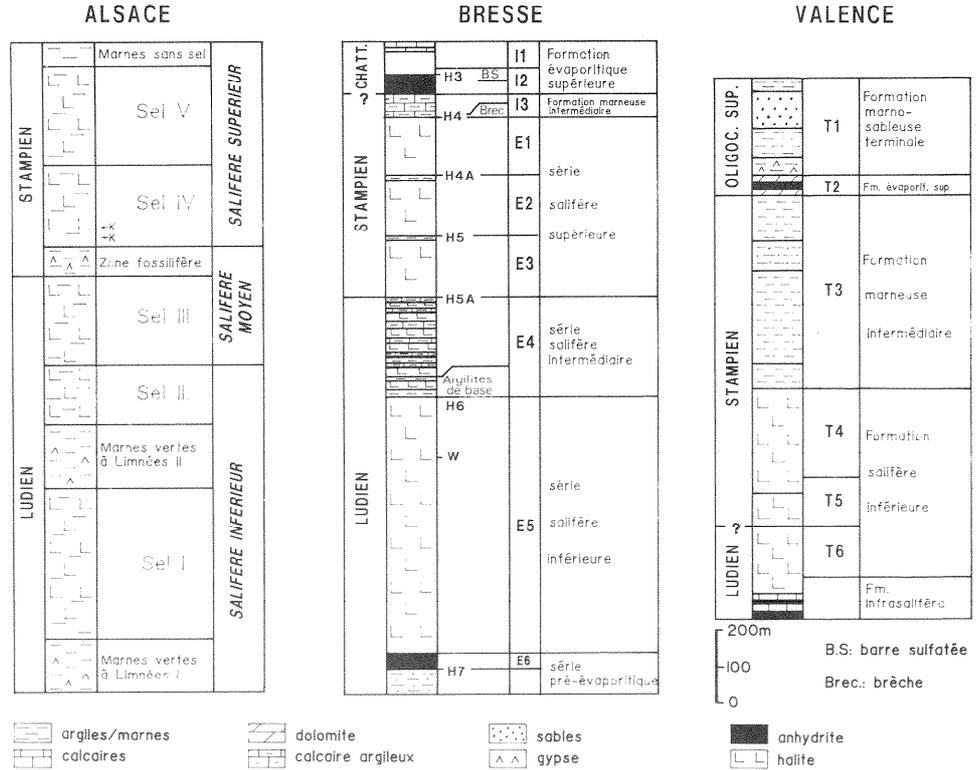


Fig. 6. - Coupes types des bassins évaporitiques paléogènes de Mulhouse, Bresse et Valence. D'après M.-M. Blanc-Valleron (1990-1991), fig. 17 modifiée, A. Curial et R. Moretto (en préparation), fig. 3 modifiée et D. Dumas (1988), fig. 11 modifiée.
 Fig. 6. - Type sections through the Mulhouse, Bresse and Valence Paleogene evaporite basins. After M.-M. Blanc-Valleron (1990-1991; Fig. 17 modified), A. Curial and R. Moretto (in prep.; Fig. 3 modified) and D. Dumas (1988; Fig. 11 modified).

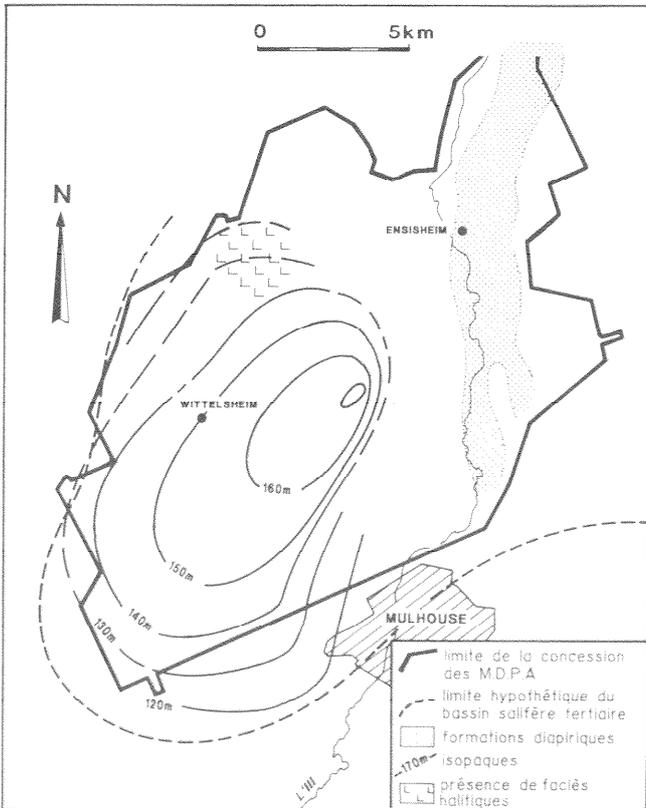


Fig. 7. - Carte en isopaches des Marnes vertes à Linnées II dans le bassin de Mulhouse, limitée à la concession des M.D.P.A. Noter l'intercalation de halite vers le NW du domaine couvert. D'après M.-M. Blanc-Valleron (1990-1991), fig. 70.

Fig. 7. - Isopach map of the Limnea II green marls in the M.D.P.A. concession of the Mulhouse Basin. Note the intercalation of halite in the northwest of the covered area. After M.-M. Blanc-Valleron (1990-1991; Fig. 70).

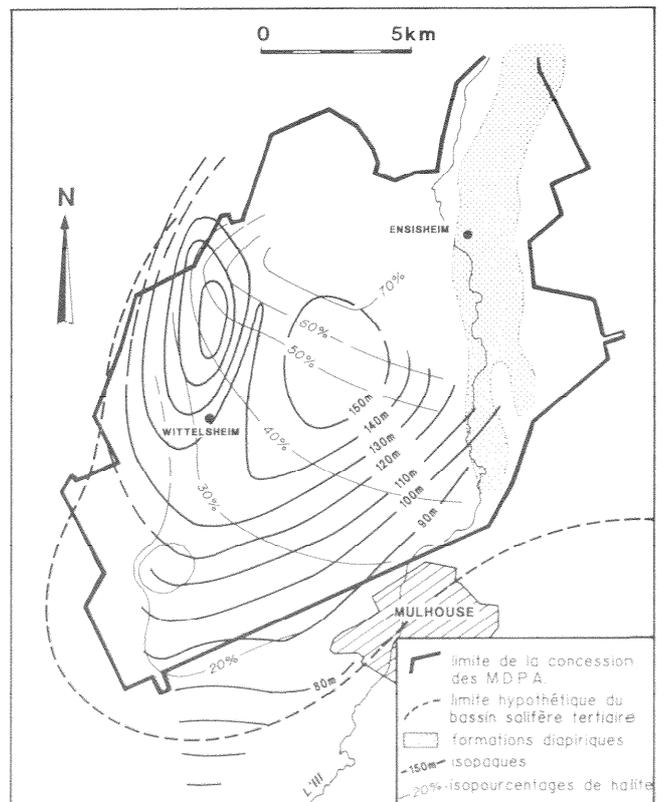


Fig. 8. - Carte en isopaches du Sel II et isopourcentages de halite dans la concession des M.D.P.A. (bassin de Mulhouse). On notera la coïncidence des valeurs élevées d'isopourcentage de halite avec les épaisseurs fortes. D'après M.-M. Blanc-Valleron (1990-1991), fig. 72 et 73.

Fig. 8. - Isopach map of "Sel II" (Salt II) in the M.D.P.A. concession (Mulhouse Basin) showing halite isopercentage curves. Note the coincidence of high salt values and large thicknesses. After M.-M. Blanc-Valleron (1990-1991; Figs. 72 and 73).

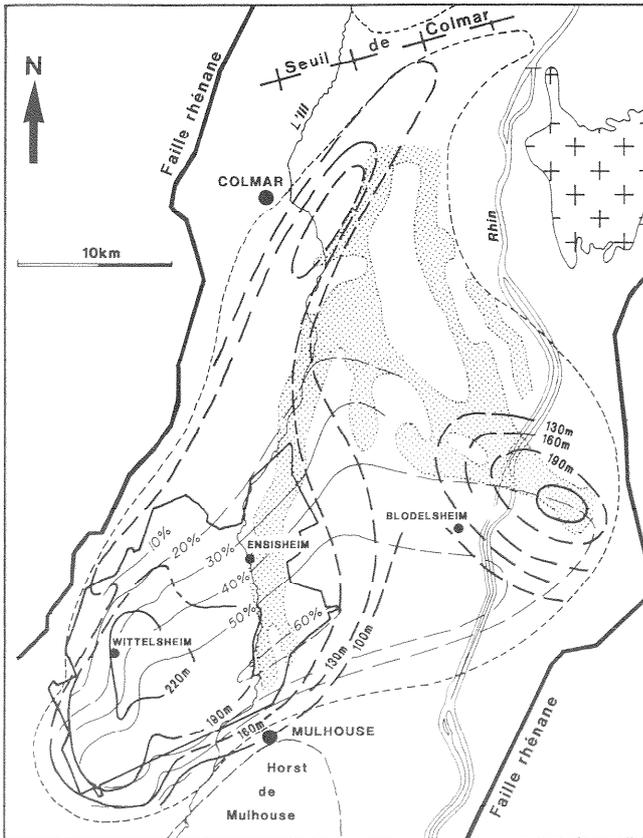


Fig. 9. - Carte en isopaques du Sel III et isopourcentages de halite dans le bassin de Mulhouse. Il y a décalage entre les valeurs d'isopourcentage de halite élevées et la localisation de la zone la plus épaisse. D'après M.-M. Blanc-Valleron (1990-1991), fig. 91 et 93 modifiées.

Fig. 9. - Isopach map of "Sel III" (Salt III) in the Mulhouse Basin showing halite isopercentage curves. Note the offset between the high salt values and the location of the thickest zone. After M.-M. Blanc-Valleron (1990-1991; Figs. 91 and 93 modified).

Cette Zone fossilifère contient une association de coccolithophoridées peu diversifiée permettant de dater ces couches de l'intervalle des zones NP21-NP22.

Le Salifère supérieur comprend d'abord le Sel IV, épais de 140 à 230 m (fig. 10). C'est une alternance de bancs de halite (successivement appelé S1 MI, TI, MS, TS, U1, U3... U33), de marnes (successivement S2, S, T, U, U2... U32) et de potasse (une couche inférieure Ci et une couche supérieure Cs) qui constitue l'objet de l'exploitation (Courtot *et al.*, 1972). Les marnes gris foncé à gris brun sont laminées, parfois même varvéées, à certains niveaux bitumineuses. A la partie inférieure de la formation, l'anhydrite, peu abondante, se présente uniquement en filets ou en strates. Au contraire à la partie supérieure du Sel IV, l'anhydrite est en rognons.

Au-dessus, le « Sel V » (épais de 200 à 300 m) est formé des alternances U34 à U111 + 4 de halite et de marnes. Enfin les « Marnes sans sel » ou « Marnes bigarrées à gypse » des anciens auteurs représentent le dernier terme des dépôts évaporitiques stampiens, qui sont surmontés par des couches marines, rapportées d'ailleurs au même étage (Marnes à Foraminifères, Couches à Mélettes, etc.). A la périphérie du bassin, ces Marnes sans sel recouvrent directement une grande partie des bancs du Sel V tronqués à leur mur, voire une partie du Sel IV.

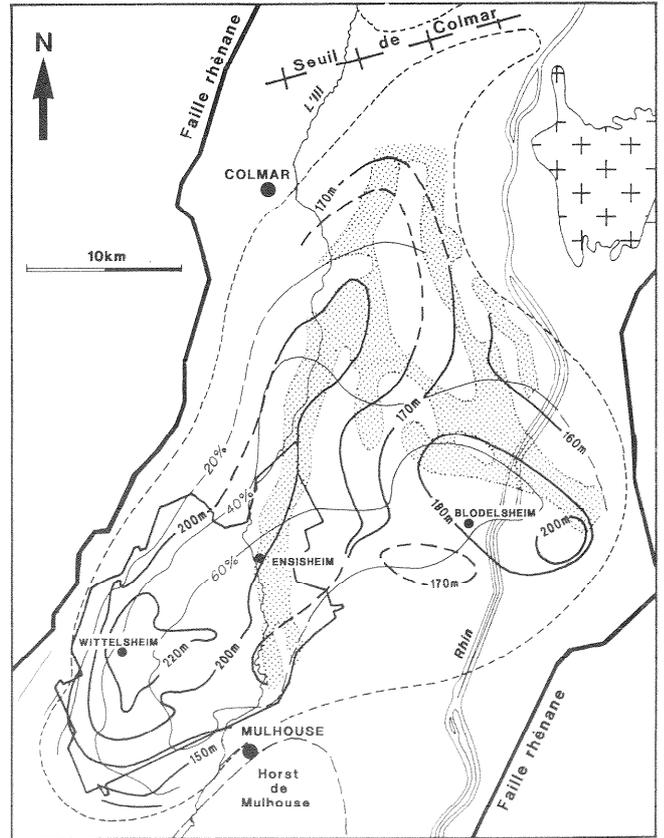


Fig. 10. - Carte en isopaques du Sel IV et isopourcentages de halite dans le bassin de Mulhouse. On retrouve un décalage entre isopaques et isopourcentages de halite. D'après M.-M. Blanc-Valleron (1990-1991), fig. 113 et 115 modifiées.

Fig. 10. - Isopach map of "Sel IV" (Salt IV) in the Mulhouse Basin showing halite isopercentage curves. Note the offset between the isopachs and halite isopercentages. After M.-M. Blanc-Valleron (1990-1991; Figs. 113 and 115 modified).

Ce bassin de Haute-Alsace, à la différence de ceux de Bresse burgienne et de Valence, s'avère localement affecté de diapirisme. On ignore dans quelle mesure les zones ainsi déformées présentaient à l'origine les mêmes faciès et les mêmes épaisseurs que la partie restée stratifiée et correspondant en particulier à la concession des MDP.

2. La Bresse burgienne

(Curial, 1986-1987 ; Moretto, 1986-1987)

Trois bassins paléogènes sont connus en Bresse (fig. A). Mais seul le plus méridional, celui de Bresse burgienne, comporte un remplissage évaporitique épais (fig. 3 et 6). Il y a là une analogie intéressante avec les bassins d'Alsace. Dans ce bassin de Bresse burgienne, la halite résiduelle s'étend sur une cinquantaine de kilomètres du nord au sud et une quinzaine de l'est à l'ouest. Par ailleurs, dans ce bassin les sédiments détritiques occupent une place importante : en provenance du sud et de l'ouest, ils ont repoussé le dépôt-centre salin dans la zone nord-est du bassin où la halite est bien représentée dans le champ de stockage d'Étrez. C'est là que sera reprise la coupe-type avec les unités délimitées par les principaux marqueurs repérables sur les profils sismiques et sur les diagraphies (fig. 6 et 11).

Le bassin de Bresse burgienne est remarquable par sa dissymétrie (fig. 12) : abrupt vers l'est, il monte en

Fig. 12. - Bloc-diagramme des bassins paléogènes bressan et valentinois montrant leur organisation similaire en une fosse salifère dissymétrique, bordée du côté de son flanc le moins abrupt par un horst de direction N 20, puis par un sous-bassin comblé par des sédiments détritiques. De part et d'autre du seuil lyonnais de direction N 50, cette disposition est inversée : en Bresse, la fosse salifère est située à l'est et, dans le bassin de Valence, elle est plaquée à l'ouest contre le Massif central. D'après D. Dumas (1988), fig. 105.

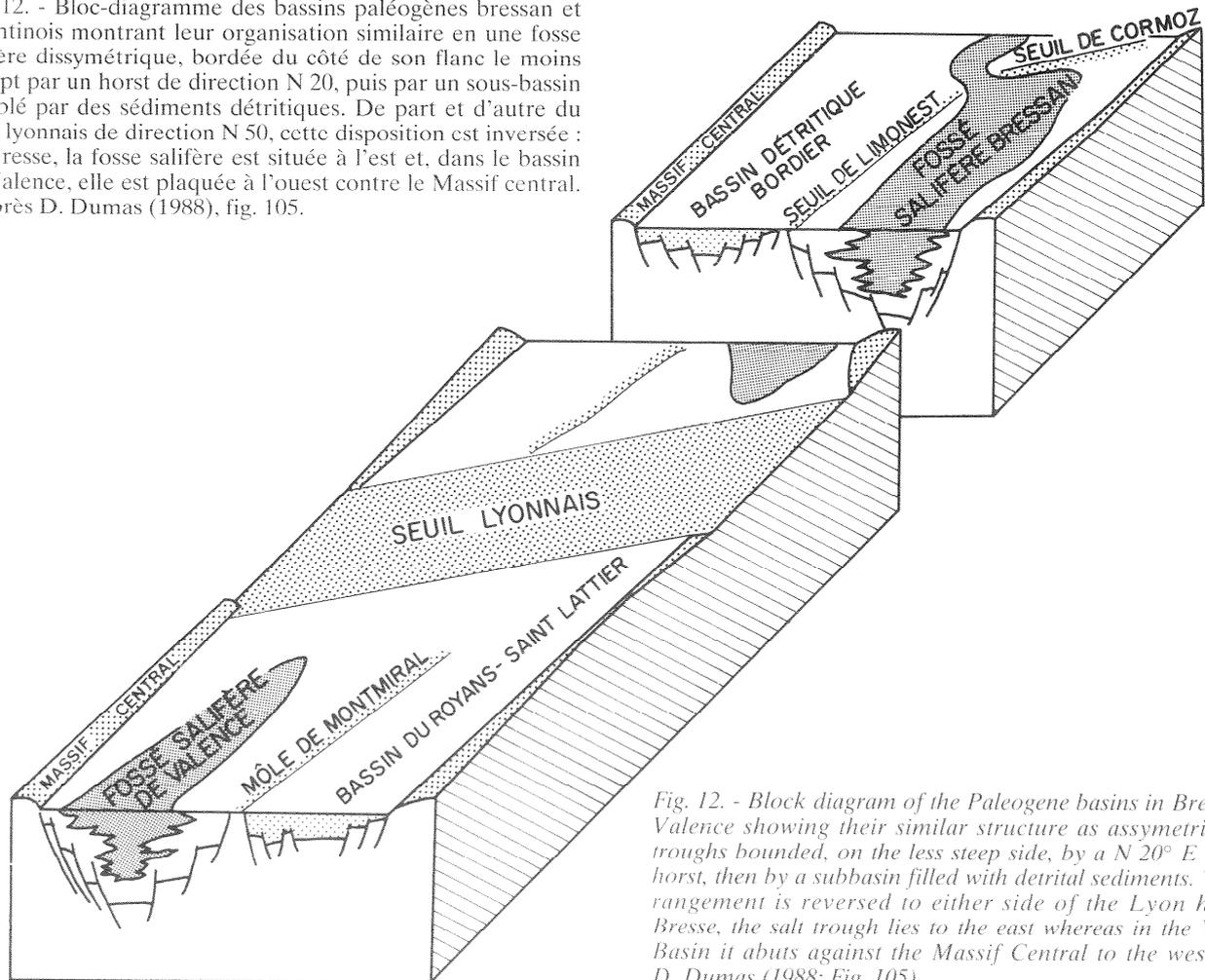


Fig. 12. - Block diagram of the Paleogene basins in Bresse and Valence showing their similar structure as asymmetrical salt troughs bounded, on the less steep side, by a N 20° E striking horst, then by a subsbasin filled with detrital sediments. This arrangement is reversed to either side of the Lyon high: in Bresse, the salt trough lies to the east whereas in the Valence Basin it abuts against the Massif Central to the west. After D. Dumas (1988; Fig. 105).

pente douce vers l'ouest où il est limité par le « seuil » de Limonest qui le sépare d'un petit bassin marginal, capable d'avoir piégé des apports détritiques éventuels en provenance du Massif central.

Le Paléogène, discordant sur le Crétacé inférieur, est d'abord fait de sables parfois glauconitiques et d'argiles qui sont surmontés par la « formation E6 » comprenant des argiles et de l'anhydrite (35 m) (cf. fig. 13). A ces formations présalifères, se superpose le Salifère inférieur ou formation E5 (600 m) qui représente l'épisode d'extension maximum du sel (cf. fig. 13). La halite qui présente de fortes croissances diagénétiques, oblitérant les structures de dépôt, forme 80 % de la formation. Il s'y ajoute de l'anhydrite nodulaire, de l'argile et des carbonates. Cette unité est d'âge ludien.

Au-dessus la « Formation intermédiaire » correspond à l'unité E4, épaisse d'environ 200 m et représenterait la partie supérieure et terminale du Ludien et la base du Stampien. La période correspondante est marquée par une recrudescence intermittente des apports détritiques méridionaux, s'épandant jusque dans l'aire saline. Elle a dû être aussi marquée par une augmentation de la tranche d'eau permettant une stratification des eaux et la préservation de la matière organique.

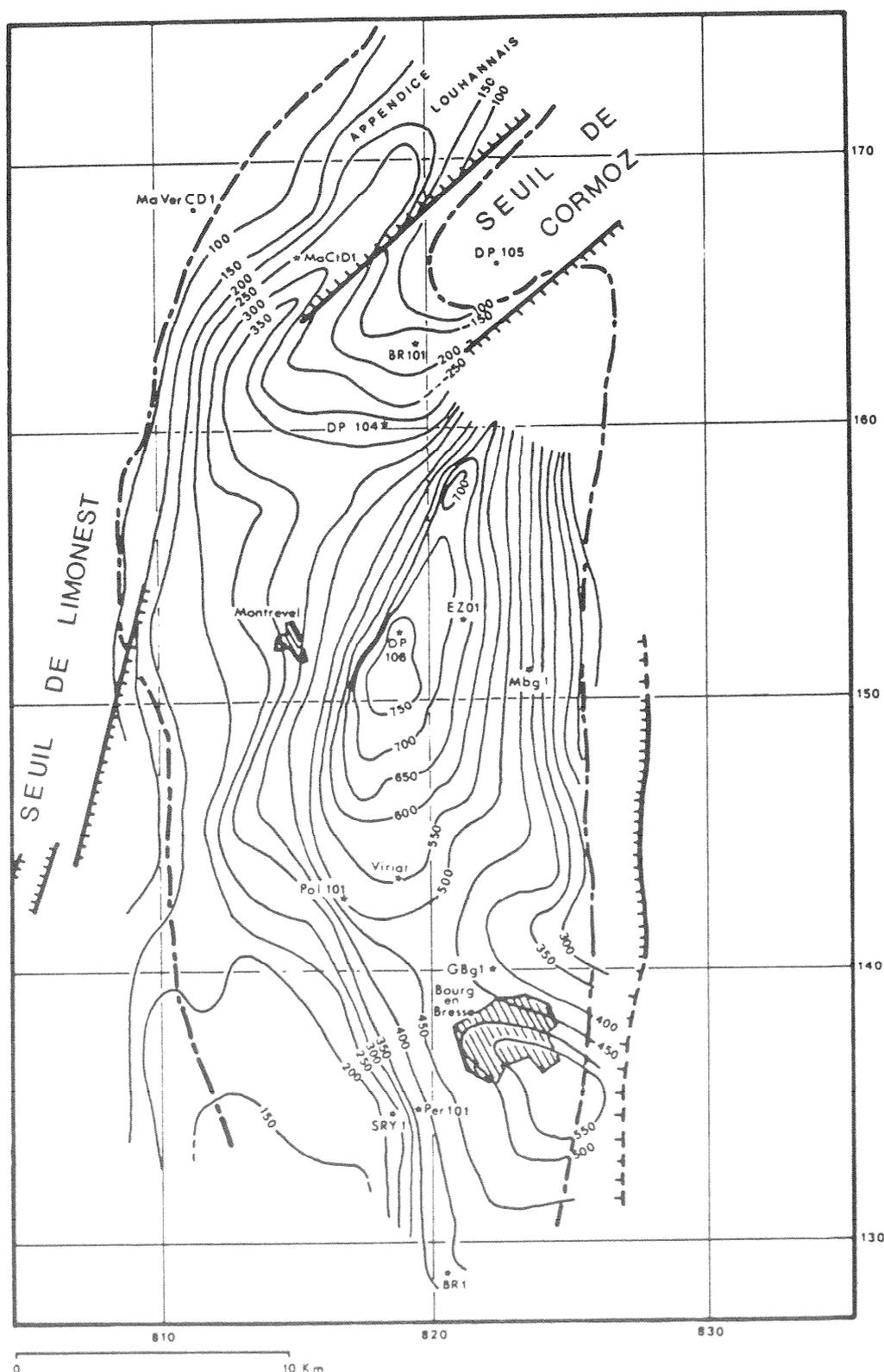
E4 correspond à une alternance de bancs métriques ou décimétriques d'argilites et de carbonates avec des bancs de sel (50 à 60 % du total), caractérisés par la

fréquence des structures en trémies et en chevrons. On a appelé Argilite de base la partie inférieure du E4 (banc 20 à 25) où des couches surtout argileuses, métriques ou plurimétriques (bancs de 1 à 10 m) alternent avec du sel très propre et de puissance comparable. Au-dessus, les bancs 1 à 19 sont caractérisés par l'alternance de halite laiteuse et d'insolubles où les carbonates consistent généralement en calcaires peu argileux, souvent finement laminés et présentent des débris végétaux. L'anhydrite est, en général, liée aux horizons argilo-carbonatés.

La Formation salifère supérieure (fig. 14) d'âge Stampien, débute par l'unité E3 (450 m). A cette époque, le sel se réduit à la partie septentrionale du bassin. La halite formant 70 % du total y est principalement d'origine primaire et admet des intercalations de carbonates laminés. Au-dessus, les unités E2 et E1 comportent 80 % de halite à structures secondaires, recristallisée. L'unité E2 pendant laquelle le sel reconquiert la partie centrale du bassin est caractérisée par le minimum d'insolubles (carbonates et argiles), mais par contre présente une quantité notable d'anhydrite nodulaire. Pendant l'unité E1, s'opère une certaine remontée de la région du « seuil » de Cormoz. Celle-ci provoque, conjointement, un arrêt des apports détritiques méridionaux, un déplacement de l'aire sédimentaire vers le sud, avec déplacement concomitant du sel et enfin des surfaces de dissolution syn-sédimentaire par-

Fig. 13. - Carte en isopaques de la série salifère inférieure et de ses équivalents latéraux dans le bassin de Bresse (Formations E6 et E5, comprises entre les repères H6 et H7), tenant largement compte des données de sismique proposées par C. Leroy (1984, in Curial, 1986-1987). En tiretés, limite supposée de l'extension des faciès salifères. D'après A. Curial (1986-1987), fig. 59.

Fig. 13. - Isopach map of the lower salt series and its lateral equivalents in the Bresse Basin (formations E6 and E5 contained between markers H6 and H7) largely taking account the seismic data proposed by C. Leroy (1984, in Curial, 1986-1987). Dashed line: presumed limit of the salt facies. After A. Curial (1986-1987; Fig. 59).



ticulièrement marquée dans la partie septentrionale. Aussi, cette unité est-elle caractérisée par des variations d'épaisseur spectaculaires (de 110 à 160 m sur le champ d'Étrez). La halite E1 présente des intercalations de carbonates et d'argile de plusieurs décimètres.

La couverture est assurée par une Formation marneuse intermédiaire (I3) et qui débute par une brèche correspondant à de la dissolution du sel sous-jacent (cf. ci-dessous). La Formation évaporitique supérieure (I1, I2)

se présente localement sous la forme d'une « barre sulfatée » qui serait d'âge Chattien. Au total, ces formations I1, I2, I3 représente une épaisseur de l'ordre de 180 m.

3. Le bassin de Valence

(Dumas, 1988 et Dromart et Dumas, en préparation)

Ce bassin salifère ne mesure qu'une trentaine de kilomètres du nord au sud et environ 5 kilomètres de l'est à l'ouest (fig. 3) : plus petit que celui de la Bresse

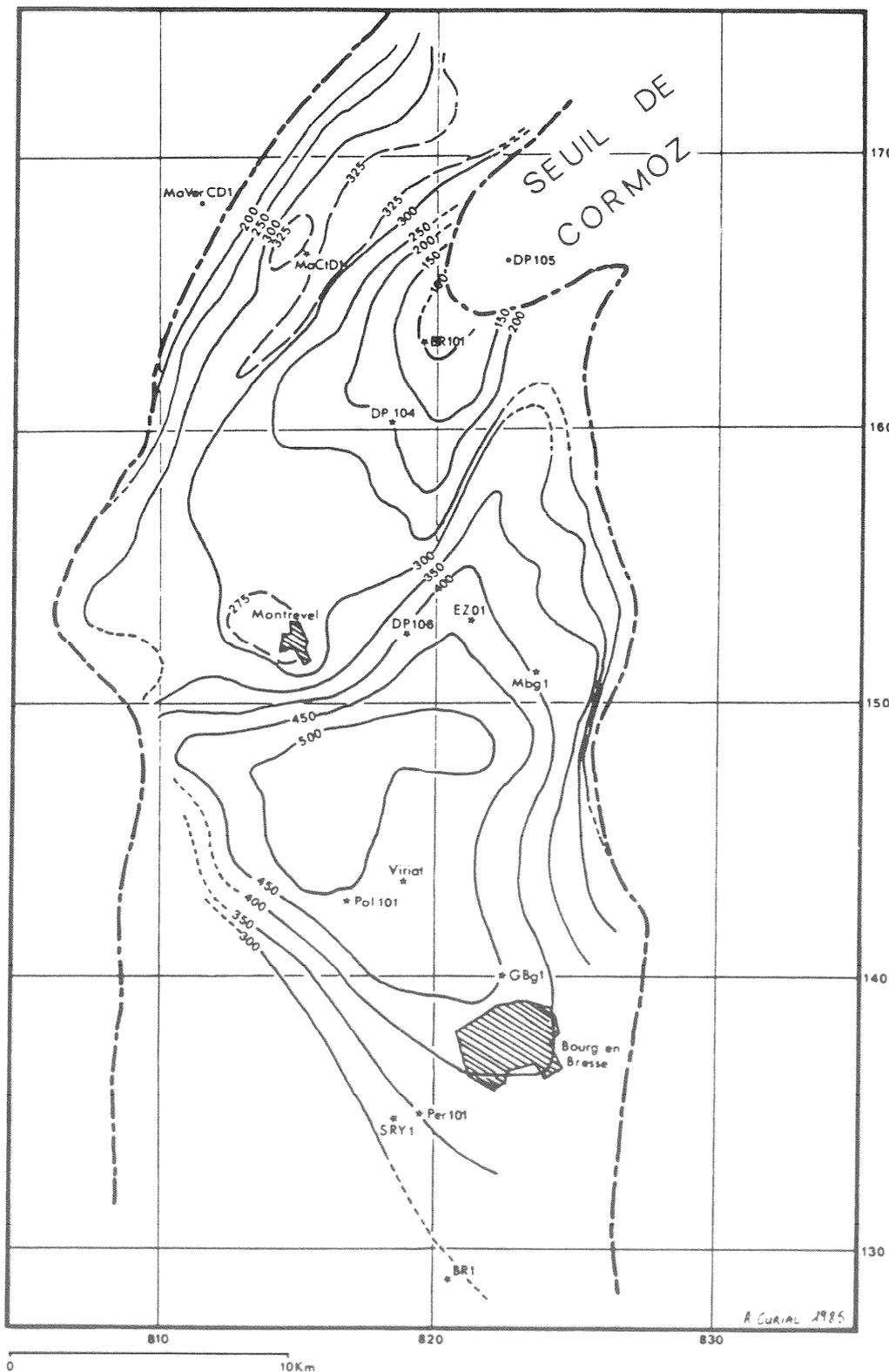


Fig. 14. - Carte en isopaques de la série salifère supérieure et de ses équivalents latéraux dans le bassin de Bresse (Formations E1, E2, E3 comprises entre les repères H4 et H5A) tenant largement compte des données de sismique proposées par C. Leroy (1984 in Curial, 1986-1987). En tiretés, limite supposée de l'extension des faciès salifères. D'après A. Curial (1986-1987), fig. 60.

Fig. 14. - Isopach map of the upper salt series and its lateral equivalents in the Bresse Basin (formations E1, E2, E3 contained between markers H4 and H5A) largely taking account of the seismic data proposed by C. Leroy (1984, in Curial, 1986-1987). Dashed line: presumed limit of the salt facies. After A. Curial (1986-1987; Fig. 60).

burgienne, il est en même temps plus affecté par la tectonique. Il présente une dissymétrie accusée, inverse de celle constatée en Bresse : pente faible vers l'est, c'est-à-dire vers la zone haute de Montmiral le séparant du petit bassin latéral de Royans ; pente accusée — voire même faille syn-sédimentaire — vers l'est correspondant à une transition relativement abrupte avec le Massif central (fig. 12 et 15). Contrairement aux bassins de Bresse et de Haute-Alsace, il est impossible de donner une coupe complète et représentative des remplissages

évaporitiques sur une seule et même verticale, étant donné les déplacements géographiques du ou des dépôts-centres salifères (fig. 6).

Dans la fosse salifère, le substratum antepaléogène n'a pas été atteint. Une « Formation infrasalifère » n'a été traversée (par exemple à DP 108) que sur quelques dizaines de mètres (fig. 6). Elle s'avère déjà d'âge Stampien. Elle est caractérisée par une évolution rythmique qui se traduit par des séquences comprenant de bas en haut : des marnes grises (en général moins de

1 m), puis bancs décimétriques à métriques de calcaires rubanés (alternances centimétriques de calcaires sombres et de calcaires blanc crème), puis bancs de calcaires beiges et passées de calcaires finement laminés (jusqu'à plusieurs mètres), puis des horizons centimétriques ou même plurimétriques d'anhydrite massive, nodulaire. Le régime d'eaux stratifiées s'est donc installé de façon répétée. Par ailleurs, d'après la sismique, 300 à 400 m de série pouvant comporter du sel existeraient plus bas et pourraient représenter l'équivalent de la formation E5 de Bresse ou du Salifère inférieur de Haute-Alsace (cf. tabl. 1).

La « Formation salifère inférieure » présente une épaisseur maximum de sel dans une fosse allongée le long de la faille Tersanne-Claveyson, de Clérieux au sud à Hauterives au nord. A la base, l'unité T6 (épaisseur jusqu'à 200 m), par exemple à DP 108, est constituée de sel plurimétrique, rythmé à un pas de quelques

centimètres par de minces lits argilo-carbonatés et admet quelques horizons marneux plurimétriques, à intercalations anhydritiques. Les marnes parfois gris-noir sont souvent finement laminées. L'unité T5 correspond à une réduction géographique de l'aire salifère (fig. 16). Les faciès détritiques, hydrodynamiques gagnent au nord, suggérant le jeu de dissolutions dans ce recul du sel. Par ailleurs, on note une progression concomitante des faciès carbonatés et anhydritiques dans l'est du bassin. Au centre de la fosse, par exemple à Tersanne (épaisseur 250 m), on observe une alternance de sel, d'horizons anhydritiques et d'horizons carbonatés. Dans le secteur d'Hauterives, la série salifère, rythmée, admet un membre médian épais de 80 m et fait de calcaires à pellets, intercalés de tapis algaires, de stromatolites en coupes et en colonnes, où s'observent quelques lits argilo-salifères. Dans cette partie du bassin, les marnes peuvent être rouges et présenter des

Tabl. 1. - Corrélations entre les échelles stratigraphiques et lithologiques schématiques des bassins de Paris, Alsace, Bresse et Valence. La succession des unités a été simplifiée dans certains cas.

Table 1. - Correlation between the stratigraphic stages and schematic lithologies of the Paris, Alsace, Bresse and Valence basins. The succession has been simplified in some cases.

BASSIN DE PARIS		ALSACE		BRESSE	VALENCE	
CHATTIEN				Formation évaporitique supérieure	T2 (> 500m)	Formation évaporitique supérieure
STAMPIEN	Sables de Fontainebleau	Marnes à Cyrènes (110m)		?		Marnes bigarrées
	Marnes à huîtres (15,4m)	Couches à Méleffes (290m max)	NP 23	Formation marneuse intermédiaire	T 3 (500m)	Couches à Cyrènes à Potamides
		Marnes à foraminifères (5 à 18m)				Couches à Foraminifères et marnes rayées
		Toit du salifère				
STAMPIEN	Calcaire de Sannois (6,30m)	Marnes sans sel (> 80m)		Couverture partie inférieure		
		Sel V (365m)	NP 22	Brèche	E 1 (163m)	
	Caillasse d'Orgemont				E 2 (> 160m)	Formation salifère inférieure
		Sel IV (> 230m)				
STAMPIEN inf. (Sannoisien)	Argile verte de Romainville (5,25m)	Zone fossilifère (60-80m)			E 4 (partie supérieure)	Infrasalifère
LUDIEN moyen-sup.	Glaises à Cyrènes. Marnes blanches de Pantin. (6,85m)			(230m)		Sel possible
	Marnes bleues d'Argenteuil. (du gypse) (8,80m)					
	Gypse lère à 3ème masse (26,5m) + argiles et marnes magnésiennes. (attapulgite, smectite, sépiolite)	Sel III (Sel moyen) (> 220m)			E 4 (partie inférieure)	
MARINESIEN	Gypse 4ème masse	Sel inférieur (> 900m)	Sel II (175m) MVL 2		E 5 (600m)	
			Sel I (400m) MVL 1			
LUTETIEN sup.	Gypse	Infrasalifère			E 6	
		Sidérolithique (22,4m)				
			Faciès marins			

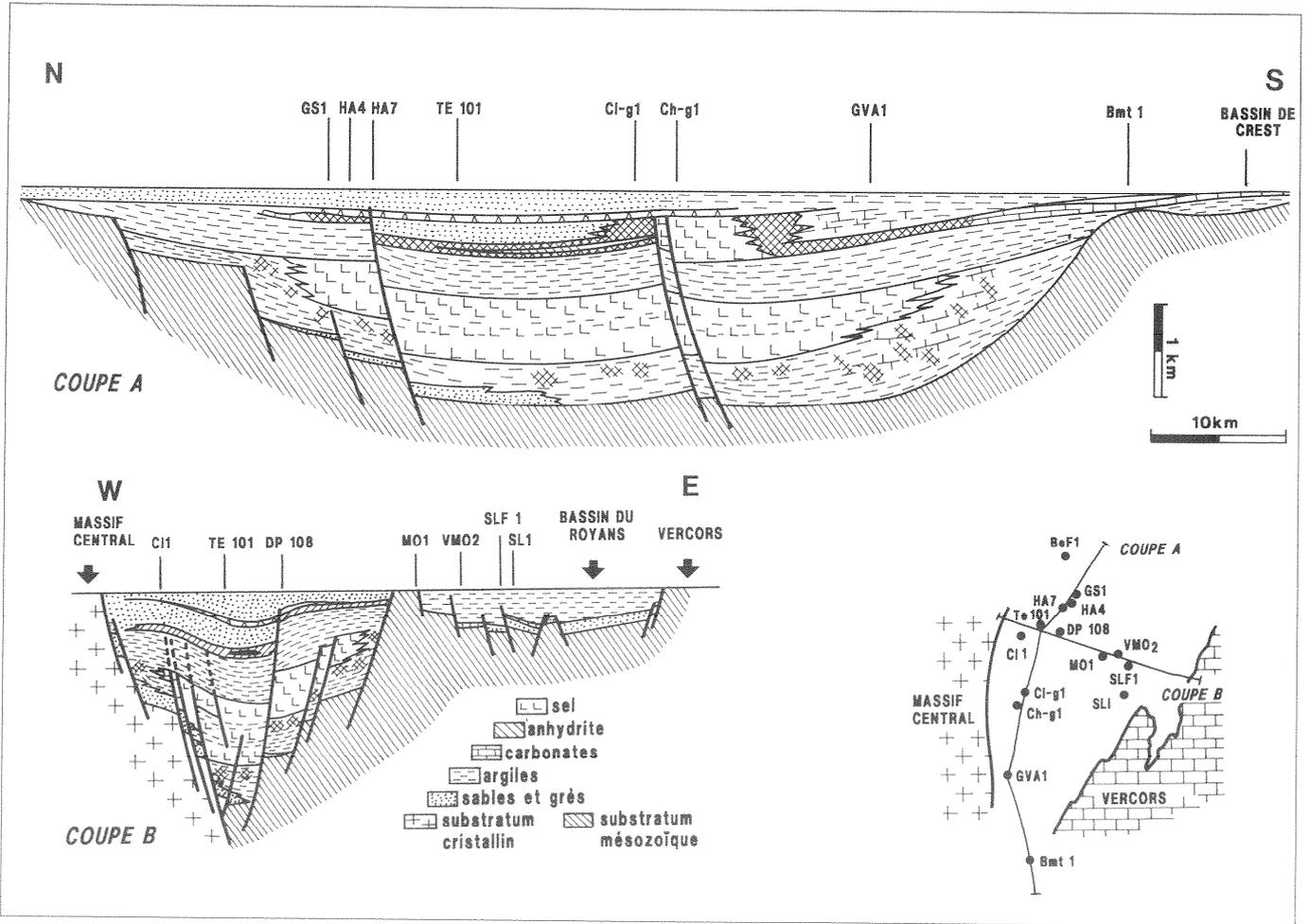


Fig. 15. - Coupes synthétiques du bassin de Valence selon l'axe de subsidence (Nord-Sud) et selon une transversale (Est-Ouest). Le sommet de la série paléogène sert de plan de référence. D'après D. Dumas (1988), fig. 31.

Fig. 15. - Synthetic sections through the Valence Basin along (N-S) and across (E-W) the axis of subsidence. The top of the Paleogene series provides a reference plane. After D. Dumas (1988; Fig. 31).

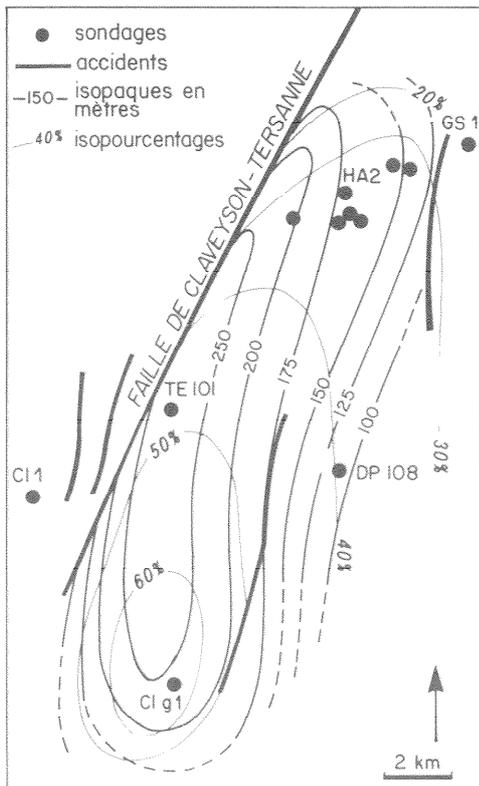


Fig. 16. - Cartes des isopaches de l'unité T5 (Formation salifère inférieure *pars* du bassin de Valence) et des isopourcentages de halite. La zone de plus forte épaisseur présente toujours une orientation N 20. La réduction d'épaisseur en direction des bordures est très rapide (plus de 250 m à TE 101 et à peine 110 m à DP 108 situé quatre kilomètres à l'Est. D'après D. Dumas (1988), fig. 20 et 55.

Fig. 16. - Isopach map of Unit T5 (a part of Lower salt formation) of the Valence Basin showing halite isopourcentage curves. The thickest zone everywhere shows a N 20° E strike. Thinning is very rapid towards the edges (more than 250 m at TE 101 and scarcely 110 m at DP 108 lying 4 km to the east). After D. Dumas (1988; Figs. 20 and 55).

fentes de dessiccation. L'unité T4 épaisse en moyenne de 250 m apparaît, contrairement à la précédente, homogène sur toute l'aire régionale, aussi bien par les faciès que par les épaisseurs. L'unité est salifère, argileuse et comporte près du sommet une unité carbonatée (B dans la nomenclature Gaz de France), remarquable par la présence, dans certains lits, d'une nannoflore indigène de coccolithophoridées oligospécifiques.

La « Formation marneuse intermédiaire », épaisse de 300 à 500 m, a été subdivisée, par exemple dans le forage de DP 108, en plusieurs unités successives. On a d'abord les « Couches marneuses rayées à Foraminifères » à alternances de marnes varvées, de laminites

calcaires, riches en matière organique, de marnes silteuses à stratifications entrecroisées. Aux Foraminifères s'ajoutent une nannoflore calcaire parfois riche (Tersanne) et de nombreux restes de poissons. Au-dessus, les « Couches à Cyrènes et à Potamides » ne présentent plus de couches varvées. Puis les « Marnes bigarrées et micro-gréseuses » consistent en marnes sableuses, souvent rouges ou vertes, à stratifications entrecroisées et parfois avec anhydrite nodulaire. Au sommet, cette formation comprend des grès à ciment carbonaté, des calcaires oolithiques et dolomitiques. Cette formation se généralise à tout le bassin bien que son épaisseur se réduise vers le sud.

Au-dessus, la « Formation évaporitique supérieure » (fig. 17), ne prend son plein développement qu'au sud de la fosse évaporitique précédente, en particulier dans la région de Chanos-Curson (épaisseur 524 m). Elle est constituée de halite, d'anhydrite, d'argiles et passées de dolomie et de glauabrite.

La couverture est assurée par la « Formation marnable terminale » qui met en évidence des variations importantes d'épaisseur et de faciès suivant les secteurs.

B. Résultats géochimiques, minéralogiques et pétrographiques

Sous ce titre, nous évoquerons principalement des faits importants issus des observations, mesures et analyses effectuées aux échelles les plus petites et jusqu'à l'échelle de la carotte. Nous réservons ainsi l'analyse des faciès à une échelle plus grande, jusqu'à l'échelle du bassin pour un chapitre ultérieur.

1. Les détritiques terrigènes

Sous ce titre, nous excluons les détritiques fins (*cf.* ci-dessous : « les argiles »), ainsi que les faciès bréchiques de remaniement sur place de sédiments chimiques ou détritiques fins en liaison avec des dissolutions du sel. Ces détritiques terrigènes n'ont constitué qu'un sujet marginal dans la mesure où, sur chaque bassin, les auteurs ont préféré s'intéresser au remplissage évaporitique le plus épais et qui comportait les informations les plus nouvelles et les problèmes les plus intéressants.

Rappelons néanmoins que, dans le bassin de Valence, l'examen de ces faciès a conduit à les interpréter comme des dépôts typiques des zones distales de plaines périodiquement inondées par des oueds. Par ailleurs, la présence fréquente de sels évaporitiques dispersés (nodules d'anhydrite, gypse primaire, phénoblastes de halite) serait la marque soit de cheminements interstitiels de saumure, pour celles de ces manifestations qui sont les plus proches de la gouttière axiale évaporitique, soit le témoignage résiduel d'inondation des plateaux marginaux par une nappe de saumures à certaines époques.

En Alsace, grâce à la petitesse du rift, le dépôt-centre évaporitique est peu éloigné du massif cristallin des Vosges et les « conglomérats côtiers intermédiaires » apparaissent bien, par exemple dans le champ de fractures de Thann. Les équivalents, très amincis, des différents termes salifères du dépôt-centre y ont été

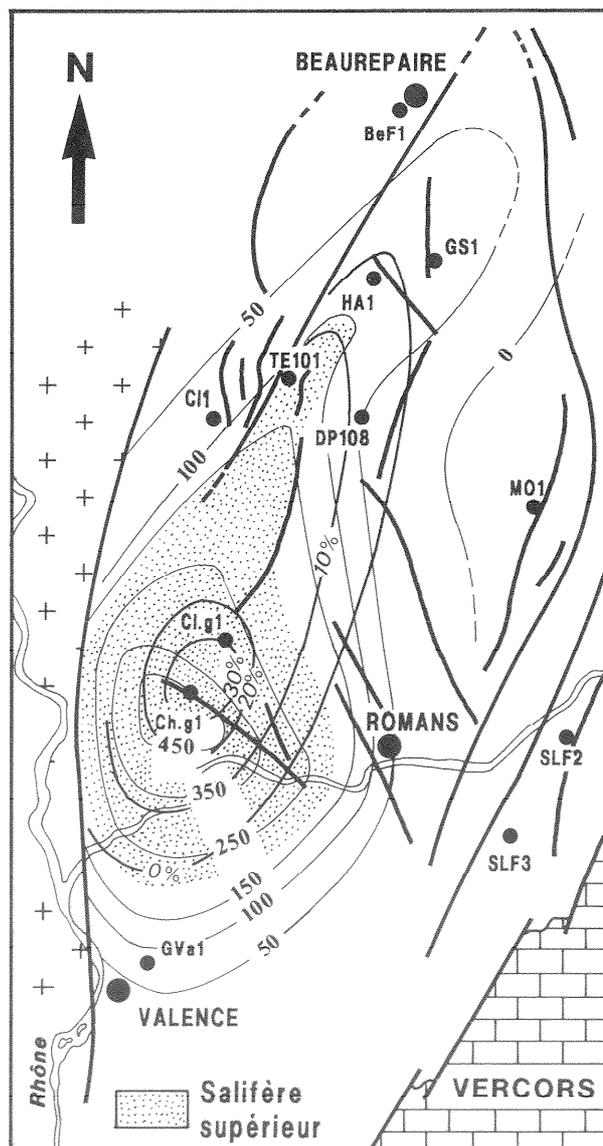


Fig. 17. - Carte des isopaches de la Formation évaporitique supérieure du bassin de Valence et isopourcentages de halite. D'après D. Dumas (1988), fig. 29 et 70.

Fig. 17. - Isopach map of the upper evaporite formation of the Valence Basin showing halite isopercentage curves. After D. Dumas (1988; Figs. 29 and 70).

identifiés. Sur cette bordure occidentale, les faciès conglomératiques, grossiers, deltaïques alternent avec des couches plus fines, y compris parfois avec des couches laminées pouvant comporter débris de végétaux et passées fossilifères. Cette zone devait donc être soumise à des alternatives d'exondations et d'ennoiments. Le fait le plus intéressant est, peut-être, le cantonnement très net et très pérenne de ces faciès grossiers à la bordure immédiate des Vosges. Il est évident que cela n'est pas sans rappeler ce qui s'observe à la limite entre le bassin salifère du Paradoxe et la zone ascendante, dite de l'Uncompagne (Hite *et al.*, 1972). Cet antagonisme entre faciès détritiques et faciès chimiques s'affrontant sur de longues périodes de temps sur une même frontière et les problèmes sédimentologiques qu'il pose ont déjà été plusieurs fois évoqués (Busson, 1972, 1974 et 1983).

2. Les argiles

1) Les faciès

Dans le dépôt-centre de **Bresse**, les faciès argileux associés au sel sont peu abondants. L'impuissance à épandre les sédiments détritiques, même fins, dans ces bassins de dimensions pourtant modestes, apparaît ici tout à fait frappante. En bancs centimétriques jusqu'à métriques, les roches argileuses sont verdâtres, beiges, beige verdâtre, brunes ou grises. Elles apparaissent parfois silteuses avec microquartz détritiques ou mica-cées. Les foraminifères et nannofossiles créacés remaniés abondent, attestant, dans ce bassin comme dans les autres, que la source des phyllites argileuses devait se trouver largement dans les argiles mésozoïques des bassins versants. La structure de ces couches argileuses est souvent litée, ou même à débit feuilleté. Elles ont souvent bien conservé les débris végétaux et la pyrite est assez abondante.

Dans la fosse axiale de **Valence**, ces argiles et marnes comportent souvent des débris ligneux et ont une structure fréquemment laminée. D. Dumas (1988) a d'ailleurs explicitement supposé que ces phyllites avaient pu être transportées sur une pycnocline par des eaux turbides (Schmalz, 1971 ; Busson et Cornée, 1988). La structure laminée est également fréquente dans le bassin salifère de **Haute-Alsace**. L'observation par M.-M. Blanc-Valleron de phyllites argileuses orientées tout à fait parallèlement au fond du bassin conforte l'idée d'une chute très lente dans un milieu parfaitement calme. C'est-à-dire qu'elle contribue à suggérer leur cheminement sur une pycnocline précédant une très lente décantation.

Dans chacun des trois bassins salifères examinés, on peut noter l'absence d'argiles sous-compactées grâce à un teneur en eau anormale, eu égard à la profondeur d'enfouissement. On sait que de telles formations sont particulièrement fréquentes dans les grands dépôts évaporitiques où alternent sel et argiles. Et cette absence est d'autant plus remarquable que les deux facteurs habituellement invoqués pour en rendre compte semblent réunis dans les cas étudiés ici : 1) le fait que les bancs de sel épais et compacts ont constitué des écrans étanches et, 2) le fait que cette sédimentation en général épaisse a dû se faire à des vitesses relativement élevées.

Le problème des **argiles rouges** a pu être abordé de façon intéressante dans ces bassins. Soulignons, d'abord qu'à de rares exceptions près (voir ci-dessous), les argiles rouges sont à peu près absentes dans les dépôts-centres. Les faciès détritiques marginaux sont, par contre, riches en argiles rouges. Certes, dans ces faciès marginaux, par exemple dans le bassin de Valence, des épisodes ayant subi des exondations sont caractérisés par des argiles vertes. *Néanmoins, la localisation préférentielle des argiles rouges sur les marges plaide pour une liaison entre ces faciès et des mises à l'affleurement synsédimentaires par assèchement du bassin.* Il est d'ailleurs frappant que, dans le bassin de Valence, les rares passées d'argiles rouges présentes dans le dépôt-centre correspondent à des périodes où les dépôts se sont faits sous très faible profondeur d'eau ou profondeur d'eau éphémère (argiles rouges dans la série T5, au sommet de la Formation marneuse intermédiaire et

dans la Formation marno-sableuse terminale). En outre, dans tous les domaines, les craquelures de dessiccation sont souvent associées avec les argiles rouges. Ces faits tendent à confirmer l'interprétation diagénétique secondaire — non pas tardive mais liée à une mise à l'affleurement précocement post-dépositionnelle — de cette couleur rouge des faciès argileux (Busson et Cornée, 1989 a et b).

2) Minéralogie

Dans les dépôts-centres de **Bresse** et du **Valentinois**, une première paragenèse est faite primordialement d'illite à laquelle s'ajoutent de faibles quantités de kaolinite et de chlorite. Dans les mêmes sites, une deuxième paragenèse est constituée d'illite et de smectite auxquelles s'ajoutent encore de très faibles quantités de kaolinite et de chlorite. Dans cette dernière, la smectite est en proportion très variable, depuis des quantités infimes jusqu'à une teneur dépassant celle de l'illite. En Bresse (fig. 18), existe une troisième paragenèse intermédiaire à illite, interstratifiés, illite-smectite avec de faibles teneurs en kaolinite et chlorite. Cette paragenèse à interstratifiés semble absente dans le Valentinois. D'après des recherches récentes et inédites de R. Moretto et A. Curial sur les argiles de Bresse, il s'avérerait que l'illite ne dépasse jamais 50 % de la roche totale, les minéraux gonflants (smectite et interstratifiés illite-smectite) n'excèdent pas 20 % et la kaolinite et la chlorite ne dépassent jamais 10 %. L'allure des pics de l'illite dénote un écartement des espaces interfoliaires. Quant aux minéraux gonflants, des pics larges, étalés, souvent mal individualisés établissent l'état de mauvaise cristallinité. Remarquons enfin que la corrensite est pratiquement absente de ces argiles — puisque seulement décelée en quantités infimes dans deux échantillons de Bresse —, alors qu'elle est relativement fréquente, par exemple dans le Trias évaporitique.

La première paragenèse, sans minéraux gonflants, est très nettement détritique. Statistiquement, elle pré-

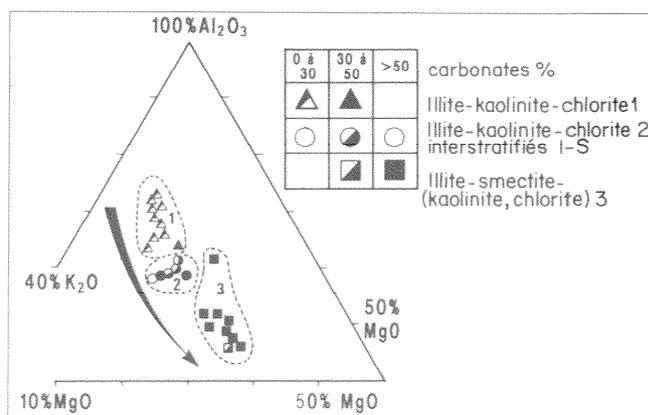


Fig. 18. - Évolution géochimique de la phase silico-alumineuse séparée et de la teneur en carbonates de la roche totale, dans la série salifère bressanne. D'après R. Moretto (1986-1987), fig. 39 modifiée.

Fig. 18. - Geochemical evolution of the separated silico-aluminous phase and of the whole-rock carbonate content in the Bresse salt series. After R. Moretto (1986-1987; Fig. 39 modified).

sente une bonne corrélation avec la prépondérance des argiles dans la roche globale. Dans une analyse statistique des données géochimiques et minéralogiques portant sur l'ensemble du stock argileux, il apparaît une meilleure corrélation entre l'illite, d'une part, la kaolinite et la chlorite, d'autre part, qu'entre les minéraux gonflants et la kaolinite et la chlorite. Du point de vue géochimique, cette paragenèse représente le pôle alumineux, relativement riche en fer et en potassium.

Au contraire, la seconde paragenèse, caractérisée par la smectite et parfois par les interstratifiés illite-smectite, représente le pôle magnésien. Elle se localise préférentiellement dans les faciès chimiques, étant tout spécialement associée aux carbonates. En fait, elle est non seulement associée aux carbonates et au Mg, mais également au Si ; ce qui s'explique par le fait que les diagenèses siliceuses, incomparablement plus importantes que la silice détritique, se développent plus aux dépens des sulfates en milieu carbonaté qu'ailleurs.

Ces minéraux gonflants résultent donc d'une agradation magnésienne qui a dû s'exercer sur les illites les plus petites. La liaison avec les carbonates, eux-mêmes souvent riches en matière organique, et secondairement avec les sulfates, incite à mettre en cause dans cette agradation un environnement confiné enrichissant, favorisant ces diagenèses en milieu interstitiel. La porosité et la perméabilité, originelles au moins, du milieu carbonaté peuvent avoir constitué un facteur particulièrement favorable, évidemment moins développé en milieu argileux.

La grande monotonie de ces paragenèses argileuses est confirmée par les données en Haute-Alsace. Les argiles détritiques y prédominent largement et l'attapulгите, signalée naguère par C. Sittler (1965), n'a jamais été retrouvée par M.-M. Blanc-Valleron (communication orale) malgré un nombre considérable d'analyses. On notera, à ce sujet, la différence fondamentale qui apparaît entre les argiles essentiellement détritiques — ou aux agradations magnésiennes limitées — qui caractérisent ces dépôts-centres salins, et les paragenèses de plates-formes qui sont, quant à elles, souvent caractérisées par la présence de minéraux tels que l'attapulгите, la sépiolite, la saponite, y compris parfois dans des séries contemporaines de celles des dépôts-centres.

3. Les carbonates des aires de dépôt-centre

Les aires centrales, salifères, de ces bassins paléogènes s'avèrent souvent remarquablement pauvres en dolomie : série bressane dans son ensemble, Salifère inférieur et Infrasalifère du Valentinois, séries du bassin potassique de Haute-Alsace, etc. Cette faiblesse des diagenèses magnésiennes va dans le même sens que la quasi-absence des corrensites, attapulгите, sépiolites, etc. Elle est étonnante dans un milieu essentiellement salin où les saumures contenues dans le sel fraîchement déposé et qui ont pu en être expulsées lors de la compaction devaient être essentiellement des saumures magnésiennes et potassiques. Elle oppose ces séries salifères paléogènes aux séries salifères triasiques où la dolomite représente l'état habituel des carbonates.

1) Les calcaires finement dispersés dans le sel massif

Le sel massif de ces bassins se présente fréquemment *zébré*, à un rythme de quelques centimètres ou un

décimètre, par de fines laminations argilo-carbonatées ou carbonatées et anhydritiques, comme le fait est classique dans tant d'accumulations salines. Dans ces lamines, on a décrit de la micrite en minuscules rhomboèdres pouvant être associés en rosettes. Mais le calcaire se présente aussi en développements géodiques ayant rempli des cavités. Il peut ainsi tapisser la paroi de cristaux de gypse pendant une période de vacuité imputable à la dissolution de ce minéral ou encore occuper la place de cristaux de gypse, ainsi entièrement calcitisés et dont la forme cristallographique est parfaitement reconnaissable. Des cristaux apparaissent également au contact des phénoblastes de halite et de leur matrice argilo-carbonatée, poussant vers l'intérieur et ayant donc, là encore, tapissé une cavité. Quelques cristaux de dolomite existent également, en particulier associés à de la halite syntaxique.

2) Les calcaires un peu plus massifs

En **Bresse**, R. Moretto (1986-1987) a évoqué de rares niveaux carbonatés qui ne dépassent pas quelques décimètres, leur couleur étant beige. Des nodules d'anhydrite se sont développés à des niveaux qui contenaient du gypse lenticulaire, de la silice ayant pu à son tour se substituer aux sulfates (voir ci-dessous). De la halite interstitielle se trouve également présente. A certains niveaux, des structures ondulantes suggèrent le rôle constructeur d'algues ou de cyanobactéries.

Dans le **Valentinois**, existent également, peut-être en plus grande abondance, des calcaires micritiques parfois percés de terriers remplis d'argiles vertes. Certains bancs sont remarquables par les proliférations organiques qui y apparaissent ou qui les constituent quasi entièrement. Ainsi, des calcaires à pellets, beiges à brun clair, développés par exemple dans le T5 d'Hauterives présentent à l'observation microscopique une multitude de baguettes cylindriques de 100 à 1 000 μm de long sur 50 à 100 μm . Ces éléments très similaires aux pellets des boues actuelles superficielles des marais salants de Santa Pola, dans une gamme de salinité de 40 à 80 g/l et qui sont des déjections de larves de Cheironomes (diptères proches des moustiques), larves vivant à la surface de l'eau et se nourrissant d'algues microscopiques (Orti Cabo *et al.*, 1984). Ces éléments constituent une micrite avec forte porosité et leur présence est à rapprocher de la découverte de restes d'insectes dans des couches laminées très conservatrices d'un forage du Valentinois (DP 108, MDP A 1963 *in* Dumas, 1988).

Dans le Valentinois également, des calcaires laminés d'origine algale ont été signalés. Mais surtout, des stromatolites en coupes, particulièrement spectaculaires, existent dans le T5 des sondages de Hauterives et dans le T4 de Tersanne. Il existe aussi des empilements de coupes de petite taille, coalescentes. Ces stromatolites semblent occuper, en général, une position pré-saline. Ces proliférations algales et bactériennes sont, en effet, souvent l'apanage de milieux peu profonds où une salinité élevée limite ou élimine le broutage, en particulier par les gastropodes. Dans l'évolution post-sédimentaire, cette position pré-saline est responsable à l'évidence de la fréquence des diagenèses et cimentations anhydritisantes et halitiques.

Les laminites cryptalgales, légèrement ondulées, n'ont ni la lamination très fine et très plan-parallèle, ni

la régularité et la répétitivité des laminites planctoniques évoquées ci-dessous. Ces laminites cryptalgaires, elles-mêmes, sont souvent envahies par des fantômes de gypse lenticulaire.

3) Les calcaires laminés

Il s'agit d'un faciès classique dans un très grand nombre de dépôts confinés. Dans des calcaires ou des calcaires argileux souvent riches en matière organique, on observe une lamination, parfois d'ordre millimétrique, et le plus souvent beaucoup plus fine que dans les calcaires cryptalgaires : elle présente, par exemple, une dizaine de couplets par millimètre. Cette lamination est très régulièrement plan-parallèle. La régularité stratonomique n'est interrompue ni par la présence de coprolithes, ni par des traces de bioturbation, de fentes de dessiccation, de minéraux évaporitiques, etc. Par contre, on a signalé, dans le Valentinois, la fréquence des figures de micro-slumps. Dans les couplets, la lamine claire est une micrite formée de minuscules rhomboédres de calcite. Dans la lamine foncée s'ajoutent de la matière organique, de la pyrite, souvent de l'argile. A la cassure, l'odeur est fétide. Ces laminites, qui représentent toujours un bon milieu conservateur, ont livré de nombreux restes de Culicidés en Bresse et du necton dans le Valentinois. Dans ce dernier bassin, de telles laminites qui se regroupent en horizons décimétriques à métriques, ont été traversées tout particulièrement dans la série infra-salifère et dans le membre B de la formation T4 et enfin à la base de la Formation marneuse intermédiaire.

De telles laminites sont le témoignage d'une sédimentation sous un système à deux corps d'eau (Busson et Noël, 1972 ; Busson, 1978). Leur pérennité, par exemple sous la forme d'horizons métriques, exige la permanence de ce système d'eau stratifié pendant des temps géologiques. Cette permanence s'acommode mal d'une tranche d'eau trop peu épaisse. Il est donc légitime de considérer ces dépôts carbonatés comme plus profonds que les autres faciès (algaires, stromatolitiques, pellesoïdes, oolitiques, etc.). Il n'en est que plus surprenant que ces horizons laminés à matière organique correspondent parfois à une extension de l'aire sédimentaire sur les marges du bassin, par exemple dans le cas de la Formation marneuse intermédiaire dans le Valentinois. Enfin, la présence de nannoplancton dans certains calcaires du Valentinois souligne que l'élaboration carbonatée s'est produite de façon généralisée, dans le cas de tels calcaires, dans la tranche d'eau de surface. C'est une nouvelle justification du terme de laminites planctoniques-euxiniques (Busson, 1978). Rappelons déjà que de telles laminites à nannoplancton sont très générales dans le Stampien de l'Est de la France (*cf.* Busson et Noël, 1972).

4) Faciès oolitiques et dolomies

Nous regroupons ici, un peu artificiellement, des faciès n'ayant en commun que leur dépôt sous très faible tranche d'eau ou tranche d'eau éphémère. Dans les dépôts-centres de bassins salifères que nous considérons, les calcaires oolitiques sont surtout présents dans le Valentinois, au sommet de la Formation marneuse intermédiaire. Ils marquent, à ce niveau, un épisode proche de l'émergence. Ils ont été interprétés comme un faciès pré-salin et rappellent les faciès actuels analogues de la Laguna Madre ou du Grand Lac Salé de

l'Utah. Ces calcaires oolitiques ont subi une diagenèse très profonde (dolomitisation et anhydritisation).

Faisant exception à la règle énoncée ci-dessus, une dolomicrite épaisse existe dans la Formation évaporitique supérieure du Valentinois. Elle se place dans un contexte d'évaporites continentales, caractérisées par la présence associée de gypse, glauberite, halite, en particulier au centre du bassin résiduel. Une telle dolomicrite dans un tel contexte hypersalin a été interprétée par D. Dumas (1988) comme un minéral évaporitique développé dans un milieu peu favorable à la vie.

4. Les sulfates de calcium

Dans les aires de dépôt-centre des bassins salifères, en particulier dans les dépôt-centres de Bresse, de Haute-Alsace et dans une partie de la série salifère du Valentinois, on est frappé par la rareté relative des sulfates de calcium. Ceux-ci ne semblent pas, et de loin, être avec la halite dans le rapport volumétrique des sels déposés par l'eau de mer. En outre, ils ne se présentent que rarement en bancs massifs purs : en Bresse, dans la concession d'Étrez, il n'y aurait pas, en général, de bancs de sulfates excédant 20 cm. Enfin, ils sont rarement en bancs primaires précédant la précipitation halitique, comme on pourrait s'y attendre. Plus encore qu'avec les carbonates, cette discrétion des sulfates offre un contraste remarquable avec les séries marginales, ainsi qu'avec les bassins de plate-forme contemporains, où les couches sulfatées peuvent être épaisses et massives (bassin de Paris, Mormoiron, etc.). Dans le Valentinois aussi, les sulfates sont toujours en minces lits associés à des sédiments détritiques, carbonatés ou halitiques ; sauf deux niveaux plurimétriques associés à des calcaires laminés et qui s'individualisent respectivement à la partie supérieure de la formation infra-salifère et dans le membre B de la formation T4 (fig. 19).

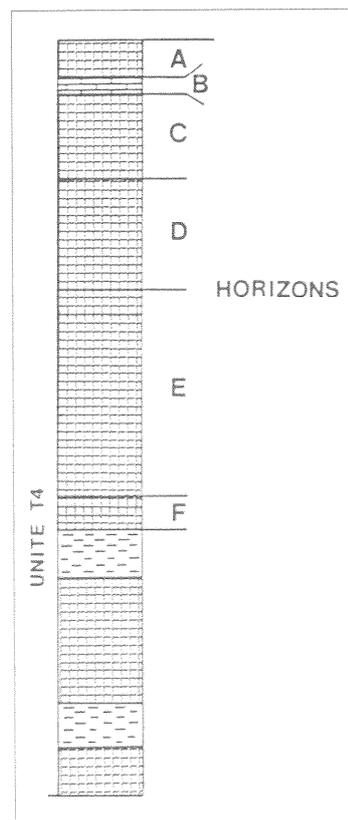


Fig. 19 - Découpage de l'unité T4 en horizons A, B, C, D, E, F, dans le champ de Tersanne (bassin de Valence). D'après D. Dumas (1988), fig. 12.

Fig. 19. - Division of Unit T4 into A, B, C, D, E, F horizons in the Tersanne field (Valence Basin). After D. Dumas (1988; Fig. 12).

La double association entre des membres de sulfate de calcium massif et des calcaires laminés à matière organique offrent un problème d'interprétation. Ces calcaires, en effet, supposent, comme nous venons de le voir, un système d'eaux stratifiées avec conditions anoxiques ou réductrices en profondeur. De telles conditions sont évidemment non point réductrices, mais défavorables à l'égard du dépôt de sulfate de calcium.

1) Les formes primaires ou précoces

Les formes primaires sont relativement rares et, de ce fait, l'étude du sulfate de calcium sera plus fructueuse pour approfondir les phénomènes diagénétiques que pour définir des environnements de dépôts. Rappelons, pourtant, celles observées dans les forages du **Valentinois** qui sont très caractéristiques.

a) *Le gypse*. Rarement conservé (1), le gypse est identifiable par ses formes cristallines souvent préservées avec fidélité. Il y a d'une part des formes dressées (croûte en herbe), tout à fait comparables aux sélénites qui se développent dans les marais salants à l'interface sédiments-saumures et qui sont dans les séries valentinoises remplacés par de l'anhydrite. De taille millimétrique à pluricentimétrique, ces formes ont pu connaître une croissance intra-sédimentaire qui rendrait compte de la déformation des couches sus-jacentes encore non lithifiées. D'autre part, il y a des formes lenticulaires remplacées par de la halite ou de l'anhydrite après dissolution, qui se sont développées de façon interstitielle dans les premiers centimètres de sédiments et dont l'habitus est explicable par la présence de matière organique dans le milieu (Cody, 1979 et Cody et Cody, 1988). Ces deux formes sont souvent associées aux tapis algaires. Mais il existe aussi de très fines croûtes gypseuses associées aux stromatolites en coupoles.

b) *L'anhydrite*. Il s'agit de nodules de diagenèse précoce, attestée par la déformation du sédiment encaissant non lithifié et développés aussi bien dans des matrices argilo-gréseuses, argilo-carbonatées ou carbonatées et pouvant être liés dans certains cas à des exondations temporaires. Cette genèse subaérienne ne mérite pas, toutefois, d'être généralisée pour ces nodules du Paléogène valentinois. Ces développements nodulaires d'anhydrite ont pu progresser jusqu'à réaliser des structures entérolithiques, chicken-wire ou même massives.

2) Diagenèses plus tardives

Parmi ces phénomènes, on évoquera le développement de grands poeciloblastes uniques d'anhydrite remplaçant le gypse de plusieurs lentilles voisines. Une anhydritisation relativement tardive est représentée par celle qui affecte la porosité et cimente certains calcaires (calcaires oolitiques déjà antérieurement dolomités, calcaires à pellets, etc.) : ce développement pouvant se faire en grandes plages poeciloblastiques. On a

signalé aussi le développement d'anhydrite phénoblastique au sein de matériel argilo-carbonaté qui a servi de drain à des saumures sulfatées et qui sont de développement tardif.

Dans le sel gemme, la cristallisation d'anhydrite peut être précoce ou de diagenèses beaucoup plus tardives. Parmi ces dernières, D. Dumas (1988) a cité des nodules d'anhydrite pluricentimétriques, développés dans la halite sous le contact avec des lits carbonatés qui ont dû ici encore servir de drain. Il en est de même de nodules d'anhydrite, apparaissant dans des couches argilo-carbonatées, ne déformant pas la matrice et se présentant comme des filons horizontaux. L'anhydrite en filons associée à des phases tardives de circulation de saumures et les figures dessinées par de l'anhydrite sont imputés par D. Dumas à des surpressions de fluides, préalablement emmagasinés dans les niveaux carbonatés et qui ont fracturé le sel qui, en l'occurrence, n'a pas réagi de façon souple. On citera aussi, dans les carbonates les lits d'anhydrite obliques par rapport à la stratification et imputables à des circulations favorisées par la tectonique.

On ajoutera quelques observations remarquables faites en **Bresse** (Moretto, 1986-1987) : développement précoce d'anhydrite d'imprégnation en un réseau chevelu anastomosé au sein d'une matrice carbonatée et argileuse, grâce à une pseudomorphose de cette matrice : phénoblastes d'anhydrite (pouvant atteindre 1 mm et participant au remplissage de cavités résultant de la disparition du gypse ou en remplissage de fissures ou flottant dans une matrice halitique) ; anhydrite en prismes allongés de quelques centaines de microns dans de la halite limpide, diagénétique, etc.

Ces phénomènes diagénétiques revêtent ici une importance qui n'est sans doute égalée dans aucun autre milieu sédimentaire. Rappelons, par exemple, le cas non rare où le gypse lenticulaire a été complètement remplacé par de la halite, tandis que la matrice originelle argilo-carbonatée est remplacée par de l'anhydrite ! La capacité des saumures très chlorurées, si abondantes dans ce milieu, d'accroître la solubilité des sulfates explique l'extraordinaire mobilité de ceux-ci. La complexité des phénomènes est due à la superposition de phases de dissolution, de cristallisation et d'épigénie lors des transferts de saumures dont la circulation et la composition ont évidemment évolué au cours du temps en fonction de l'enfouissement, des déformations tectoniques, etc. Soulignons, enfin, que c'est l'utilisation systématique du micro-faciès, en particulier de l'anhydrite, qui a permis de reconstituer et de débrouiller des phénomènes génétiques et surtout diagénétiques particulièrement complexes.

5. Les autres sulfates

1) La glauberite

Ce sulfate double de calcium et de sodium, jusqu'alors toujours confondu dans le Valentinois avec d'autres sels, a été découvert par D. Dumas (1988) dans la Formation évaporitique supérieure, dans les forages de Cl-g1 et Ch-g1. Il se présente principalement à la partie inférieure de cette formation, mais également quelque peu dans la partie supérieure.

(1) Le gypse en effet, qu'il soit originel ou de réhydratation de l'anhydrite, est tout à fait rare dans ces dépôts-centres. Cette rareté et cette dispersion constituent un élément favorable important dans la perspective d'enfouissement au sein de ces couches salifères de corps thermiquement actifs : car de ce fait, il ne saurait constituer par déshydratation la source de venues d'eau importantes.

Cette glaubérite est un sel de diagenèse précoce : les cristaux ont poussé dans une vase (devenue actuellement la matrice dolo-micritique), ainsi que l'atteste la déformation du litage de ce sédiment-hôte. Les cristaux se sont regroupés en nodules — au centre desquels ils sont abondants et plus diffus sur les bordures. Mais ils ont pu constituer des couches massives, métriques, parfois associées à de la halite ; D. Dumas a observé aussi des couches à contorsions fluidales évoquant un habitus entérolithique naissant.

Cette glaubérite elle-même est affectée par d'importantes diagenèses siliceuses (quartz et micro-quartz) et parfois anhydritisantes (grands cristaux d'anhydrite envahissant plus ou moins la masse).

Ce sel complète remarquablement la paragenèse continentale représentée dans cette Formation évaporitique supérieure avec laquelle la sédimentation saline s'épaissit et se concentre dans la dernière fosse, centrale, du bassin de Valence. Cette paragenèse est d'autant plus intéressante qu'elle n'est pas fréquente dans les séries anciennes.

L'observation de l'Actuel montre que ce sel peut prendre naissance de façon interstitielle dans des lacs salés, plus ou moins desséchés. Sur ces platiers vaseux (*mud-flats* des auteurs anglo-saxons), on observe qu'autour d'un corps central halitique s'organisent une auréole glaubéritique, puis une auréole de sulfate de calcium, puis de carbonates avant les silici-clastiques périphériques.

2) La célestine

La célestine, parfois difficile à identifier sur carotte, peut constituer jusqu'à 7 % de la roche totale dans certaines couches du bassin de Bresse. Elle s'est développée de façon diagénétique aux dépens de l'anhydrite, en particulier. Ces cristaux renferment d'ailleurs souvent des inclusions d'anhydrite ou également de carbonates, de pyrite, etc. Elle a été identifiée également en cristaux automorphes dans la halite limpide à laquelle elle a préexisté. Sa formation est à relier à des phénomènes de réduction bactérienne.

6. Le sel

Du point de vue cristallographique, pétrographique et géochimique, les données sur le sel sont particulièrement abondantes et précises dans les bassins de Bresse et du Valentinois, grâce au grand nombre des carottes disponibles. Le premier, le bassin de Bresse, est sans doute celui où la proportion de chlorure de sodium par rapport au total de la série est la plus élevée : de l'ordre de 80 % dans le dépôt-centre.

1) Halite primaire et sel « zébré »

Du sel souvent laiteux, riche en inclusions fluides, souvent bien stratifié (zébré), est interprété comme le résultat d'une cristallisation primaire. Un tel sel est abondant, par exemple dans les formations E3 et E4 de Bresse. Parmi les formes cristallines qui supportent cette interprétation de halite primaire, on citera d'abord les trémies et même les radeaux de trémies qui ont été observés en Bresse (pl. XVIII, fig. 5, Moretto, 1986-1987) admirablement identiques à celles qui peuvent se former dans un corps de saumure actuel. Non

seulement les trémies associées en radeaux à la surface n'ont pas été dissociées, mais R. Moretto a même pu observer les légères dissolutions qui ont pu affecter les trémies au cours de leur chute dans la saumure. Ces trémies n'ont jamais été observées dans le sel du Valentinois.

Plus abondante encore que ces cristallisations de surface (interface saumures/air), la cristallogénèse de fond a été observée sous la forme de chevrons très fréquents, aussi bien en Bresse que dans le Valentinois, de cornets et des cubes à faces déprimées (Valentinois) toujours en halite laiteuse (2). Il est intéressant d'observer ainsi du sel qui a toute chance d'être primaire car on peut penser que ses inclusions sont représentatives du contenu en sels de la saumure mère.

Comme dans un très grand nombre de bassins salifères, ce sel massif, primaire *pro parte maxima* est périodiquement interrompu par des lits sombres d'insolubles. En Bresse, on a parlé de halite laiteuse en bancs bien individualisés, de puissance centimétrique à décimétrique pouvant aller jusqu'à 15 cm. Dans la formation T6 du bassin de Valence, à DP 108, à Clérieux, à Hauterives, ces rythmes, ponctués par de minces couches argilo-carbonatées, sont au nombre de 15 à 20 par mètre. On propose d'appeler ce type de sel : le sel « zébré ».

Dans chaque rythme, les fines intercalations sombres sont surtout argilo-carbonatées ou souvent seulement carbonatées. Il est frappant que, dans bien des cas, le sulfate de calcium qui précipite obligatoirement à partir de l'eau de mer entre le calcaire et le sel, n'existe qu'en quantités faibles et le plus souvent sous des formes diagénétiques (fantômes de gypse, nodules d'anhydrite). Dans ces rythmes, au-dessus de la halite laiteuse, un lit de halite limpide apparaît parfois, que l'on a interprété comme la marque d'une certaine desalure de la tranche de saumure qui a dissous une certaine quantité de halite laiteuse avant que le sel limpide ne soit reprécipité. Au sommet de chaque rythme, avant le retour du lit insoluble suivant, s'observe, en effet, toujours un diastème de dissolution, remarquable par exemple par les tronçatures qui affectent les sommets des chevrons ou d'autres structures primaires. Aussi, est-ce parfois au sommet du rythme halitique que se présente un lit de halite limpide, témoignage déjà de dissolution.

Ces rythmes évoquent évidemment des arrivées d'eau de mer, renouvelant le stock ionique, puis le jeu de l'évaporation, la précipitation avant une nouvelle dilution. Les variations des valeurs du brome dans un rythme peuvent préciser cette évolution des salinités, même dans la masse halitique. Mais d'autres critères plus simples permettent d'estimer cette évolution. Ainsi, l'abondance plus ou moins grande des inclusions fluides dans la halite traduit la salinité plus ou moins élevée, au-dessus du seuil de précipitation du chlorure de sodium. Ou encore, comme nous l'avons vu ci-dessus, l'apparition d'un lit de halite limpide traduit une baisse de salinité, presque aussi clairement que ne le fait un lit d'insolubles.

(2) La halite laiteuse de ce texte correspond à la *milky halite* ou à la *cloudy halite* des auteurs anglo-saxons ; la halite limpide ou halite claire correspond à la *clear halite* des mêmes auteurs.

Rappelons que ce sel zébré peut présenter des niveaux carbonatés plus épais, avec parfois des structures ondulantes évoquant des tapis algaires, ou des niveaux d'argiles plurimétriques (Valence) plus ou moins riches en nodules d'anhydrite.

Deux faits sont importants pour nos conclusions environnementales (cf. ci-dessous).

a) Les surfaces de dissolution au sommet de chaque rythme attestent qu'à chaque arrivée d'eau de mer renouvelant le stock ionique, la dilution a affecté toute la tranche de saumure. Ces dissolutions ont, en effet, affecté des structures de fond certaines (chevrons, etc.). Une telle dessalure complète, répétitive est un argument important pour admettre que la tranche de saumure était peu épaisse. Les variations importantes et relativement brutales des teneurs en brome vont également en faveur d'un corps de saumure relativement peu épais.

b) Le débat reste ouvert pour savoir si ces rythmes salins sont saisonniers, et par conséquent annuels, ou, au contraire, sont pluriannuels. Les études synthétisées ici n'ont pas amené de conclusion à ce sujet. Rappelons que dans l'hypothèse qui reste plausible de dépôts annuels, l'épaisseur de chaque rythme est incompatible avec les vitesses de subsidence admissibles. Dans cette hypothèse, le dépôt d'importantes masses de sel zébré suppose obligatoirement une fosse préexistante, c'est-à-dire un bassin affamé.

Le sel réticulé, faciès signalé en particulier dans le bassin de Valence, serait le témoignage d'une sédimentation sous très faible épaisseur de saumures.

2) Les diagenèses halitiques précoces

Elles sont, en général, le fait de la halite limpide dont les expressions et les âges de croissance peuvent être très variés. Toutefois, différents arguments, en particulier les valeurs assez similaires des teneurs en brome de nombreuses halites limpides et de la halite primaire voisine, donnent à penser que beaucoup de ces halites limpides ont été de diagenèse très précoce alors que les eaux interstitielles étaient encore en échange avec les saumures du bassin. D'autre part, de nombreux remplissages en halite limpide ont été précédés par des développements diagénétiques de carbonates (dolomies et calcite), d'anhydrite, de célestine, de pyrite, de glauconite, etc. Ces minéraux se sont développés, par exemple sur les parois de cristaux de gypse (eux-mêmes de croissance diagénétique précoce) après dissolution de ceux-ci et avant remplissage de la cavité par de la halite limpide. On les trouve également au contact des phénoblastes de halite et de leur matrice argilo-carbonatée. On a également trouvé de l'anhydrite de formation très précoce puisque tombée dans les cavités de dissolution avant leur remplissage. Des diagenèses siliceuses pseudomorphosant les sulfates (anhydrite, célestine et peut-être même indirectement le gypse) ont été observées, étant, dans certains cas, antérieures au remplissage de halite limpide.

a) De la halite limpide, dite de cimentation et de croissance syntaxique, existe en association très intime avec la halite laiteuse primaire. Elle se présente, par exemple, en nourrissage entre les chevrons et les

cubes à faces déprimées en parfaite continuité cristallographique avec ces développements initiaux. Cette cristallogenèse très précoce de halite limpide a dû réduire considérablement la porosité du sel fraîchement déposé. Cette observation incite à mettre en doute dans ces cas l'expulsion de grandes quantités de saumure qui a parfois été supposée antérieurement : ainsi, G. Busson et J.-P. Perthuisot (1977), comparant la grande compacité du sel fossile enfoui à son extrême porosité lorsqu'il est fraîchement déposé (jusqu'à 40 % dans la Sebkh el-Melah), avaient émis l'hypothèse que lors d'une compaction consécutive à l'enfouissement les saumures occupant cette porosité avaient été progressivement expulsées dans les terrains encaissants.

b) Dans la halite dite phénoblastique, des cristaux de halite limpide (de taille centimétrique et isolés ou enchevêtrés) ont pris naissance au sein d'une matrice argileuse, argilo-carbonatée ou parfois carbonatée. Il s'agit d'un cas où la comparaison des valeurs du brome mesurées dans ces halites, et évaluées dans les halites primaires voisines, établit que ces cristaux ont été engendrés par une saumure interstitielle, de salinité égale ou comparable à celle des saumures libres. On a d'ailleurs pu comparer cette cristallogenèse à celles qui s'opèrent dans les premiers centimètres de sédiment de *mud-flats* actuels : des cristaux similaires apparaîtraient par exemple sur les rives du bassin sud de la mer Morte. Toutefois, les mêmes phénoblastes peuvent s'engendrer dans des conditions sous-aquatiques.

On a clairement distingué, par exemple dans le bassin de Valence deux types de phénoblastes, les premiers sont de type displacif (cf. Handford, 1991) et correspondent au faciès *haselgebirge* des auteurs allemands. Les cristaux ayant repoussé la matrice au fur et à mesure de leur croissance sont d'une pureté parfaite. D'autre part, il y a les cristaux incorporatifs où le cristal a incorporé de la matrice qui se répartit parallèlement aux faces du cube. Ce deuxième type correspond à une croissance plus rapide, imputable à des saumures interstitielles plus concentrées.

c) Dans le Salifère inférieur du Valentinois, on a décrit le « sel argileux » en horizons métriques à plurimétriques. Il consiste en phénoblastes de halite dans une matrice argileuse gris-vert, parfois finement gréseuse, avec des structures argileuses en fines flammèches dans les cristaux et en trabécules et patchs intercrystallins. Ces faciès ont subi une haloturbation imputable à des cristallisations successives, peut-être séparées par des phases de dissolution. Ces faciès sont liés à des apports d'eau sous-saturée, véhiculant le matériel détritique. Nous verrons que leur importance dans le bassin de Valence n'est pas fortuite.

3) La halite de diagenèse plus tardive

On citera, en particulier, de la halite macro-cristalline développée dans des cavités imputables à des dissolutions tardives. Ces cristaux peuvent avoir des arêtes ayant jusqu'à 10 cm. Un autre exemple, parmi bien d'autres, est celui de la halite fibreuse, qui a rempli des fractures dans les couches argileuses ou argilo-carbonatées obliquement ou perpendiculairement aux épontes et souvent colorée en orange par la présence d'infimes paillettes d'hématite. Ces diagenèses plus ou

moins tardives confirment, encore, l'importance des migrations de fluides, tout au cours de l'histoire de ces dépôts salins.

4) Le refermement des cavités salines

On a observé que les cavités creusées dans le sel par dissolution pour le stockage de gaz liquéfié tendent parfois à se refermer à une vitesse initialement imprévue. C'est ainsi qu'alors que les cavités de Bresse (concessions d'Étrez) présentent une bonne stabilité dans le temps, les cavités de la concession de Tersanne (Valentinois) peuvent perdre jusqu'à 30 % de leur capacité volumétrique en une durée de l'ordre d'une dizaine d'années. A notre connaissance, des différences de comportement aussi radicales n'ont pas encore reçu d'explications complètement satisfaisantes. On ignore, en particulier, si une partie de ces différences peut être imputée à des disparités de conditions tectoniques, le bassin de Tersanne pouvant être soumis à des poussées latérales plus fortes que celles qui affectent le sel de Bresse. Mais il est certain qu'une partie de ces différences prend sa source dans la structure de la halite elle-même. G. Vouille (communication orale), à la suite de mesures effectuées à l'École des Mines de Fontainebleau, schématise ainsi les résultats obtenus sur un grand nombre d'échantillons de sel. Si on évalue la déformation d'une éprouvette de sel, en fluage sous une pression de 10 mégapascals à 70°, extrapolée pour une période de 10 ans, la déformation serait de 2,5 % pour le sel de Bresse inférieur, 12 % pour le sel de Bresse supérieur et de 39 % pour le sel de Tersanne. Par ailleurs P. Bérest (communication orale) confirme ces différences par la considération des essais de perméabilité effectués sur les cavités avant leur utilisation : les fuites apparentes sont six fois plus élevées en moyenne à Étrez qu'à Tersanne et ces différences sont trop constantes pour être fortuites et imputées par exemple à des fuites dans la colonne de tel ou tel sondage.

A une autre échelle, on est frappé par l'absence de tectonique salifère affectant les dépôts des bassins de Bresse et de Valence face aux déformations halocinétiques remarquables de Haute-Alsace (comme d'ailleurs du bassin de Cardona en Catalogne espagnole, etc.) Il n'est pas impossible que ces différences de comportement soient à relier, dans ce cas, à l'absence complète de couche potassique dans les deux premiers bassins et, au contraire, à sa présence en Alsace et dans les bassins espagnols. Il a été vérifié, en effet, dans d'autres bassins que les couches potassiques peuvent constituer un lubrifiant de qualité exceptionnelle ayant, si on peut dire, un comportement plus halocinétique que le sel lui-même.

5) Conclusion

Sans revenir sur les conclusions permises par les teneurs en brome au sujet de la précocité de nombreuses halites diagénétiques, signalons que les nombreuses mesures faites sur ces séries salifères ont étayé les interprétations environnementales (*cf.* ci-dessous), en particulier globalement considérées : ces mesures confortent les résultats de la palynologie (fig. 4). Par ailleurs, aussi bien dans les séries supérieures de Bresse (E3 à E1) que dans le Salifère inférieur de Valence (T5 par exemple), les teneurs en brome très faibles observées suggèrent un remaniement de sel paléogène antérieurement déposé et pouvant être d'origine marine.

Les types de sel décrits dans ces bassins ne sont pas nouveaux, mais ils ont pu être interprétés grâce à des séries salifères épaisses, exceptionnellement bien carottées et ayant fait l'objet d'études très pluridisciplinaires. L'observation pétrographique très minutieuse, de l'échelle de la carotte à celle du microscope électronique, reste néanmoins l'approche fondamentale.

7. Couches potassiques

Le bassin de Haute-Alsace est le seul des trois bassins salifères de l'Est français à présenter des couches potassiques. Elles se localisent à la partie inférieure du Sel IV (fig. 6). La première ou « couche inférieure » se situe 40 m au-dessus du mur du Sel IV. Son épaisseur peut atteindre 6 m. La « couche supérieure » se localise 20 ou 25 m plus haut et son épaisseur ne dépasse pas 2 m. Le minéral potassique est principalement fait de sylvite. Toutefois dans la partie centrale du bassin, le mètre supérieur de la Ci peut contenir de la carnalite.

Le rythme fondamental de ces couches potassiques d'Alsace est ainsi constitué d'après M.-M. Blanc-Valleron (1990-1991) : filet d'insolubles, gris à gris foncé ; argile, carbonates et anhydrite ; puis un filet ou strate de halite gris à blanc jaunâtre ; puis filet ou strate de sylvite orange et rouge ; puis halite.

En cartographie, la courbe enveloppe de la Ci s'inscrit sans discordance importante dans les isopourcentages de halite du Sel IV (Blanc-Valleron, 1990-1991, fig. 114). Cette coïncidence confirme le schéma concentrique pour le dépôt de ces sels ultimes. En ce qui concerne la Cs, la courbe enveloppe est repoussée vers l'ouest par rapport à la localisation des isopourcentages les plus élevés du Sel IV tout en conservant la même direction (SW-NE). Ce décalage toutefois ne revêt pas la même importance que celui constaté avec les couches potassiques des bassins de Catalogne et de Navarre (*cf.* ci-dessous).

L.-A. Hardie (1990) a émis l'idée que les couches potassiques du bassin de Mulhouse avaient leur origine dans des venues hydrothermales : hypothèse qui pouvait trouver un semblant de crédibilité dans le contexte géodynamique du rift alsacien. Cette hypothèse toutefois ne résiste pas à l'examen. Les nombreuses analyses de géochimie minérale dans les strates argileuses, y compris les plus intimement associées à ces évaporites, n'ont pas relevé la moindre anomalie qui conforterait cette idée (Blanc-Valleron, 1990-1991). Par ailleurs, la position des intercalations potassiques s'inscrit à sa place dans une séquence évaporitique normale : après des influences marines, on se trouve en présence d'une série surtout salifère où les valeurs du brome sont particulièrement élevées ; la matière organique de type 2 témoigne de faibles apports continentaux, etc. On se trouve également au-dessus de niveaux où les influences marines sont bien caractérisées. Tout milite donc en faveur d'un dépôt évaporitique normal qui s'est étendu jusqu'aux sels ultimes de la paragenèse marine. Si au contraire des venues hydrothermales avaient été en cause, celles-ci auraient engendré des minéraux potassiques à un instant quelconque du remplissage salin et l'ajustement constaté avec la séquence évaporitique serait infiniment improbable.

8. Diagenèses siliceuses

La silice est relativement abondante dans ces séries massivement salifères, surtout dans celles de Bresse et de Valence. Sa moindre fréquence dans la succession homologue alsacienne ne nous paraît pas explicable pour l'instant. Il ne semble pas que nous connaissions de manifestations primaires de cette silice. Par exemple et de façon un peu surprenante, aucune diatomée n'a été signalée dans ces séries du Paléogène évaporitique, pas plus d'ailleurs dans les bassins salifères que dans les dépôts de plate-forme. Comment s'expliquer qu'aucune diatomite ne se soit jamais déposée dans un tel contexte sédimentaire ? Et s'il s'en est déposé, comment s'expliquer que toutes, sans exception, aient disparu ? Les manifestations siliceuses sont donc diagénétiques aux dépens, principalement, des sulfates (anhydrite, célestine, quelquefois peut-être gypse) ou plus rarement des carbonates. La forme qu'adopte cette silice de diagenèse semble fonction du minéral épigénisé : il peut s'agir de sphérolites de quartzine (fréquents dans l'anhydrite), de lutécite, de microquartz palisadiques ou isométriques, etc. Cette exceptionnelle mobilité de la silice s'explique par la présence conjointe de sulfates individualisés et de saumures très salines.

9. La matière organique dans les dépôts-centres des bassins salifères

1) Haute-Alsace

F.-F. Langford et M.-M. Blanc-Valleron (1990), utilisant le graphe S2 sur COT, ont mis au point une méthodologie permettant à partir des mesures du Rock Eval d'évaluer l'index d'hydrogène moyen, l'effet de matrice, les types de kérogène et les potentiels pétroliers des roches analysées.

Au-dessus de couches sidérolithiques, remarquablement pauvres en matière organique, l'Infrasalifère se présente déjà comme une formation confinée et évaporitique, caractérisée par la présence de couches riches en matière organique (calcaire bitumineux en particulier) et de passées anhydritiques. Le Salifère inférieur se marque par un enrichissement lent et progressif des teneurs en matière organique. Au-dessus, à la base du Salifère moyen, le Sel III montre les teneurs les plus élevées en matière organique. En même temps que le COT s'accroît, la teneur relative en matière organique continentale diminue. Cette zone riche du sel III correspond à la zone bitumineuse inférieure des anciens auteurs. Globalement, les sondages à isopourcentages de halite les plus élevés — c'est-à-dire ceux où les bancs d'insolubles sont les plus fins — s'avèrent les plus riches en matière organique : les séries bordières étant donc les moins riches. L'unité 1 (Langford et Blanc-Valleron, 1990), correspondant à la partie supérieure du Sel III, a révélé en position centrale dans le bassin (DP 92) des COT de plus de 3 %, une matière organique de type 2 et de l'ordre de 40 % d'hydrocarbures productibles : de tels niveaux constituent une très bonne roche-mère. En bordure de bassin (DP 204), la quantité de MO est plus faible, mais sa nature est la même.

Au-dessus, la Zone fossilifère où les passées marines franches (avec présence d'une faune benthique attes-

tant au moins sporadiquement de bonnes conditions d'oxygénation de fond) sont remarquables, est, au contraire, très pauvre en matière organique. La matière organique, moins abondante que dessous et dessus est de type 3 et ne contient qu'une proportion de 25 à 30 % d'hydrocarbures productibles. Avec des caractéristiques marginales, la Zone fossilifère de DP 204 est encore plus pauvre.

Juste au-dessus de cette Zone, dès la base du Sel IV, les Marnes rayées bitumineuses, gris foncé à gris-brun, sont particulièrement riches en matière organique de type 2. Elles correspondent à la Zone bitumineuse supérieure. Mais celle-ci n'est pas un intervalle stratigraphique dans la mesure où elle monte jusqu'au banc U20 dans certaines parties du bassin, alors qu'ailleurs elle peut ne pas dépasser U6. Dans cette zone, la richesse n'est proportionnelle ni aux isopourcentages de halite, ni aux épaisseurs de séries ; elle est plutôt à mettre en relation avec la position du sondage par rapport aux zones de plate-forme et de hauts-fonds entre les deux sous-bassins. F.-F. Langford et M.-M. Blanc-Valleron ont précisé que l'unité 3 de la même publication (1990), allant des couches S2 à U5 retrouvaient des COT comparables à ceux de l'unité 1, avec également de bonnes qualités de roches-mères. Les valeurs comparables observées en position centrale (DP 92) et marginale (DP 204) suggèrent à cette époque une uniformité des conditions de sédimentation dans tout le bassin.

M.-M. Blanc-Valleron *et al.* (1991) apportent des données intéressantes sur la répartition verticale et stratigraphique de la matière organique dans les unités basales du Sel IV. Au sommet des rythmes argileux, les passées argilo-anhydritiques s'avèrent les plus riches ; alors que le sommet des bancs de halite montrent les teneurs les plus basses. Une telle répartition risque d'avoir une origine complexe. On peut cependant supposer que les premières (couches argilo-anhydritiques), marquant l'installation du régime évaporitique franc, se caractérisaient par la présence d'un corps d'eau stratifié aux potentialités préservatrices notables. Au contraire, le dépôt de la halite devait se faire sous corps d'eau unique et peut-être sous une tranche de saumure très faible : deux conditions peu favorables à une bonne préservation.

L'unité 4 (Langford et Blanc-Valleron, 1990), allant de U6 à U21 du Sel IV, présente à peu près les mêmes caractéristiques en position centrale (DP 92). Mais, en position marginale (DP 204), la MO est moins abondante et le type 3 s'y trouve présent. A la partie supérieure du Sel IV et dans le Sel V, la quantité et la qualité de la matière organique décroissent. C'est dans un sondage (DP 84) où la série est particulièrement épaisse que la qualité reste la meilleure. Dans ces niveaux, le kérogène serait en général de type 3.

Dans les Marnes sans sel susjacentes, la quantité de matière organique reste au minimum et les hydrocarbures productibles très faibles. Enfin, la transgression marine des couches susjacentes amènera de nouveau une matière organique de type 2, plus abondante même que dans les couches salifères.

Rappelons que l'absence d'hydrocarbures exploitables en Haute-Alsace, en contraste par rapport au

bassin de Péchelbronn, tient à un degré géothermique qui y est pratiquement deux fois plus faible et à l'absence de couches poreuses, réservoirs potentiels.

2) Bresse

Les intervalles les plus riches en matière organique se situent dans la brèche, à la partie supérieure du Sel E1, et dans la série stérile intermédiaire. D'après des études en cours de R. Moretto et A. Curial, le potentiel pétrolier moyen y serait supérieur ou égal à 3 mg HC/g de roche avec un maximum de 4,2 dans la brèche. Il peut s'agir alors de roche-mère moyenne à bonne. La conjonction, à certains niveaux, de l'abondance de débris ligneux avec le type 3 de la matière organique est un argument pour faire imputer ce kérogène aux apports d'eaux turbides. Pourtant, il existe aussi de la matière organique de type 2, habituellement rapportée à des proliférations algaires marines. En outre, d'après les travaux en cours de R. Moretto et A. Curial, les corrélations seraient meilleures entre la courbe de COT et la teneur en carbonates qu'entre la courbe de COT et la teneur en insolubles : la matière organique est donc plus abondante dans les faciès chimiques que détritiques. De ce fait, la corrélation est moyenne mais significative entre COT et pourcentage en minéraux gonflants alors qu'elle est mauvaise entre COT et minéraux argileux détritiques (illite, kaolinite, chlorite). Pourtant, une corrélation entre IH et l'abondance des minéraux détritiques confirme l'existence d'une matière organique d'origine continentale, qui s'enrichit quand la sédimentation argileuse détritique devient plus nette.

3) Bassin de Valence

Les couches riches en matière organique se cantonnent dans les laminites de l'Infrasalifère, de l'horizon B (formation T4) et de la Formation marneuse intermédiaire. Mentionnons aussi certains minces lits noirs des dolomicrites qui existent dans la Formation évaporitique supérieure. D. Dumas a fait observer que les analyses ayant montré des teneurs relativement élevées ne portent que sur des niveaux très fins, encaissés dans une matrice très pauvre. Au sommet de la formation T4, il est intéressant de noter la coïncidence entre la présence — assez exceptionnelle — de matière organique de type 1 d'une part et, d'autre part, l'existence de nannoflore calcaire : ces deux données convergeant sur l'importance des développements algaires. Dans la Formation marneuse intermédiaire, le type 1 a été repéré dans les faciès laminés, le type 3 dans des argiles qui sont parfois riches en débris végétaux. Le type 2 n'a pas été clairement reconnu dans le Valentinois.

C. Les dissolutions des séries salifères : importance et enseignements

Les dissolutions ont revêtu dans ces bassins de rifts paléogènes une importance considérable. Cela s'explique sans doute par la taille relativement réduite de ces bassins (en comparaison au moins avec des accumulations évaporitiques telles que celles du Dévonien moyen du centre et de l'Ouest canadien), par leur situation intracontinentale et enfin par la mobilité tectonique de l'arrière-pays et même de leur partie marginale. Les dissolutions à grande échelle doivent être évaluées si l'on ne veut pas interpréter faussement la répartition

actuellement visible des épaisseurs en termes de subsidence originelle : certaines zones minces sont, en fait, des zones rehaussées où des quantités de sel importantes ont été de ce fait dissoutes. Enfin, une meilleure connaissance de ces dissolutions est indispensable pour apprécier la qualité de ces masses salifères comme récepteurs de déchets à longue durée.

1) Aux échelles centimétriques et décimétriques

Il s'agit en particulier des dissolutions, déjà évoquées dans le texte ci-dessus, au sommet de chaque rythme salifère dont l'empilement constitue le sel zébré. Trois conclusions s'en dégagent, portant sur les caractères de la tranche d'eau et sur la diagenèse.

a) Il a déjà été dit ci-dessus que l'existence de dissolutions au sommet de chaque rythme, en impliquant une dilution de toute la tranche de saumure à chaque arrivée d'eau de mer fraîche, rend très probable que cette tranche de saumure était peu épaisse et donc que ces bassins étaient, le plus souvent, peu profonds. Une hypothèse alternative, toutefois, mais bien improbable, serait que l'eau de mer entrant dans le bassin salifère coulerait peu après avoir commencé son mélange avec les saumures, par exemple parce qu'elle serait plus froide.

b) Après cette arrivée d'eau de mer fraîche, la dissolution est, malgré tout, restée limitée. Elle a cessé quand une certaine tranche d'eau de fond s'est trouvée saturée. Ce phénomène s'est établi au moment du démarrage du rythme suivant. On peut penser que ces conditions ont éminemment favorisé l'épandage des minéraux argileux qui sont effectivement, parfois, présents dans la lamine d'insolubles. Ces épandages sur une pycnocline ou à proximité de cette surface sont, en effet, éminemment probables dans les bassins salifères (Schmalz, 1971 ; Sonnenfeld, 1984 ; Busson et Cornée, 1988).

c) Le caractère franc de la surface de dissolution au sommet du rythme donne à penser que le sel du rythme précédent était déjà cimenté. Cela signifie que la halite limpide de cimentation et de croissance syntaxique était déjà en place. Il y a là une confirmation remarquable, en même temps qu'une précision supplémentaire par rapport aux arguments amenés par l'analogie entre les teneurs en brome des halites limpides, de nourrissage et des halites laiteuses, primaires. Ces halites de cimentation et de croissance syntaxique mériteraient d'être appelées syngénétiques, plus même que diagénétiques.

2) Les dissolutions à l'échelle du banc sur l'exemple de la formation E4 en Bresse

Les phénomènes qui vont être cités ont été mis en évidence sur le champ d'Etrez, grâce à la proximité des puits et à l'existence d'une diagraphie très sophistiquée, le SHDT. Les faits établis se situent à la partie inférieure de la formation E4 de Bresse (cf. § III. A.2.). Plus précisément, dans les bancs de sel des cycles 20 à 22 s'intercalent de minces lits argilo-carbonatés centimétriques à décimétriques et qui sont bien visibles au pendage mètre haute résolution (SHDT). Sur une coupe N-S (fig. 20), on peut observer comment les bancs de sel, épais et presque continus dans le nord se biseautent vers le sud. On observe, en effet, que les fins

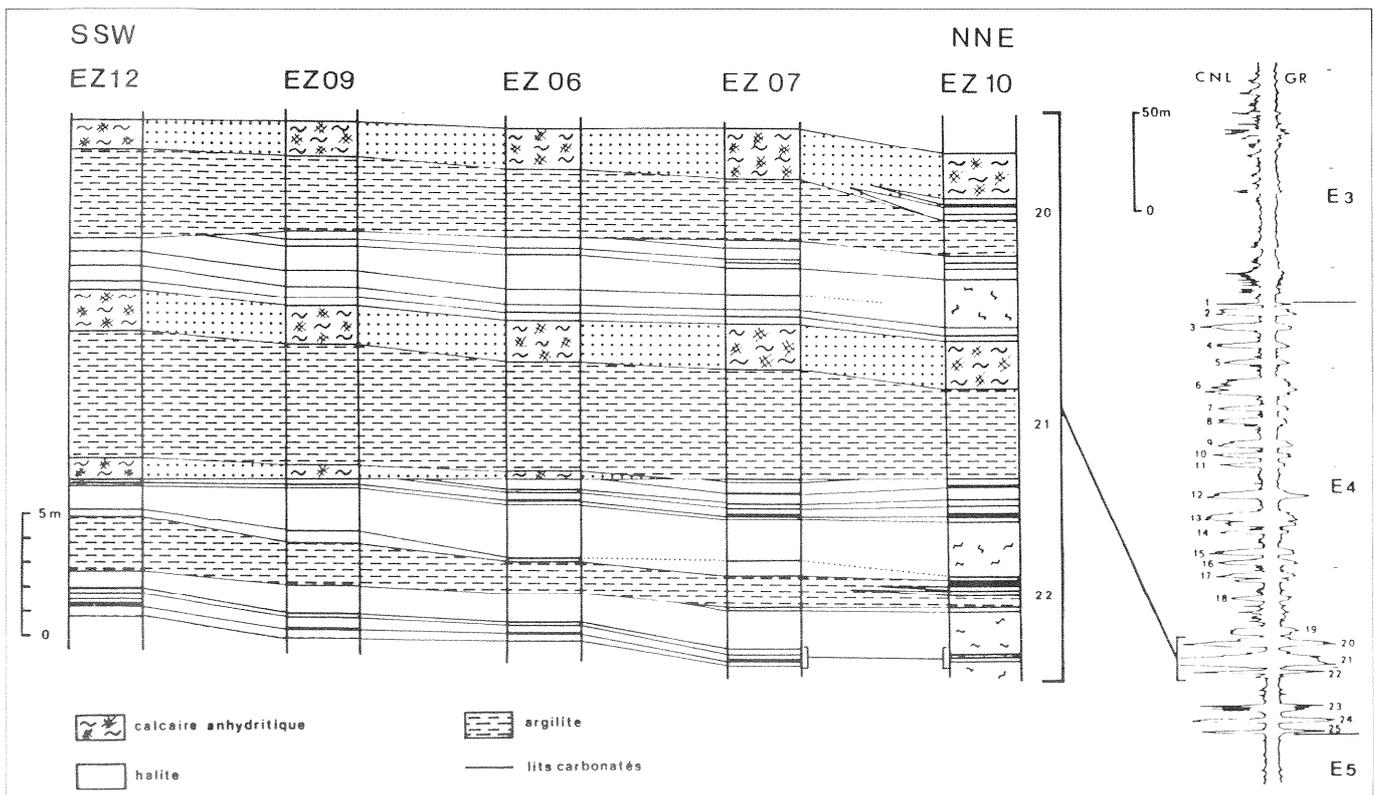


Fig. 20. - Reconstitution lithologique par diagraphies, interprétation des couches de pendagemétrie et corrélations entre les sondages EZ 12, 09, 06, 07 et 10 ; mise en évidence de dissolution au toit des couches de sel en relation avec les bancs d'argilites 20 et 21 (partie inférieure de l'ensemble E4). La troncature des horizons salifères (vers le sud) est révélée grâce à la corrélation des lits argilo-carbonatés très minces détectés par les outils de pendagemétrie. D'après A. Curial (1988), fig. 45.

Fig. 20. - Lithological reconstruction from well logging, interpretation of beds from dip readings and correlation between drill-holes EZ 12, 09, 06, 07 and 10; evidence of dissolution at the tops of the salt beds related to clay beds 20 and 21 (lower part of Unit E4). The truncation of the salt beds (to the south) is shown from the correlation of the very thin clay-carbonate layers detected by dip metres. After A. Curial (1988; Fig. 66).

marqueurs argilo-carbonatés et le sel intercalé ne se réduisent pas en épaisseur vers le sud ; mais que ces niveaux sont successivement tronqués par une discordance. Cette érosion du sel et de ces marqueurs est de plus en plus poussée vers le sud. La disparition de l'ensemble des bancs de sel dans cette direction résulte donc d'une érosion imputable à une dissolution. La fraction résiduelle laissée par la dissolution du sel qui s'étendait initialement au sud a pu être repérée. Dans le cas du banc 20, en effet, la couche argileuse sus-jacente est superposée à des carbonates et de l'anhydrite au sud et à du sel à peu près pur au nord. Cette observation est importante pour l'interprétation de cette série (cf. § III. E.2).

3) Les dissolutions à l'échelle décimétrique dans le Valentinois

Des dissolutions d'ampleur plurimétrique ont été observées sur carotte sous la forme de contacts sub-vectifs entre, d'une part, du sel primaire en général laiteux et, d'autre part, de la halite limpide très pure ou du sel argileux. Ce dernier, d'aspect souvent chaotique, correspond à des apports d'eau turbide *a priori* peu salée, facteur évident de dissolutions. Ces phénomènes sont d'autant mieux explicables qu'ils apparaissent dans des sondages (champ de Tersanne) à toute proximité de l'accident majeur qui met en relation les forma-

tions salifères à l'est et, à l'ouest, les formations marginales argilo-gréseuses. Or, cet argilo-gréseux bordier n'a pas manqué de drainer un aquifère important, à la fois à cause de son épaisseur et de son extension et à cause de sa proximité avec un Massif central en partie au moins émergé.

Par ailleurs, l'ensemble des observations dans le Valentinois, à toutes les échelles, y compris les valeurs de brome souvent très faibles, milite en faveur de remobilisation constante de la halite initialement déposée sur les bordures vers les secteurs centraux les plus subsidés. Cette hypothèse est extrêmement plausible, et il faut en tirer deux conséquences importantes :

a) puisque les dépôts-centres collectaient les saumures ayant dissous du sel marginal et préservait ainsi ce sel provenant des marges, il faut admettre que la sédimentation s'y faisait sous une certaine tranche d'eau, au moins pendant une partie du temps.

b) cette dissolution et remobilisation du sel sur les marges rendent probables que celles-ci étaient affectées de temps en temps de légers mouvements de rehaussement, complémentaires des mouvements d'enfoncement du ou des dépôts-centres.

L'ensemble de ces caractères différencie le bassin de Valence des autres segments salifères du rift français : très faible largeur du sillon axial salifère, mobilité des zones marginales, etc.

4) La brèche du sommet du sel en Bresse

La série salifère la plus élevée et sa couverture présentent en Bresse burgienne, en particulier vers le nord-est du bassin, un certain nombre d'anomalies intéressantes. 1) On a repéré sur des carottes du champ d'Étrez la présence d'une brèche sédimentaire épaisse de plusieurs mètres, séparant le sel (formation E1) de sa couverture (Kiener, 1984 ; Moretto, 1986-1987 et Curial, 1986-1987) (fig. 21). Cette brèche sédimentaire tend à s'épaissir vers le nord-est du champ. 2) La série salifère de la formation E1 est épaisse et elle apparaît très complète dans le centre de la Bresse burgienne (sondages de Polliat, Viriat, Mbg1, etc.) au sud du champ d'Étrez et, dans ces régions, la brèche n'est que peu ou pas représentée et la série de couverture susjacentes peu ou moyennement épaisse. 3) Au contraire, en position très septentrionale, en approchant du seuil de Cormoz (forage DP 104 par exemple), la série salifère est très réduite, jusqu'à 140 m de série semblant manquer par comparaison avec certains sondages plus méridionaux. Et, au-dessus de cette série salifère apparemment amputée, se présente une série de couverture épaissie avec, en particulier, à la base une série sulfatée très dilatée.

Il y a nettement un rapport entre la proximité des bordures du bassin (bordure nord du seuil de Cormoz, bordure est du Jura), l'intensité de la dissolution du sel, l'épaisseur de la brèche et/ou l'épaisseur de la série de couverture susjacentes : la brèche et une partie de la couverture (en particulier toute sa partie basale sulfatée) pourraient être les équivalents d'une partie de la série salifère épaisse et complète du centre du bassin.

En outre, la carte en isobathes du repère H3 (fig. 51A, Curial, 1986-87) ne dessine aucune structure d'effondrement à la verticale des zones les plus affectées par la dissolution : il ne s'agit donc pas d'un phénomène de dissolution sous couverture, plus ou moins largement post-sédimentaire.

L'observation pétrographique de la brèche du champ d'Étrez révèle une matrice argileuse, verdâtre, ennoyant des éléments micritiques (de taille inframillimétrique à centimétrique) et anhydritiques, étirés et allongés dans le sens de la stratification. Les couches, ainsi typiquement bréchiques, admettent des passées de marnes et d'argilites sans éléments individualisés. Ces argiles sont constituées de deux paragenèses minéralogiques différentes. L'observation prouve que les éléments de la brèche sont des nodules diagénétiques et non pas des galets ou des éléments fracturés après induration. La brèche, en outre, comporte de nombreuses structures collapsées.

Ces observations s'opposent à l'interprétation de cette brèche comme le résultat d'un épandage détritique à partir d'aires émergées ou même comme la reprise d'éléments déjà antérieurement déposés en région amont. À l'évidence, cette brèche résulte d'une dissolution du sel : mais non d'une dissolution tardive faite sous couverture. Non seulement les éléments individualisés n'ont pas été bréchifiés après lithification, mais la présence d'intercalations argileuses (*a fortiori* dès lors qu'elles contiennent deux paragenèses) prouve que, conjointement et alternativement avec les épisodes de collapse imputables à la dissolution sous-jacente du sel, se produisaient des épisodes de sédimentation avec apport de matériel allochtone fin.

Quand on s'éloigne vers le sud de cette région d'Étrez, nous avons dit que la brèche sommitale s'amincissait en même temps que la série salifère se complétait. Or, cette série salifère admet des intercalations d'insolubles d'une épaisseur d'ordre décimétrique. L'observation pétrographique a révélé que ces intercalations étaient très semblables à la brèche : matériel graveleux diagénétique dans une matrice argileuse. On en a conclu, que ces passées argilo-carbonatées de la série salifère n'étaient pas *tronquées* vers le nord-est sous une surface de dissolution ; elles s'enracinent dans la brèche épaisse de la région nord-est. Ces passées argilo-carbonatées dans la série salifère sont en quelque sorte comme des émissaires envoyés dans le domaine salifère de façon répétée du nord-est vers le sud-ouest.

Les très faibles valeurs en brome du sel de la formation E1 s'intègrent dans ces phénomènes. La série E1 très complète du Sud correspond aux lessivages répétés du sel déposé sur les régions plus septentrionales. Ces lessivages offraient de la place à la sédimentation bréchique et le sel ainsi recyclé se déposait plus au Sud avec des teneurs en brome plus faibles. En définitive, la brèche ne résulte pas d'un événement de dissolution majeur après la fin du dépôt de la halite. Il s'agit d'un phénomène précoce, mais aussi polyphasé, en alternance avec des périodes de sédimentation halitique dont les dépôts ont été entièrement lessivés au nord du bassin. Au fil du temps, l'intensité des dissolutions et l'épandage de leurs produits vers le sud s'accroissent. Certes, ces phénomènes impliquent, dans la région du seuil de Cormoz et d'Étrez, l'action d'eau septentrionale. Néanmoins, l'amincissement général de la série et la persistance d'aires salifères à toute proximité nécessitent une explication complémentaire. Le fait nouveau doit être l'exhaussement répété, saccadé, de la région septentrionale synchroniquement avec l'enfoncement persistant de la région méridionale (Busson, observations à Moretto, 1985). Ce double mouvement explique à la fois les dissolutions répétées dans la région nord et la conservation du sel au sud. Ce mouvement, préfigurant la fin du dépôt salifère en Bresse burgienne, est une grande nouveauté par rapport aux temps antérieurs. Rappelons en effet que pendant le dépôt des sels E2 et E3 les apports détritiques venaient du sud (Péronas, Polliat) et les saumures se concentraient au nord.

5) Les dissolutions à l'échelle de toute la formation salifère

La carte en isobathes du repère H4 (fig. 22) pour la Bresse burgienne et les coupes de la figure 23 mettent en évidence des structures d'apparence synclinale très nettes de part et d'autre du bassin. Ces structures coïncident avec les limites d'extension du bassin salifère. Il apparaît donc hautement vraisemblable que ce remplissage épais des séries de couverture *sensu lato* corresponde au remplissage de la place laissée offerte par la dissolution du massif salifère sur ses bordures les moins profondément enfouies et les plus exposées. Ce phénomène est fossile et n'a plus aucune activité dans la mesure où ces structures d'apparence synclinale sont scellées par des niveaux susjacentes isopaques.

6) Conclusion

Nous avons vu l'importance fondamentale du repérage des dissolutions, aussi bien pour l'histoire environ-

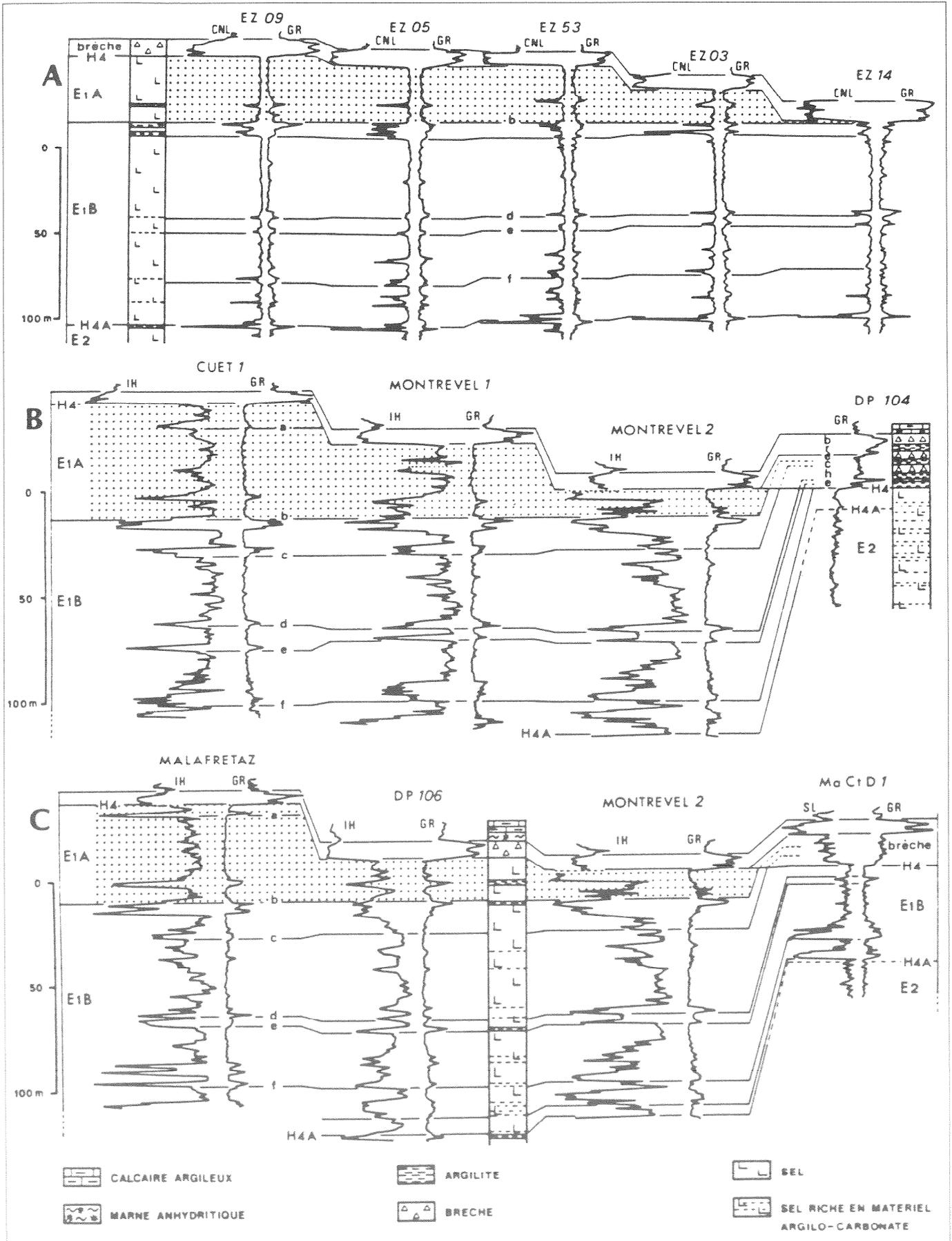


Fig. 21. - Correlations dans l'ensemble E1 entre différents sondages de la Bresse burgienne septentrionale. En grisé : matérialisation du sous-ensemble E1A, très largement affecté par les phénomènes de dissolution de la halite. D'après A. Curial (1988), fig. 66.

Fig. 21. - Correlations within Unit E1 between drill holes in southern «burgian» Bresse. In grey: subunit E1A, largely affected by halite dissolution. After A. Curial (1988; Fig. 66).

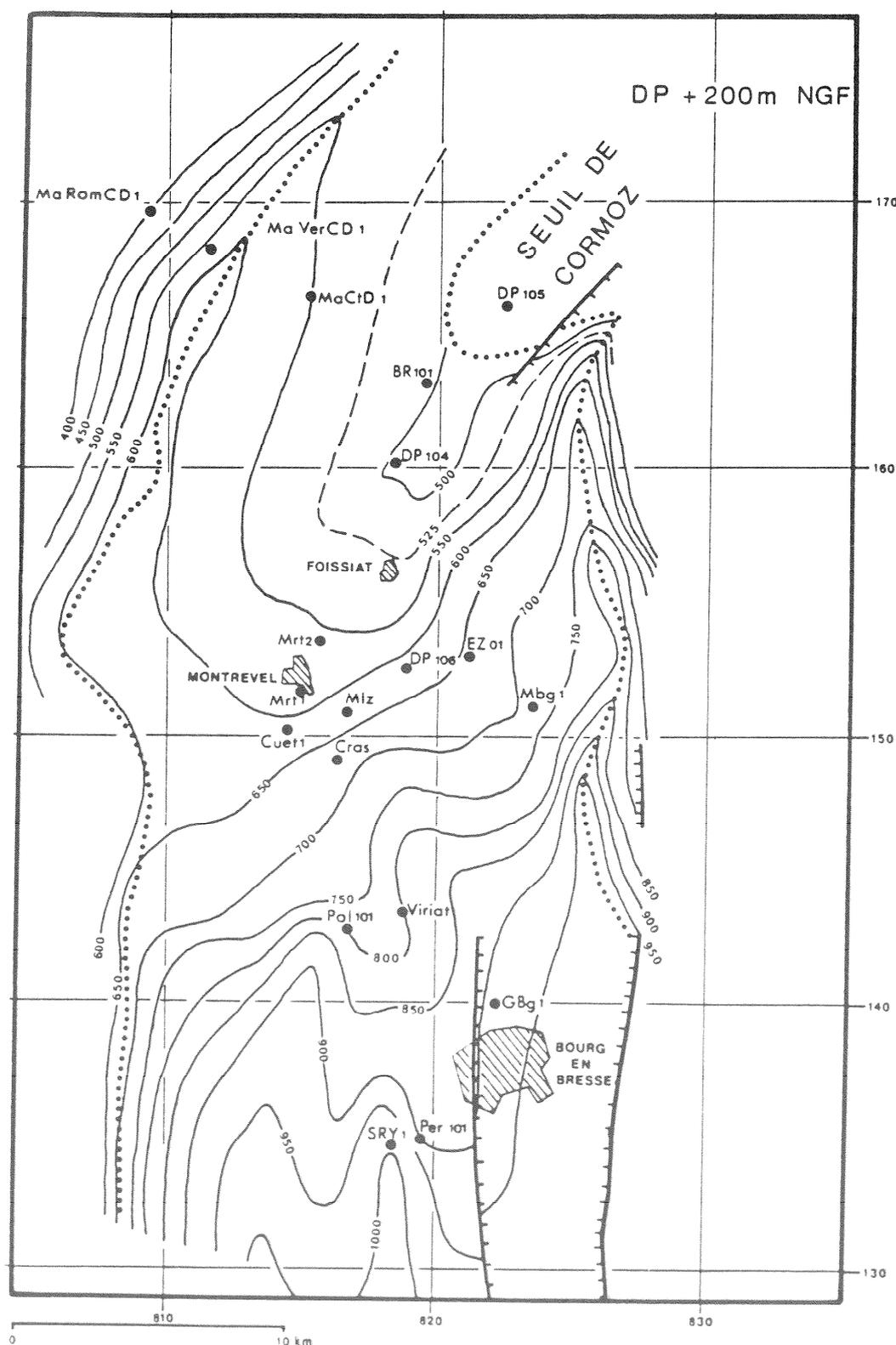


Fig. 22. - Carte en isobathes du contact entre le Salifère et sa couverture (repère H4) en Bresse. Cette carte tient compte des données de sismique proposées par C. Leroy (1984, in A. Curial, 1986-1987). En pointillés, limite supposée de l'extension des faciès salifères. D'après A. Curial (1988), fig. 61.

Fig. 22. - Isobath map of the contact between the «Salifère» (salt formation) and its cover (marker H4) in Bresse. This map takes account of the seismic data proposed by C. Leroy (1984, in A. Curial, 1986-1987). Dotted line: presumed limit of the salt facies. After A. Curial (1988; Fig. 61).

nementale que structurale du bassin. Cette importance n'est pas moindre pour la géologie appliquée. Dans la mesure, en effet, où des dissolutions de la masse salifère sont repérées et quantifiées à toutes les échelles, il apparaît que l'on pourra se fier au géologue du sel quand il affirmera, au contraire, que tel massif salifère n'est pas actuellement sujet à des dissolutions ou ne risque pas de l'être dans un avenir prévisible. Or, cette capacité du géologue a une grande importance dans la

perspective de stockage de longue durée de déchets dangereux dans de tels massifs de sel.

D. Essai de synthèse stratigraphique et paléogéographique

Cet essai de synthèse de l'histoire sédimentologique des différents segments et bassins salifères du rift et de leur contexte a pour but d'aider à préciser les méca-

217

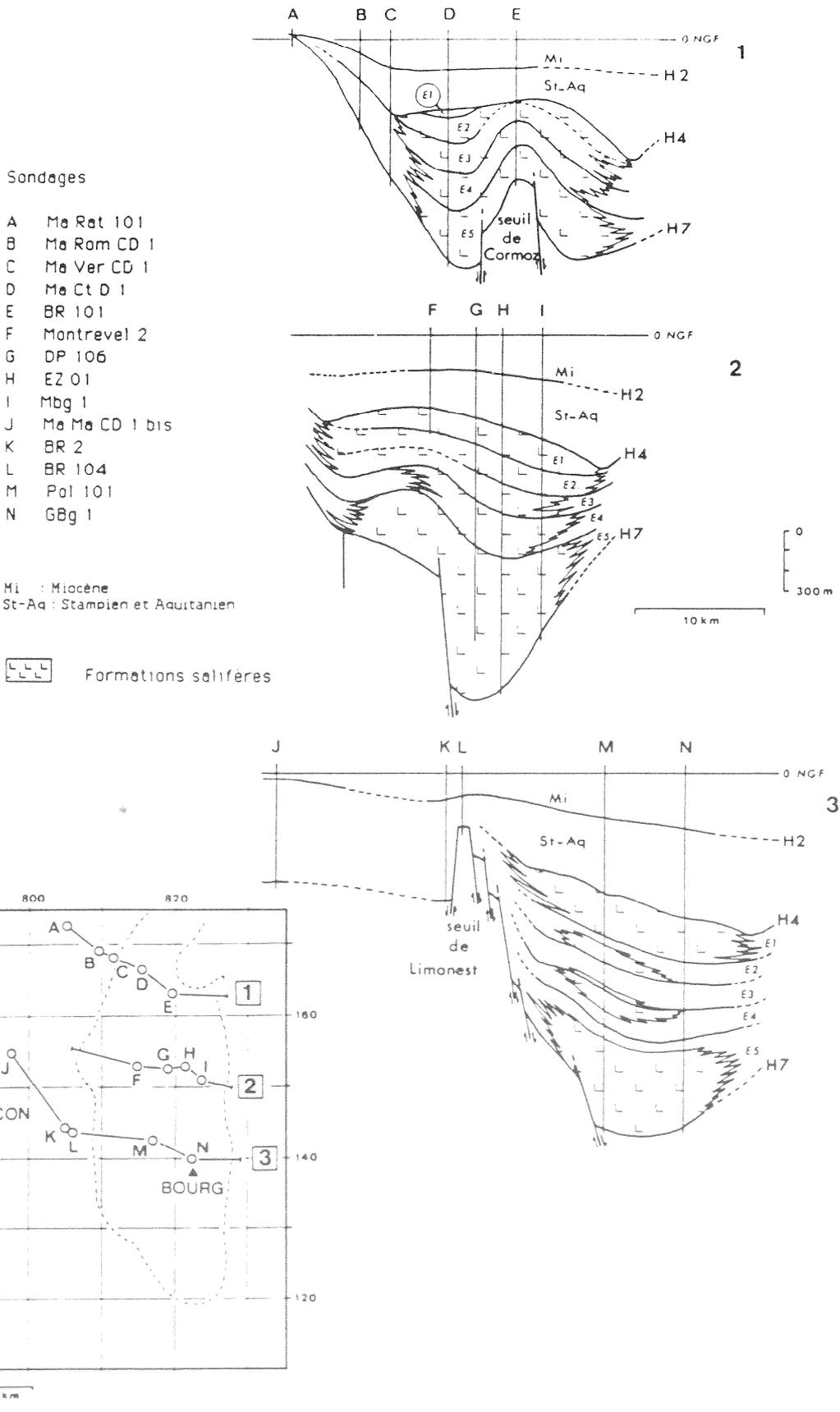


Fig. 23. - Trois coupes transversales du bassin salifère de Bresse, établies à partir des données de sismique et des sondages profonds, et carte de situation (en tiretés, limite supposée de l'extension des faciès salifères). D'après A. Curial (1986-1987), fig. 69.
Fig. 23. - Three transverse sections through the Bresse salt basin, based on seismic data and deep drilling, and location map (dashed line: presumed limit of the salt facies). After A. Curial (1986-1987; Fig. 69).

nismes mêmes de la sédimentation. La contemporanéité des grandes phases évaporitiques, par exemple, dans des segments différents, aura à l'évidence des implications sur le déterminisme climatique, tectonique au centre de ces faciès, sur leur relation avec l'océan ou leur alimentation continentale, etc.

1) Avant le Ludien supérieur

La plate-forme du bassin de Paris offre l'exemple d'une sédimentation évaporitique particulièrement précoce : au-dessus des faciès marins, des gypses apparaissent dès le Lutétien supérieur, suivis de récurrences dans le Bartonien ; c'est ainsi que la quatrième masse de gypse est d'âge marinésien.

D'autres phénomènes sont importants dans ce bassin de Paris et ses approches, de répartition plus vaste que la seule cuvette gypseuse. M. Laurain (1988) évoque la longue période d'émersion et d'altération qui s'est étendue de la fin de la sédimentation yprésienne jusqu'à l'Éocène supérieur compris. Cette longue période s'est avérée éminemment favorable à la genèse de croûtes calcaires et siliceuses qui ont littéralement carapaçonné le paysage. Ces phénomènes ont été évidemment propices à tarir toute alimentation détritique importante en provenance des bassins versants et une telle circonstance n'a pu manquer de favoriser la sédimentation évaporitique dès qu'une subsidence apparaissait à l'Éocène supérieur ou au Stampien.

Dans le sud-est de la France, au Bartonien et au Ludien inférieur, des épandages détritiques se généralisent. Dès le Bartonien, une amorce de structuration forme des bassins tels que celui de Mormoiron qui, lors de cette phase précoce, se remplissent de détritiques. Du Languedoc à la Durance, au Ludien inférieur, la sédimentation carbonatée et parfois détritique se développe à partir de gouttières et petits bassins mis en place au Marinésien et qui s'élargissent vers le nord.

Les grands bassins salifères, quant à eux, présentent souvent, sous les premiers faciès évaporitiques présalins, des couches paléogènes de faciès sidérolitiques reposant sur les termes les plus variés de substratum mésozoïque. Ce Sidérolitique représente le remaniement de couvertures effectué sous un climat relativement humide, contrastant fortement avec celui qui va prévaloir pendant la généralisation évaporitique qui s'amorce au début du Ludien supérieur, tant par les dépôts salins des grands rifts que par les dépôts gypseux des plates-formes (Carpentras, graben de Narbonne-Sigean, etc.).

2) Le Ludien supérieur

Rappelons d'abord que sur la plate-forme du **bassin de Paris**, le Ludien moyen-supérieur correspond aux trois masses de gypse supérieures. Au-dessus, dans les Marnes d'Argenteuil, existent encore quelques passées de gypse. Ces couches de sulfate de calcium sont remarquablement intercalées d'argiles et de marnes magnésiennes (attapulгите, sépiolite, smectite). Géographiquement, ces gypses passent aux Calcaires de Champigny, vers l'est et le sud-est. Ils passent également à des calcaires vers l'ouest et le nord. Il est intéressant de noter, dans ce domaine de plate-forme (comme dans celui du bassin d'Aquitaine), la présence de sédiments évaporitiques qui sont, approximativement au moins, contemporains des séries salifères mas-

sives qui caractérisent plusieurs segments du rift. Cette extension des évaporites à des domaines structuraux et paléogéographiques si différents pèsera sur nos interprétations sédimentaires.

Le début de cette époque (Ludien moyen-supérieur) est caractérisé par un événement considérable : l'ouverture en distension de fossés orientés NNE-SSW et qui représentent des segments du rift. Cette structuration nouvelle d'orientation grossièrement N-S crée ainsi des bassins très subsidents, en particulier en Haute-Alsace, à l'ouest du Jura, à l'ouest des Alpes et jusque dans le golfe du Lion. Le remplissage est massivement salifère dans la plupart de ces bassins (Mulhouse, Bresse, Valence, Crau, peut-être golfe du Lion). Dans les deux derniers de ces bassins, il est en fait difficile d'affirmer que la série salifère démarre dès le Ludien. Le remplissage contemporain est fait de couches asphaltiques avec un peu de sulfate de calcium dans le bassin d'Alès. *La contemporanéité entre le démarrage de cette subsidence très active et l'apparition d'évaporites massives souligne déjà le rôle de la tectonique dans cette sédimentation.*

Les corrélations entre les trois grands bassins salifères sont évidemment fondées sur des déterminations palynologiques (Schüler, 1988-1990) et sont illustrées dans le tableau 1.

Le même auteur estime que les séries ludiennes n'ont pas été traversées dans le Valentinois. Elles pourraient y être représentées par les séries sous-jacentes à l'Infrasalifère recoupé dans les forages CII et GVA1 ; ces séries non forées pouvant comporter du sel sur une épaisseur de l'ordre de 500 m, d'après l'interprétation des profils de sismique-réflexion.

Le reste des régions rhodaniennes et les régions méditerranéennes ont été moins subsidentes. Qu'il s'agisse de plates-formes ou de bassins, la sédimentation confinée ne s'est exprimée à la même époque du Ludien moyen-supérieur que par des carbonates et du sulfate de calcium, aussi bien sur les plates-formes que dans les bassins (bassin de Mormoiron avec le complexe chimique de Blauvac, bassin d'Apt, Marseille, Saint-Pierre-lès-Martigues, Carpentras, Narbonne). La halite n'a pas été repérée dans ces zones, soit qu'elle ne s'y soit pas déposée, soit qu'elle ait été dissoute précocément. Le bassin de Mormoiron, particulièrement typique, s'avère plus petit que les fosses salifères (une dizaine de kilomètres du nord-ouest au sud-est). Son remplissage sulfaté, à l'intérieur des marges carbonatées, ne dépasse pas 200 m d'épaisseur. Il n'est pas exclu toutefois que la halite soit présente au centre de ce bassin.

Rappelons que dans le **Massif central**, le bassin du Puy, où la sédimentation évaporitique a démarré précocément, présente déjà des gypses dans des séries attribuées au Ludien (Mont-Anis).

Il est intéressant de mettre en relation l'évolution des segments du rift à cette époque avec les **événements alpins**. Après les régressions crétacées, l'histoire marine des Alpes occidentales a démarré timidement à l'Éocène inférieur (Cuisien) pour se développer à l'Éocène moyen et surtout à l'Éocène supérieur et à l'Oligocène inférieur (Stampien) (fig. 24). S'ouvrant vers une mer située à l'est, ces régions offrent au long de

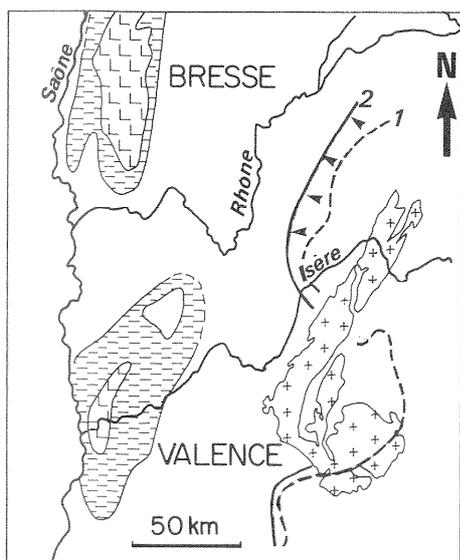


Fig. 24. - Limites d'extension de la mer priabonienne (1) et stampienne (2) dans le domaine alpin septentrional (les massifs cristallins externes sont figurés par des croix) (d'après Pairis *et al.*, 1984 in Dumas, 1988) et les limites des dépôts salifères ludiens stampiens inférieurs et de leurs équivalents latéraux dans les fossés de Valence et de Bresse. On peut noter le caractère transgressif de la mer stampienne et la faible distance séparant le domaine marin des bassins évaporitiques à cette époque, d'après D. Dumas (1988), fig. 105.

Fig. 24. - Limits of the Priabonian (1) and Stampian (2) seas in the southern Alpine region (the outer crystalline massifs are shown by crosses) (after Pairis *et al.*, 1984, in Dumas, 1988) and limits of the Ludian-Early Stampian salt deposits and their lateral equivalents in the Valence and Bresse troughs. Note the transgressive character of the Stampian sea and the small distance separating the marine domain of the evaporite basins of this period. After D. Dumas (1988; Fig. 105).

l'Éocène une migration spectaculaire des faciès marins vers l'ouest. La triade classique : calcaires à nummulites, marnes à foraminifères planctoniques, grès du flysch qui correspond à un approfondissement progressif, se déplace en effet de façon diachrone de l'est vers l'ouest, progressant en particulier au Priabonien supérieur. En même temps, la structuration prend une composante méridienne marquée, à l'origine en particulier de sillon pré-alpin. L'apparition de cette structure méridienne se fait donc à la même époque que les fossés très subsidents du rift à remplissages salifères. En outre, il est frappant que l'avancée maximum de la mer alpine (Priabonien supérieur, Stampien) correspond remarquablement aux deux intervalles salifères principaux des bassins de rift (Bresse, en particulier).

3) Le Stampien

a) Les bassins salifères

À cette époque, une subsidence très active affecte un certain nombre de segments du rift et les dépôts-centres de ces fossés sont caractérisés, comme au Ludien supérieur, par une sédimentation massivement salifère. Dans le cas de la Haute-Alsace et de la Bresse, ces dépôts font suite à ceux du Ludien supérieur auquel ils se superposent exactement. Dans le cas de Valence, où le Ludien supérieur n'aurait pas été atteint par les forages, et dans le cas de la Camargue, où les séries sont moins bien datées, cette superposition est probable mais n'est pas démontrée.

La comparaison de ces différents remplissages salifères est possible grâce aux corrélations stratigraphiques, fondées en particulier sur les études palynologiques (Schüler, 1988-1990) (tableau 1). En plus de certaines analogies pétrographiques ou faunistiques entre la formation E4 de Bresse et la zone fossilifère d'Alsace, le grand développement des Cupressacées et Juglandacées au sommet de ces zones et dans le sel sus-jacent, étaye une bonne corrélation stratigraphique. Par ailleurs, *Boehlensipollis hohli*, apparaît au milieu de E3 en Bresse et à la base du Salifère supérieur de la série d'Alsace. On peut donc mettre en équivalence les formations salifères E3, E2 et E1 de Bresse avec le Salifère supérieur et les Marnes sans sel d'Alsace.

Le déroulement des phénomènes envisagés de façon un peu plus synthétique, présente un certain parallélisme dans ces différents bassins. La première unité, attribuée au Stampien inférieur (Zone fossilifère d'Alsace, partie supérieure du E4 de Bresse, Infrasalifère de Valence) se singularise par le recul de la sédimentation salifère et la présence d'un certain nombre de fossiles souvent marins ou paraliques. La faune la plus riche est en Alsace (hydrobies, *Mytilus*, cyrènes, etc.) ; certains éléments se retrouvent à la partie supérieure du E4 de Bresse. La présence de séries à laminations fines et plan-parallèles, plus ou moins riches en matière organique (de type 2 dans le bassin de Mulhouse), soit dans ces séries elles-mêmes, soit dans les séries encadrantes, est un autre caractère remarquable. Les influences marines marquées par certains fossiles d'Alsace, confirmées par certains palynomorphes (Schüler, 1988-1990), doivent être rapprochées des fortes valeurs de brome mesurées dans les couches de sel gemme encadrantes en Bresse (sel de E4) et en Alsace (Sel III et la partie inférieure du Sel IV). Les influences marines apparaissent les plus nettes en Alsace. Ce fait est à rapprocher de l'existence de Paléogène marin, de NP18 à NP22, existant en différents points du territoire allemand voisin. Elle n'en est pas moins surprenante à proximité des couches potassiques présentes dans la partie inférieure du Sel IV sus-jacent, indice d'une série évaporitique particulièrement poussée.

Au-dessus, la contemporanéité des séries massivement salifères dans les trois bassins est frappante. Les auteurs ont noté certaines analogies. Ainsi, on a rapproché la transgressivité du sel E1, sur des zones antérieurement non occupées par du sel, et celle du sel T4 du Valentinois. On a noté aussi l'importance des dissolutions au toit du sel E1 de Bresse où elles engendrent la brèche et également l'importance de celle qui affecte la série T4 dans le Valentinois. En Bresse, R. Moretto et A. Curial ont imputé les faibles valeurs de brome observables dans cette série salifère supérieure, et tout spécialement dans E1, au recyclage de sel causé par le lent soulèvement synsédimentaire de la partie nord du bassin. Rappelons que dans le Valentinois, D. Dumas a été amené à évoquer, à plusieurs niveaux, des recyclages de sel paléogène marin antérieurement déposé. Dans cette fosse étroite et relativement mobile, il est probable que les mouvements d'enfoncement de la zone axiale s'accompagnaient de mouvements d'exhaussement légers, mais peut-être entretenus, des aires marginales, exposant périodiquement de la halite à la dissolution. Ces faits et ces observations peuvent-ils être généralisés ? Les faibles valeurs du brome obser-

vées dans cette série salifère supérieure ne sont peut-être pas le signe d'une alimentation continentale des ions salins remaniés du Trias ou du Permien, mais le résultat de la remise en solution répétée de sel paléogène sub-contemporain, antérieurement déposé.

Mais les différences entre ces bassins ne sont pas moins remarquables. La série salifère supérieure d'Alsace est plus riche en insolubles que son homologue de Bresse ; mais elle comporte deux couches de potasse qui n'existent dans aucun autre bassin du rift. Malgré certaines analogies des structures cristallographiques de la halite, les auteurs connaissant bien ces séries admettent qu'au vu d'une seule carotte, il est possible de dire si celle-ci vient de la série bressanne ou valentinoise. Rappelons que les cavités de stockage de gaz liquéfié, créées dans le sel de Tersanne, ont une tendance au refermement (de l'ordre de 30 % en 10 ans) qui n'a jamais été observée, au moins avec cette ampleur, dans les autres massifs salifères. Enfin, il existe dans les membres A et B du sel T4 des témoins marins représentés par de la nannoflore calcaire qui n'a son équivalent strict ni en Alsace, ni en Bresse. La matière organique de la brèche apparaissant au toit du sel en Bresse semble d'origine marine. Peut-être est-ce un écho discret de la même tendance ?

A. Curial *et al.* (1988) ont noté le parallélisme des grandes pulsations sédimentaires (par exemple des grandes masses salifères), offert par ces trois bassins et correspondant à des phénomènes paléogéographiques majeurs. Ils ont noté l'absence de corrélation de détail entre les successions de ces trois bassins : alors que de nombreuses séries salifères (*cf.* le Keuper européen *in* Marchal, 1986) présentent d'excellentes corrélations à très grande distance. Pour s'expliquer ce contraste, ils ont opposé la sédimentation salifère de ces segments de rift qui se serait faite sous très faible profondeur d'eau ou même sous ennoyage éphémère à des bassins maintenus en permanence sous une tranche de saumure notable. En fait cette explication n'est pas la seule possible. L'isolement et le cloisonnement de ces différents segments de rift, la morphologie beaucoup plus accusée de ce Paléogène comparé aux plates-formes du Trias peuvent suffire à rendre compte de la diversité beaucoup plus grande des séquences reconues dans chaque bassin.

En Alsace, au-dessus du Sel V (et des Marnes sans sel), les séries de couverture, encore imputables au Stampien ou à son équivalent rupélien, sont dilatées et marines. Elles présentent au moins des influences marines ponctuelles dans le Valentinois (couches à nannoflore des marnes bigarrées, etc.). En Bresse, elles sont très amincies et, paradoxalement, elles semblent entièrement continentales, alors que ce fossé occupe jusqu'à un certain point une position intermédiaire entre Alsace et Valentinois.

b) Les autres régions rhodaniennes et méditerranéennes

En dehors de ces bassins très subsidents à remplissage salin, le Stampien inférieur de la vallée du Rhône est souvent caractérisé par des dépôts carbonatés (calcaires et dolomies), pouvant succéder aux évaporites du Ludien supérieur : Calcaires de La Fayette du bassin d'Apt, Calcaires à *Brotia lauræ* de Mormoiron,

Calcaires à striatelles du bassin d'Aix, de Saint-Pierre-les-Martigues, etc. (Cavelier *et al.*, 1984 ; Triat et Truc, 1974 ; Nury, 1988). Pour le bassin d'Apt, la présence locale de passées de gypse ou parfois de célestine est encore la trace de tendances évaporitiques.

La sédimentation peut également être détritique. Dans des zones telles que le Jura, la Bourgogne, les chaînes sub-alpines, les dépôts sont très réduits et limités à quelques conglomérats et/ou brèches dus à des jeux d'accidents (talus bressan, faisceau byzontin, faisceaux de Provence, etc.). D'autres bassins plus ou moins subsidents ont également un remplissage détritique ou grossièrement détritique (Narbonne, Saint-Pierre-les-Martigues, Marseille, etc.). Dans les bassins de Provence, les apports détritiques sont en provenance du secteur sud. Le remplissage relativement épais du fossé d'Alès à cette époque stampienne est imputé à une nouvelle phase de distension.

c) Le Massif central

Une succession de bassins paléogènes, alignés N-S existe dans le Massif central, d'une part dans l'actuelle vallée de la Loire (Le Puy, Montbrison et Roanne) et de l'Allier (bassins de Brioude, d'Issoire, de Clermont-Ferrand et de Vichy). En général, ces bassins ne comportent pas d'autres évaporites qu'anhydrite ou gypse. Toutefois, un forage dans la région de Riom a traversé une série épaisse de halite. L'âge de ces couches serait du Stampien inférieur.

La présence d'évaporites dans ces bassins du Massif central renforce la nécessité de faire appel à des facteurs climatiques pour expliquer un phénomène aussi général. Mais, par ailleurs, la présence d'évaporites dans ces bassins rend plus difficile le problème de l'interprétation de l'origine des sels. Si le milieu marin oligocène ne se trouvait pas trop éloigné de bassins tels que ceux d'Alsace ou de Valence (*cf. infra*), il est beaucoup plus difficile d'admettre des arrivées marines dans ces bassins du Massif central. L'origine continentale n'est pas plus facile à admettre. La nature cristalline des bassins versants n'est pas en faveur de dépôts de sel massif pratiquement pur. Le recyclage éventuel du sel triasique ne paraît pas plus probable, même si la ceinture sulfatée de ce système atteint la bordure nord de la Grande-Limagne (Rouchy, en préparation).

d) Les Alpes occidentales

Les structurations méridiennes affectent aussi bien le domaine des Alpes occidentales que les aires en voie de rifting (vallée du Rhône, Alsace, etc.). Rapidement, les dépôts marins se cantonnent à un sillon péri-alpin allant de Castellane au Léman (Cavelier *et al.*, 1984). Au cours du Stampien, l'exondation du domaine alpin est de plus en plus poussée. Seules les zones les plus occidentales restent réceptrices de sédiments. Vers la fin du Stampien inférieur, la mer du sillon péri-alpin régresse fortement vers le nord où, devenue très peu profonde, elle baigne encore la partie externe des Alpes de Savoie. Au début du Stampien supérieur, les Alpes françaises sont exondées en totalité et la molasse se généralise à l'emplacement du sillon péri-alpin et dans les aires sédimentaires plus externes (Cavelier *et al.*, 1984).

Il est intéressant de souligner les rapports entre ces événements alpins et la sédimentation du fossé valenti-

nois. Les nanfossiles calcaires du sommet de la formation T4 et de la partie basale de la Formation marneuse intermédiaire évoquent des influences marines : les dépôts marins reconnus du sillon péri-alpin ne sont pas à plus de 100 km. Entre les deux, les recouvrements empêchent d'observer d'éventuels jalons intermédiaires. Par ailleurs, l'abondance des micro-fossiles alpins remaniés avec les éléments détritiques de la Formation marneuse intermédiaire du Valentinois, confirme l'exondation du domaine alpin qui expose à l'érosion les séries crétacées marines.

4) L'Oligocène supérieur (Chattien de la stratigraphie marine)

C'est probablement dans le **bassin d'Apt** qu'a été observée et datée, pour la première fois, la troisième grande passée évaporitique paléogène qui appartient au Chattien (Triat et Truc, 1974). On attribue le même âge à la Formation évaporitique supérieure du **Valentinois**. Cette série, très différente par ailleurs du Salifère inférieur et pouvant être épaisse de plus de 500 m, est caractérisée, en particulier, par une paragenèse assez typiquement continentale avec développement important de glaubérite et de dolomite. Les variations de faciès rapides, le cantonnement strict à un dépôt-centre très subsident, le passage brutal à des sédiments détritiques rouges importants sont caractéristiques d'un environnement continental. Le petit bassin où se cantonnent ces évaporites supérieures est né à la faveur du jeu de failles orientées Nord 110. Cette structuration, profondément différente des orientations antérieures, peut contribuer à rendre compte d'un environnement nouveau et original. On rapproche de cette troisième phase évaporitique d'âge Chattien, la barre sulfatée présente au cœur du bassin de **Bresse** et bien étudiée dans la région d'Étrez. Ces dépôts sont beaucoup plus minces et beaucoup plus monotones que ceux du Valentinois. Mais cette extrême diversité dans les épaisseurs et dans les faciès est classique en environnement purement continental et elle constitue un facteur supplémentaire en faveur de cette interprétation. En **Haute-Alsace**, les couches de l'Oligocène supérieur (Chattien) sont considérées comme lacustres : au-dessus de la série grise, il s'agit de 400 m de marnes jaunes, ocrées avec du détritique et très peu de gypse.

En dehors de ces bassins, l'Oligocène supérieur, surtout ancien, est très souvent détritique et bariolé. Et au cours de l'Oligocène supérieur de plus en plus de régions sont exondées. Les influences marines et en particulier dans les couches évaporitiques existant en Provence devraient être mises en relation avec la paléo-Méditerranée qui apparaît à cette époque.

5) Conclusion

Pour éclairer la sédimentation et les mécanismes sédimentaires dans les segments du rift, il est utile de reconstituer la paléogéographie de l'ensemble des régions dans lesquelles s'inscrivent les segments de cette structure (fig. 25). Or, celle-ci reste encore floue et des éléments contradictoires apparaissent. On a rappelé ci-dessus le fait que la série alsacienne s'avère la plus marine au niveau de la Zone fossilifère, juste avant de devenir la plus confinée avec ses couches potassiques. Rappelons les données en provenance des nanfossiles calcaires. Leur présence dans le Stampien de Froi-

defontaine (Territoire-de-Belfort) peut être mise en relation avec un cul-de-sac marin émanant du golfe de Mayenne et se prolongeant jusqu'au Jura Alsacien. L'âge de cet appendice marin ne dépasserait pas la limite Stampien inférieur-Stampien supérieur. Les couches à nanfossiles calcaires de la partie inférieure du Stampien du Valentinois peuvent s'expliquer par la proximité de la mer péri-alpine (fig. 24). Mais comment s'explique l'extraordinaire prolifération de ces mêmes nanfossiles calcaires sur plusieurs mètres de coupe en Limagne, par exemple au lieu-dit Sainte-Marguerite (Busson et Noël, 1972) ? Et, fait plus surprenant encore, comment s'explique l'absence complète des nanfossiles calcaires dans le fossé de Bresse au centre de gravité des trois régions citées.

E. Schéma de répartition des grands groupes de faciès dans les bassins salifères

La répartition des faciès dans l'ensemble des bassins salifères est basée sur l'interprétation des diagraphies. Dans une telle étude, on ne peut donc reconnaître et prendre en compte que les grands groupes de faciès (halite, anhydrite, carbonates, détritiques fins ou grossiers) sans commune mesure avec la précision d'une étude pétrographique. Par contre, la confrontation, dans chaque unité stratigraphique, de la répartition de ces grands groupes de faciès avec la répartition des épaisseurs sera souvent fructueuse.

1) Le bassin de Valence

Le bassin salifère oligocène de Valence est particulièrement intéressant par les contrastes des épaisseurs et des faciès qu'il présente sur une superficie petite (fig. 3 et 6). La série pré-salifère et la partie inférieure de la Formation salifère inférieure sont restreintes à une gouttière septentrionale étroite, bordée de failles normales. Cette gouttière s'allonge en particulier le long de la faille de Clérieux au sud. A Hauterives au nord, de part et d'autre de cette faille qui est restée vivante tout au long du dépôt de T6 et du T5, les différences d'épaisseur peuvent être de l'ordre de 500 m. Par ailleurs dans la fosse, les épaisseurs des séries infrasalifères (repérées en sondages et en sismique) et de la série salifère inférieure *pro-parte* sont à la fois importantes et affectées de variations considérables d'un point à un autre (fig. 15). Elles établissent donc le jeu de subsidence très rapide dans cette fosse. En dehors de ce dépôt-centre étroit, les faciès confinés peuvent disparaître rapidement : ainsi vers le sud dans la région de Valence, l'équivalent stratigraphique de ces séries Infrasalifère et salifère inférieure *pro-parte* est constitué par une épaisse série détritique (plus de 1 000 m), déposée en conditions de sub-émersion et qui n'est recouverte que par un sel T4. Ainsi, en dépit de la petitesse du bassin, pendant une longue durée de temps, les détritiques, malgré leur abondance dans le sud, n'ont pas atteint le dépôt-centre. En outre, certains indices attestent que celui-ci est resté déprimé : il en est ainsi de la sédimentation laminée fréquente dans l'Infrasalifère, qui témoigne de la pérennité d'un système d'eau stratifié ; il en est ainsi, dans le T6, du sel zébré qui implique une sédimentation rapide, nécessitant la présence pérenne d'un corps de saumure, ou encore de l'absence de signes certains de dessiccation dans ces séries épaisses.

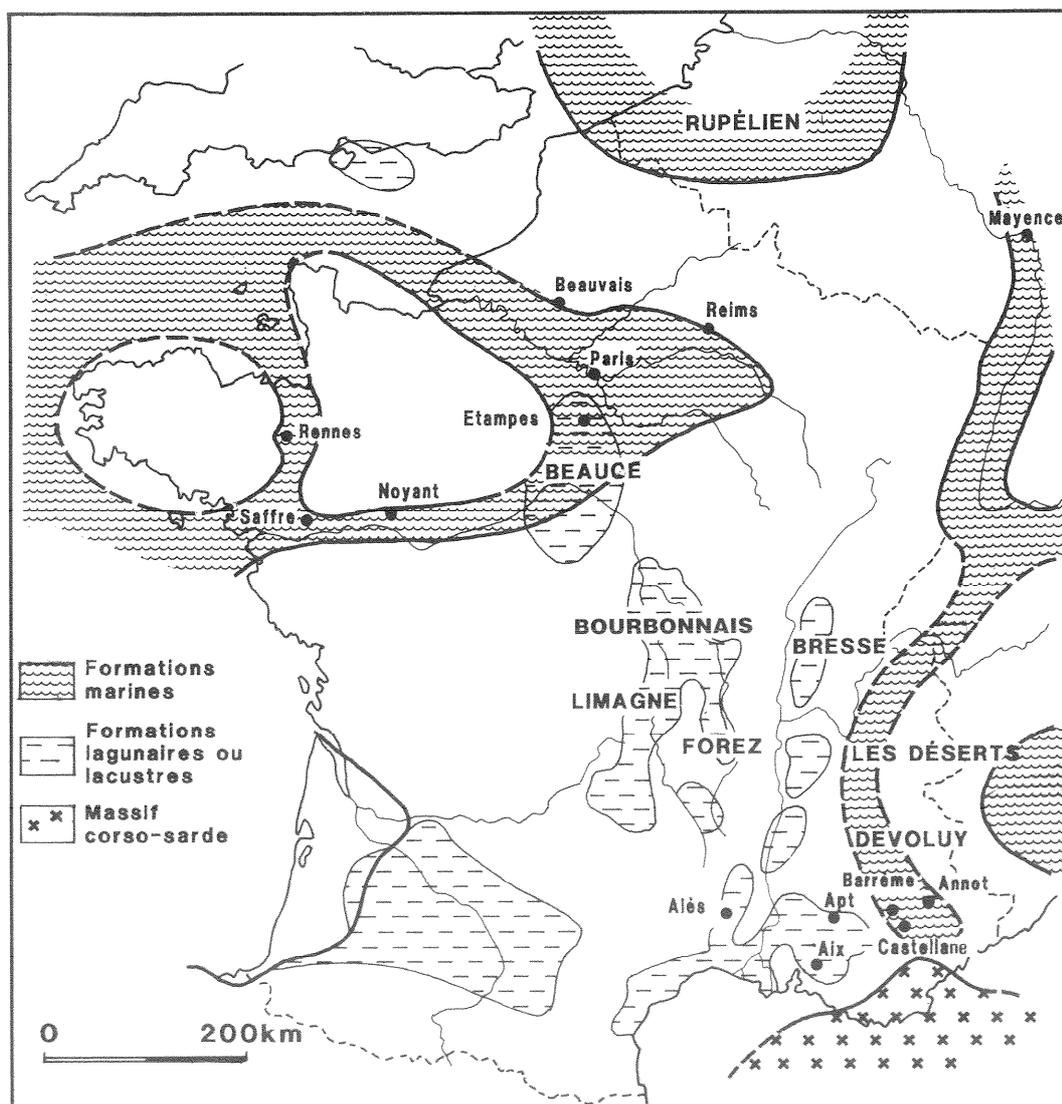


Fig. 25. - Paléogéographie schématique des dépôts marins et laguno-lacustres à l'Oligocène en France et dans les territoires limitrophes. D'après C. Pomerol (1973), fig. 3.62.

Fig. 25. - Schematic paleogeography of the Oligocene marine and lagoonal-lacustrine deposits in France and surrounding areas. After C. Pomerol (1973; Fig. 3.62).

A GVA1 au sein de la série détritique, des nodules de sel emballés dans des marnes rouges semblent constituer les résidus d'un dépôt salifère originellement plus étendu que ne l'est le **T6** actuellement observable. Le schéma évoqué ci-dessus avec du sel cantonné au dépôt-centre a donc peut-être été moins simple dans la réalité.

La formation **T5** (fig. 16) correspond à une diminution de l'aire halitique. Les faciès bordiers, non halitiques (carbonates, détritiques) viennent donc en position relativement plus centrale et se trouvent de ce fait mieux conservés. On peut ainsi mieux observer le schéma de répartition des faciès. L'organisation concentrique est marquée par la localisation de la halite dans le dépôt-centre. Mais, par ailleurs, les carbonates et les détritiques ne se répartissent pas en anneaux concentriques continus autour de la halite comme ils le font dans la Formation évaporitique supérieure (fig. 26) et dans tant de bassins. Ils manifestent, au contraire, une dissymétrie fondamentale. Les carbonates se cantonnent à une bande orientale, à l'est de la halite, de Hauterives à DP 108. Ainsi, dans ce dernier forage, la formation T5 est représentée par une alternance de calcaires massifs (à faune benthique) et laminés, de niveaux marneux à anhydrite fréquente et peu

de halite. La région à l'ouest de la halite dominante est, au contraire, un domaine soumis à d'importants apports terrigènes : à Tersanne par exemple des carbonates existent bien, mais dilués dans d'importants apports détritiques.

Le schéma observable a été aggravé par des dissolutions : ainsi à l'échelle du banc, on a constaté que des bancs de sel passent sur les bordures à de minces zones à anhydrite intercalées dans les couches argileuses, représentant des résidus de dissolution de couches évaporitiques. Mais la faiblesse des carbonates ou des détritiques dans le dépôt-centre souligne que le schéma concentrique est originel pour l'essentiel.

La formation **T4**, à l'inverse de la précédente, est caractérisée par la transgressivité du sel : c'est l'onlap des évaporites observé dans tant de bassins. Le sel jusqu'alors cantonné au dépôt-centre s'étend même dans les zones méridionales où les apports détritiques restent importants (par exemple à Clérieux et même à Valence). Cette extension du sel se marque aussi par une uniformisation des pourcentages de sel en cartographie. Les laminites calcaires, remarquables dans la partie supérieure de la formation T4, ont également une vaste extension. Cet étalement du T4 se marque

aussi par une certaine uniformisation des valeurs d'isopaques — par rapport aux cartes des formations précédentes —, les épaisseurs maximales se trouvant encore à proximité de la faille Claveyson-Tersanne. Ces faits doivent s'expliquer par une subsidence moins localisée qu'aux époques précédentes et affectant un secteur beaucoup plus vaste.

La **Formation marneuse intermédiaire** se caractérise d'abord par une transgressivité sur les bordures, par exemple dans le bassin du Royans où elle marque l'étalement du Stampien. Elle est caractérisée aussi par une uniformisation des valeurs d'épaisseur sur tout le bassin et enfin une généralisation des mêmes faciès (par exemple les calcaires oolithiques de la partie supérieure de la formation) qui contraste avec les différenciations très nettes, concentriques en particulier, des époques antérieures. La subsidence est donc devenue très globale et plus du tout limitée à un axe N20. En outre, l'absence d'évaporites et la présence à la partie inférieure de la formation de couches laminées (impliquant une stratification des eaux) militent en faveur d'une profondeur d'eau plus forte qu'auparavant, au moins au début de l'intervalle.

Cette subsidence relativement forte et généralisée est concomitante d'un mouvement d'exhaussement du domaine alpin voisin, attesté dans le bassin par des faciès tels que ceux des marnes gréseuses. Dans ce cas précis, le soulèvement des zones continentales voisines n'a donc pas été accompagné d'une structuration plus forte du bassin. Soulignons aussi qu'à ce niveau stratigraphique le grain a tendance à s'affiner vers le sud alors qu'auparavant les apports terrigènes étaient d'origine méridionale.

Avec la **Formation évaporitique supérieure** (fig. 17 et 26), la structuration synsédimentaire devient extrêmement intense produisant des contrastes d'épaisseur considérables : de l'ordre de 60 m dans le nord, 275 m à Cl-g1 et 524 m à Ch-g1. Cette subsidence très intense, alliée à une faille de direction nouvelle (N 110), n'affecte plus qu'un dépôt-centre très localisé, les épaisseurs s'amenuisant en effet rapidement vers le sud. La relation entre la nature de la sédimentation (salifère en particulier) et ces épaisseurs globales est extrêmement nette : dans certains cas, la limite entre les différentes zones de faciès dominants se moule sur les isopaques.

Tout à fait au nord et au nord-est, n'existent que des carbonates (calcaires et dolomies à silice). A DP 108, la formation consiste en l'alternance de dolomies, dolomicrites et anhydrite. A Tersanne, les couches de dolomicrites admettent une intercalation de sel épaisse d'une dizaine de mètres. En même temps, dans ce sondage du Nord-Ouest du bassin, les détritiques prennent une grande importance (argiles bariolées intercalées de passées métriques de sable grossier). A Cl-g1, en même temps que la halite et l'anhydrite se sont épaissies, la glauberite apparaît dans une matrice dolomicritique et associée à de la halite. A Ch-g1 où la série est la plus épaisse, la puissance du sel est maximale. La couche de base de halite correspond à l'épaississement de l'intercalation existant à Tersanne. Une couche de halite sommitale couronne la série. Plus au sud, à GVA1 par exemple, la série amincie ne comporte plus comme sels que carbonates et sulfate de calcium.

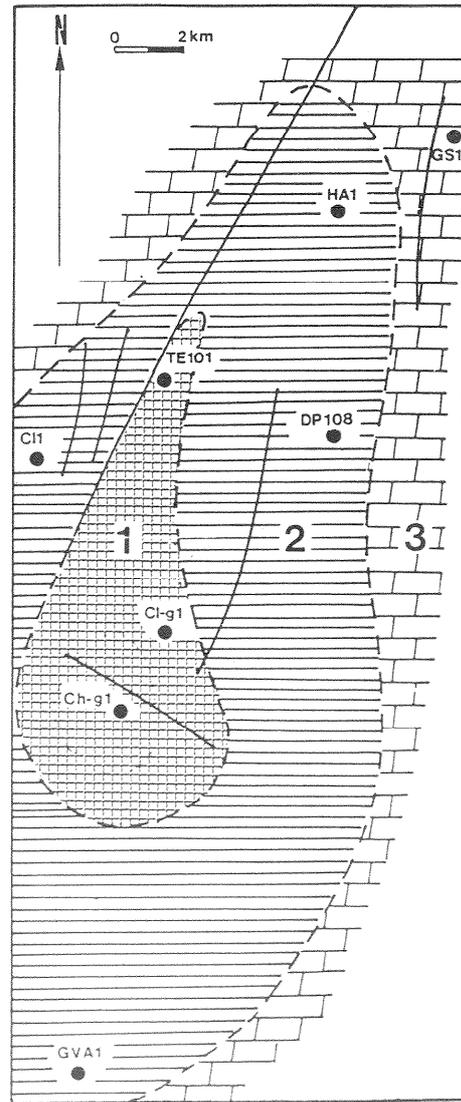


Fig. 26. - Carte de répartition des faciès du premier ensemble de la Formation évaporitique supérieure du bassin de Valence. On peut noter que la zone haliatique centrale (1) est contrôlée par la faille N 110° de Chanos Curson et dans une faible mesure par la faille N 20° E Claveyson-Tersanne. Cette zone haliatique est entourée par une auréole sulfatée et carbonatée (2) puis, à la périphérie, par une ceinture uniquement carbonatée (3). D'après D. Dumas (1988), fig. 75.

Fig. 26. - Facies distribution map of the first unit of the upper evaporite formation of the Valence Basin. Note that the central salt zone (1) is controlled by the N 110° E Chanos Curson fault and, to a small extent, by the N 20° E Claveyson-Tersanne fault. This salt zone is surrounded by a sulphate and carbonate aureole (2) then, at the edge, by a purely carbonate belt (3). After D. Dumas (1988; Fig. 75).

Au total, la halite n'occupe plus qu'une aire restreinte par rapport à l'extension du sel du Salifère inférieur. En outre, même dans le dépôt-centre (Ch-g1) le sel n'est pas le constituant quasiment unique. Il s'y ajoute des épaisseurs importantes de carbonates, sulfates et argiles. Si l'emboîtement concentrique des grands groupes de faciès est remarquable, par contre les carbonates ou les sulfates ne disparaissent pas dans le dépôt-centre. Au contraire, ils semblent conserver une épaisseur à peu près identique à celle qu'ils ont sur les bordures. Ce sont les lentilles de halite et secondai-

rement de glauberite qui s'ajoutent à la série occupant l'épaisseur excédentaire de ces zones par rapport aux marges.

La série détritique sus-jacente à cette dernière formation évaporitique de l'Oligocène reste fine et peu épaisse en position centrale (Ch-g1) et méridionale (GVA1) : les apports se localisent maintenant dans le nord et non plus dans le sud.

Ainsi le ralentissement de la subsidence et l'invasissement par les sédiments détritiques ont restreint, puis fait disparaître le dépôt-centre évaporitique.

Rappelons aussi que, pendant une partie des temps paléogènes au moins, des mouvements tectoniques ont individualisé à l'est du bassin valentinois la zone haute de Montmiral (orientée N20 et isolant l'avant-bassin du Royans). Cette cuvette, séparant la fosse évaporitique des Alpes, a pu arrêter une partie du matériel détritique en provenance de ce domaine alpin. Ce faisant, cet avant-bassin a contribué à maintenir le bassin valentinois comme une fosse en état de vacuité, favorisant la rétention des saumures et la conservation des sels déposés. En outre, il n'est pas impossible que la présence d'un tel avant-bassin ait pu concourir à créer et entretenir des conditions de confinement aboutissant à sursaler les eaux en provenance du sillon marin péri-alpin.

Conclusion

Des mouvements structuraux, très contrastés ont affecté les différentes parties du bassin de Valence et les aires continentales voisines. De ce fait, se trouvent simultanément sur une superficie relativement restreinte : 1) des dépôts-centres très localisés, 2) des aires stables, etc. En outre, ces déformations tectoniques sont responsables, conjointement avec le climat, de la nature, de l'importance et de la direction des apports terrigènes. Les mouvements verticaux en chaque point et l'importance ou la faiblesse de ces apports détritiques ont ainsi créé une morphologie également différenciée. En particulier, les zones déprimées d'une gouttière centrale se sont révélées efficaces pour la rétention de saumures et pour la conservation des sels. A d'autres époques toutefois, le dépôt salifère a été beaucoup plus extensif et plus généralisé. Quoiqu'il en soit, au fil du temps, l'importance croissante des apports détritiques et la diminution de superficie de l'aire subsidente réduisent, puis suppriment la cuvette évaporitique du bassin de Valence.

2) La Bresse

On retrouve, en Bresse, une relation entre les faciès successivement les plus solubles et les régions les plus subsidentes, c'est-à-dire les (ou le) dépôts-centres. Schématiquement, l'extension résiduelle des aires occupées par les principaux faciès est la suivante. L'ensemble du bassin est estimé à environ 8 000 km² : le sulfate de calcium s'étend sur environ 2 200 km² et l'aire salifère ne dépasserait pas 800 km² (Rouchy, en préparation). Grossièrement encore, rappelons qu'en Bresse centrale ou Louhannaise (fig. 1), relativement moins subsidente, la série comprend du sulfate et plus au nord des carbonates : alors qu'en Bresse Burgienne où la série dépasse 1 400 m d'épaisseur, le dépôt-centre (région d'Étrez) est rempli d'une série où le sel peut dé-

passer 90 %. La même relation s'observe dans le temps. Ainsi A. Curial (1986-1987) a fait observer que dans l'Infrasalifère des bancs de sel apparaissent en position centrale, synchrones de séries marginales où n'existe encore que de l'anhydrite. La localisation du sel E1 est différente de celle des formations salifères E2 et E3 en fonction d'un déplacement de la subsidence et, en général, des mouvements verticaux affectant le bassin. Cet exemple conduit à rappeler que cette coïncidence entre sel et dépôt-centre subsident n'est pas toujours originelle ; elle peut être aussi en partie le résultat de dissolutions. Dans le cas des séries E3 à E1 de Bresse, l'ampleur de ces dissolutions (et des mouvements verticaux qu'elle implique) est attestée par la comparaison des coupes de différents forages, par les valeurs du brome, par les brèches, etc.

Ce problème intéressant peut être étudié de façon précise dans une partie de la série E4 où la carte en isopaques coïncide parfaitement avec la carte des isopourcentages du sel (fig. 27).

Une carte (fig. 41 A, *ibidem*) confirme que pour la partie supérieure de E4, faite d'une alternance de sel primaire et de calcaires laminés, parfois argileux avec localement un peu d'anhydrite, les isolithes du CINa se calquent sur les isopaques de cette unité (fig. 46 A, *ibidem*) dont on remarque la grande régularité. Mais, ici encore si le sel occupe le dépôt-centre, les autres constituants n'obéissent pas à un schéma purement concentrique. L'anhydrite et surtout les carbonates augmentent remarquablement du centre du bassin vers l'est aux dépens du sel (fig. 41 B et coupe 42, perpendiculaire à l'axe du bassin, *ibidem*). Dans la partie la plus centrale et la plus subsidente, l'anhydrite et les carbonates s'amenuisent et même se biseautent comme le fait est classique dans tant de bassins salifères à dépôt-centre épaissi. La même évolution ne se note pas vers l'ouest et le sud du bassin, directions qui sont souvent,

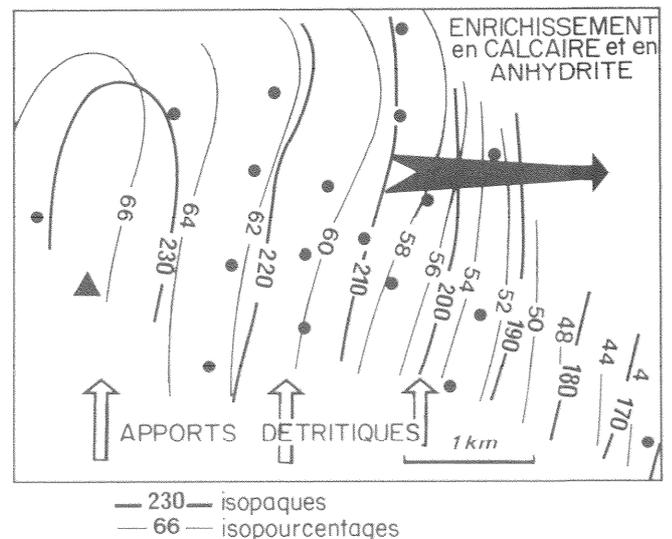


Fig. 27. - Carte en isopaques de l'ensemble salifère E4 (champ d'Étrez, bassin de Bresse) et isopourcentages de halite dans E4. D'après A. Curial (1986-1987), fig. 39 et fig. 46 D.

Fig. 27. - Isopach map of salt unit E4 (Étrez field, Bresse Basin) showing halite isopercentage curves for E4. After A. Curial (1986-1987; Fig. 39 and 46D).

au contraire, celles des apports détritiques et *a priori* au plus loin de la mer. Le matériel argileux détritique vient toujours du sud à l'exclusion de tout apport septentrional, occidental ou oriental (fig. 11). Mais, par exemple dans les limites du champ d'Étrez, une évolution régionale de l'argilosité est si faible qu'elle ne s'observe que par la considération de l'évolution de la surface limitée par la courbe gamma ray.

On a évoqué ci-dessus, avec les bancs 20 à 22, l'existence de dissolutions importantes vers le sud. Mais ces phénomènes post-dépositionnels n'ont fait qu'aggraver un schéma originel. La coupe N-S (fig. 20) montre que les intercalations détritiques venues du sud s'amenuisent plus ou moins considérablement vers le nord. Les premiers bancs d'argilite (25 à 23) ne sont même jamais connus en Bresse septentrionale, exemple sondages DP104 et Ma Ct D1 ; tandis que pour les bancs 20 à 22, on peut avoir en Bresse septentrionale des bancs carbonatés et anhydritiques, témoins de la dessalure et de dissolution. Cette faiblesse des apports détritiques maintient vers le nord une dépression résiduelle dans cette zone et, dans de telles fosses, la sédimentation saline peut démarrer très précocement : on constate ainsi des lentilles salifères au sein de l'argile silteuse homogène de la couche 22 dans la fosse septentrionale, phénomène contemporain de la plus grosse arrivée détritique. Par ailleurs, c'est la sédimentation saline qui comblera ces bassins affamés. Après ce nivellement de la topographie, la sédimentation saline s'étendra sur la partie sud du bassin. Puis, peut-être après un léger exhaussement de cette partie sud se produiront la dissolution du sel du sud par de nouvelles arrivées d'eau dessalée et l'épandage d'un nouvel intercalaire détritique. Sous celui-ci se trouveront : 1) des éléments résiduels dans la partie la plus méridionale ; 2) des résidus de dissolution et du sel plus ou moins tronqué dans la partie moyenne et 3) du sel de plus en plus intact au fur et à mesure que l'on va vers le nord.

Pour chaque banc, il y a équivalence apparente entre la couche finement détritique du sud et la couche principalement salifère du nord. Mais il n'y a pourtant pas contemporanéité absolue entre ces deux constituants. Après une pulsation détritique importante au sud et insignifiante tout à fait au nord, la sédimentation saline démarre très tôt au nord et reconquiert petit à petit la plus grande partie de l'aire sédimentaire. *Ainsi le schéma de dépôt originel et les dissolutions se sont conjugués indéfiniment pour réaliser cette coïncidence entre sel et dépôt-centre subsident.*

Dans ce texte, l'accent a été mis sur les évaporites. *Il ne faudrait pas pourtant que cette présentation fasse perdre de vue l'importance en superficie et en volume des détritiques dans ce bassin de Bresse.* Ceux-ci occupent les surfaces les plus fortes et, stratigraphiquement, loin de ne représenter que les équivalents de la série intermédiaire E4, ils représentent des termes équivalents de l'ensemble des séries salines ludiennes et stampiennes.

3) Le bassin de Haute-Alsace

Le déterminisme de la nature des sels par l'importance de la subsidence est d'autant plus remarquable ici que s'ajoute la présence de potasse. Grossièrement, rappelons que dans le dépôt-centre, la série dont

l'épaisseur atteint 1 700 m est largement faite de chlorures : alors que, par exemple, sur le horst de Mulhouse où l'épaisseur n'est plus que de 400 m, la série est faite de carbonates (comme les Calcaires à Mélanies) et de gypse (comme les Gypses de Zimmersheim), mais ne comprend plus de chlorures. Si, dans certains cas, la dissolution de ceux-ci sur la plate-forme a pu exister, le phénomène a dû être limité puisqu'il n'est pas attesté par des brèches très épaisses. En outre, la disparition des calcaires et des gypses massifs dans le dépôt-centre est, quant à elle, évidemment originelle. Ce classement des sels se traduit dans les superficies résiduelles : le bassin d'Alsace mesurerait 7 000 km², les évaporites étant présentes sur 2 000 km² et la potasse sur 500 km².

Dès la **Formation Infrasalifère**, superposée au faciès sidérolithique qui est généralisé, la première ébauche du futur bassin salifère et potassique se marque comme une **zone déprimée**. En effet, cet Infrasalifère se caractérise par des marnes grises (contrastant avec les faciès bariolés du Sidérolithique) et des calcaires bitumineux, les unes et les autres ayant nécessité des conditions peu ou pas oxygénées ou même le maintien d'un système d'eau stratifié. En outre, il est frappant que les passées anhydritiques de cet Infrasalifère se cantonnent à la verticale des zones où le sel susjacent sera particulièrement épais, c'est-à-dire des zones qui s'affirmeront comme particulièrement subsidentes.

Dans le **Salifère inférieur** (Sel I et Sel II), une certaine dualité du mécanisme sédimentaire apparaît. La considération des formations salifères elles-mêmes fait apparaître un enrichissement relatif en halite dans les zones les plus épaisses, suivant le schéma habituel des évaporites de centre de cuvette. Ainsi, pour le Sel I — débutant par le très remarquable et très épais « grand banc de sel gemme » — la comparaison des isopourcentages (fig. 68 *in* Blanc-Valleron, 1990-1991) et des isopourcentages (fig. 69 *ibidem*) établit que la halite dépasse 50 % du total quand l'épaisseur de la formation est supérieure à 400 m. Les cartes du Sel II (fig. 8) établissent un déterminisme similaire.

L'éloignement plus ou moins grand des sources du matériel détritique fin est l'autre mécanisme important. C'est ainsi que du sud-ouest vers le nord-est, les Marnes Vertes à Limnées, encadrant le Sel I, présentent un amenuisement de la fraction argileuse. Dans le vide imputable à cet amenuisement apparaissent, au sein des Marnes Vertes à Limnées I, tout d'abord des marnes à anhydrite, des couches d'anhydrite, puis tout à fait au nord-est du bassin des bancs de sel. Au niveau des Marnes Vertes II (fig. 7), le sel apparaît déjà au nord-est de la concession des MDPA et devient si important près de Colmar que la formation de ces Marnes Vertes à Limnées II n'est plus identifiable : l'ensemble de la série est devenu une alternance de bancs de sel et de marnes. Ces phénomènes ont une telle ampleur que les isopourcentages de halite du Salifère inférieur dans son ensemble traduisent une augmentation du pourcentage de sel du sud-ouest vers le nord-est. Du point de vue de l'environnement, ce passage de faciès pose un problème fondamental. En effet, ces marnes vertes sont considérées comme lacustres. A de nombreux niveaux, la faune ou la flore (*Melania*, *Fragmites*, graines de *Chara*, ostracodes, etc.) établissent même l'existence d'un milieu d'eau douce. Comment, dans ces condi-

tions, a-t-il suffi d'une certaine vacuité temporaire et locale pour que se déposent anhydrite et halite ?

Une disposition de faciès originale, et donc particulièrement intéressante, apparaît au niveau du Salifère moyen et du Salifère supérieur. Elle tient à l'individualisation d'une plate-forme dans la partie centrale de ce bassin de Haute-Alsace. Les faits apparaissent bien en cartographie (Blanc-Valleron, 1990-1991). Ainsi, si l'on considère le Salifère moyen dans son ensemble, l'ellipse qui marque les isopourcentages maxima de halite (fig. 88 et 89, *ibidem*), orientée NE-SW, est décalée de 4 km vers le sud-est par rapport à la cuvette dessinée par les valeurs maximales des isopaques. Donc, ce ne sont plus les épaisseurs maximales qui ont appelé les plus grands enrichissements relatifs en sel, suivant le schéma habituel ; les isopourcentages les plus riches se localisent sur une plate-forme intérieure au bassin. Pour le seul Sel III, les cartes d'isopourcentages (fig. 92 *ibid.* et fig. 9) marquent ce même décalage dans l'espace par rapport aux isopaques maximales des figures 90 *ibid.* et 9. Pour le Salifère supérieur, les cartes en isopaques (fig. 104 et 105 *ibid.*) ne montrent encore que deux sous-bassins, séparés par un domaine de plate-forme, la différence entre les deux domaines étant d'une centaine de mètres. Au niveau du Sel IV, le décalage des isopaques (fig. 112 *ibid.* et fig. 10) et des isopourcentages (fig. 114 *ibid.* et fig. 10) est net : les isopourcentages maximaux coïncident avec la zone de plate-forme, en particulier au nord-est. Avec le Sel V, les isopaques (fig. 130 et 131, *ibid.*) font encore apparaître deux sous-bassins à sédimentation épaisse (Stafelfelden et Niederentzen à l'ouest ; Buggingen à l'est), séparés par une plate-forme qui tend à ne plus subsister que sous la forme d'un seuil étroit, localisé 6 km à l'ouest du Rhin. Par rapport aux pourcentages de sel, on note les mêmes tendances que dans les intervalles précédents.

Les observations fines réalisées en mines et sur carottes par M.-M. Blanc-Valleron (1990-1991) éclairent les phénomènes ainsi mis en évidence par la cartographie. L'augmentation des isopourcentages de halite sur la plate-forme intra-bassin tient à l'amincissement des intercalaires insolubles. Toutefois, ces couches sont complètes ; elles sont seulement condensées. En même temps que ces couches sont moins épaisses que dans les sous-bassins bordiers, le matériel détritique y est plus fin et de couleur plus claire. Dans certains cas, on a même pu noter une diminution d'épaisseur des varves où alternent argiles, dolomite ou anhydrite. La publication de descriptions complètes sera nécessaire pour mieux interpréter ces phénomènes importants. Dans quelle mesure le développement des carbonates et de l'anhydrite a-t-il été entravé dans des sous-bassins, *a priori* légèrement plus profonds et peut-être plus réducteurs ? Les argiles de la plate-forme pourraient correspondre à la fraction qui a cheminé sur la pycnocline plutôt que sur le fond. Quoi qu'il en soit, répétons que ce schéma est original par rapport à la grande généralité de la coïncidence entre épaisseur maximale et enrichissement maximal en halite dans tant de bassins salifères au monde.

La surface résiduelle de la couche supérieure de potasse dans le bassin de Mulhouse est légèrement décalée par rapport au dépôt-centre défini par les isopourcentages de halite du sel encaissant (Sel IV). Cette

légère perturbation au schéma concentrique, beaucoup moins marquée ici qu'elle ne l'est en Catalogne ou en Navarre, peut-être nommée dissymétrie alsacienne (*cf.* ci-dessous, conclusion).

En conclusion, la présence d'évaporites jusque dans l'Aquitainien, dans le même système de fossés mais au nord de l'Alsace, coïncidant avec une série subsidente souligne combien ces faciès sont inféodés aux fortes dépressions. Comme l'observe J.-M. Rouchy (en préparation) dans ces fosses du Rhin, la sédimentation évaporitique s'est déplacée du sud au nord, de l'Éocène au Miocène, en suivant la migration de la subsidence maximale.

4) Conclusion

Le classique schéma concentrique des évaporites de centre de bassin n'est que partiellement réalisé dans ces fosses salifères françaises du rift européen. Il y a, en général, bonne coïncidence entre les dépôts-centres et les pourcentages les plus élevés en halite. Les couches potassiques d'Alsace coïncident aussi grossièrement avec les dépôts-centres. Dans les bassins moins subsidents de la plate-forme rhodanienne, le schéma concentrique se traduit par le fait que c'est le gypse qui semble occuper la position centrale, tandis que les carbonates restent surtout développés sur les aires marginales. Mais cette localisation du sel n'est que partiellement originelle. On a pu établir en plusieurs cas qu'elle avait été constamment aggravée par des dissolutions du sel initialement déposé également sur des marges. L'ampleur de ces phénomènes peut même expliquer les fréquentes faibles teneurs en brome.

Un schéma concentrique plus parfait avec auréoles continues, carbonatées, sulfatées et chlorurées est connu dans de grands bassins plus inféodés à des apports marins et souvent superposés à des plates-formes calcaires (exemple Silurien du Michigan). Dans les bassins examinés, au contraire, il y a une dissymétrie profonde des influences qui perturbent ce schéma classique : en Bresse et dans le Valentinois par exemple, les détritiques sont venus en abondance du sud et de l'ouest ; les influences chimiques (carbonates, sulfates) n'ont pu se développer que dans l'est et dans le nord. Dans ces directions, surtout dans l'est, d'éventuelles plates-formes de saturation plus vastes que les dépôts résiduels actuels ont peut-être souffert d'érosion ultérieure. Le fait s'explique par la petitesse relative de ces bassins, par leur position en grande partie continentale et par les mouvements qui ont dû affecter les hinterlands périphériques.

Le plus souvent, les détritiques grossiers sont restés cantonnés aux bordures, voire même à la proximité des failles bordières (Haute-Alsace). Mais les détritiques fins ont suffi pour imposer un schéma dissymétrique. Parfois pourtant, les détritiques occupent le dépôt-centre vrai, repoussant la fosse salifère en position distale par rapport aux apports détritiques : par exemple tout à fait au nord-est du bassin de Bresse. D'autres fois, par exemple dans le cas de la dernière fosse salifère du Valentinois, les détritiques se généralisent, ne laissant subsister de faciès salifères que dans la dernière aire encore affectée de subsidence importante.

Il existe enfin des dispositions des faciès qui s'écartent de l'habituel schéma concentrique. Ainsi, dans le

Salifère moyen et supérieur alsacien, l'existence au centre du bassin d'une plate-forme appelle les plus forts pourcentages de sel sur des aires qui ne sont pas les plus épaisses au total. D'autre part, en Bresse comme dans le Valentinois, on peut observer l'étalement transgressif du sel qui, au lieu de marquer l'aire la plus déprimée du bassin, déborde son extension antérieure et recouvre les faciès détritiques marginaux.

Les décalages de la localisation de la potasse par rapport au dépôt-centre — clairement manifestés en général à la fois par les épaisseurs maximales et par les isopourcentages maximaux de sels — ne font pas disparaître le schéma concentrique habituel dans les évaporites de centre de bassin. Ils ne font que le perturber. Dans la mesure où les sels ultimes se localisent en position distale par rapport à la mer ouverte et à ses apports, ils rappellent le croissant de sel présent dans le lac Asal (Degoutin, 1922 ; Demange et Stieltjes, 1975) et lui aussi cantonné à l'extrémité distale du lac (nord-ouest) par rapport à la direction d'où proviennent les eaux marines (Goubbat el Kharab au sud-est). Cette légère dissymétrie du schéma concentrique, qui est loin de la disposition systématiquement antéro-postérieure des bandes de sel du schéma de plate-forme, pourrait donc être appelée « dissymétrie asalienne ».

Nous ne reprendrons pas dans ce texte l'interprétation génétique du schéma concentrique de centre de cuvette, caractéristique de tant de dépôts évaporitiques. Dans plusieurs publications antérieures (en particulier dans Busson, 1988), nous avons récapitulé les arguments en faveur de dépôts diachrones des auréoles concentriquement emboîtées de carbonates, de sulfates de calcium, de sel. Rappelons aussi que R. Moretto (1986-1987) a proposé un schéma différent et qui implique le dépôt synchrone de ces différents groupes de faciès concentriquement organisés.

IV. Interprétation et discussion

A. L'origine continentale ou marine des sels et les caractères des saumures

Les bassins de Provence méridionale sont caractérisés par une paragenèse évaporitique moins poussée que les bassins salifères (ne comprenant de halite, ni en couches, ni en pseudomorphoses), par la présence de faune marine ou d'affinité marine associée aux gypses et par une proximité relative au moins à l'Oligocène de la paléo-Méditerranée (Nury, 1988). On pourrait être tenté d'en faire la voie de pénétration de saumures marines ayant alimenté les bassins salifères situés plus au nord. Mais cette hypothèse n'est retenue par aucun des auteurs ayant étudié ces bassins en particulier celui de Valence. Pour cette raison, il importe de disjoindre cette Provence méridionale des autres bassins que nous allons examiner d'abord.

1) Les arguments paléogéographiques

La synthèse stratigraphique et paléogéographique exposée ci-dessus, nous évitera d'entrer dans le détail. Deux origines principales sont habituellement invoquées.

a) Le recyclage d'évaporites triasiques (ou permiennes ?)

Deux arguments apparaissent en faveur de cette hypothèse. D'une part, la plupart des bassins évaporitiques paléogènes considérés sont superposés aux bassins évaporitiques triasiques ou relativement proches des limites de ceux-ci. C'est le cas de l'Alsace, de la Bresse, du Valentinois, J.-M. Rouchy (en préparation) rappelle que les bassins de Valence, de Marseille, d'Alès, de Narbonne sont dans la ceinture du sulfate de calcium triasique et que les bassins de Nîmes, de la Crau, d'Aix-en-Provence et Manosque dans les limites du sel triasique. Le même auteur a cité le fait que le sulfate de calcium triasique atteint la bordure de la Grande Limagne et il a observé que les plus grandes épaisseurs de sel triasique du grand bassin du Sud-Est se localisent à proximité de failles qui rejoueront dans le Paléogène pour limiter certains des bassins importants de cette époque.

Le deuxième argument est fourni par les épisodes de structuration intense qui ponctuent l'Éocène et l'Oligocène et rendent vraisemblable la mise à l'affleurement (ou au moins à proximité de la surface) en de nombreux points des évaporites triasiques.

b) L'alimentation par les mers paléogènes

Nous avons vu, dans la synthèse déjà citée ci-dessus, que l'éloignement des témoins marins ne s'oppose pas à « l'hypothèse marine » au moins pour le bassin de Haute-Alsace et celui de Valence. Au demeurant, ces séries salifères admettent des couches indiscutablement marines, bien représentées en Haute-Alsace avec la zone fossilifère et des passées à nannofossiles calcaires vers la base du Sel IV (Blanc-Valleron, 1990-1991), plus discrètement à Valence avec quelques passées à nannofossiles calcaires et l'on peut penser que si la mer a pénétré ces bassins à ces époques, l'hypothèse qu'aux époques précédentes et suivantes des arrivées marines aient franchi une zone de raccord n'a rien d'irréaliste. En ce qui concerne la Bresse, ces témoins n'existent pas ; mais, au Stampien par exemple, la position de ce dernier bassin entre les couches à nannofossiles calcaires du Territoire de Belfort (Froidfontaine), de la Limagne et du bassin de Valence ne rend pas invraisemblable l'existence dans la région d'influences marines.

Soulignons enfin, au sujet du bassin de Valence, que les passées à nannofossiles calcaires se situent dans le Stampien, alors que la mer occupait encore le sillon péri-alpin (fig. 24 et 25). De telles passées n'existent plus à l'Oligocène supérieur, caractérisé par une paragenèse continentale alors que la mer s'est retirée de la partie voisine du domaine alpin.

En fait, l'observation paléogéographique la plus difficilement compatible avec l'hypothèse marine est sans doute la généralisation des bassins évaporitiques à ces époques (fig. 1). S'il est relativement facile d'admettre des arrivées de saumures d'origine marine en Alsace, en Bresse, à Valence, comment les imaginer vers les différents bassins du Massif central ? Mais, ici encore, une généralisation presque équivalente des couches à nannofossiles calcaires, sans témoins marins entre ces différents jalons, incite à la prudence avant de rejeter l'hypothèse marine.

Dans ce débat, il faut rappeler les observations importantes faites en Bresse et dans le Valentinois, au sujet des dissymétries qui affectent le schéma concentrique. Nous avons vu en effet, dans ces bassins, à plusieurs niveaux stratigraphiques, que si le sel gemme occupe préférentiellement le dépôt-centre, par contre le carbonate et le sulfate de calcium sont surtout représentés vers l'est et les détritiques principalement vers le sud et l'ouest. Une telle dissymétrie apparaît moins explicable dans un contexte purement continental où les évaporites proviendraient du lessivage des bassins versants que dans une hypothèse marine. Dans cette dernière, en effet, il est tout à fait normal que les éléments les moins solubles de la paragenèse se soient localisés vers l'est, dans la direction de la mer ouverte.

2) Les données pétrographiques et géochimiques

Les séries ludiennes et stampiennes de Bresse, de Valence ou le grand banc de sel gemme du S I de Haute-Alsace sont remarquables par leur pureté. Certes, ce caractère ne prouve pas qu'il s'agit d'évaporites d'origine marine. Mais il est vrai que, dans la plupart des cas, les sédiments salins qui se forment actuellement en contexte purement continental (chotts, playas, etc.) sont largement mêlés de terrigènes amenés par l'eau ou par le vent. En outre, dans un certain nombre de cas (par exemple, le sel T6 de Valence), ce sel massif est zébré, c'est-à-dire ponctué rythmiquement d'une lamine comportant parfois un peu d'argile et toujours carbonates et anhydrite. L'interprétation la plus aisée de telles couches se trouve dans l'arrivée pulsatoire d'eaux en provenance de la mer. Ici encore, les séries présentées par les chotts, les playas, etc., même quand elles comportent carbonates, gypse et sel, ne semblent pas, en général, présenter une rythmicité aussi répétitive et d'une telle extension latérale.

Les données des teneurs en brome de la halite sont également à considérer. En Bresse, R. Moretto (1986-1987) a décrit des valeurs élevées (supérieures à 75 ppm) et croissantes dans le E5 et surtout le E4. Il a interprété ces valeurs comme un argument en faveur d'une origine marine des saumures. Au contraire, dans la série supérieure (E3 à E1), on a des valeurs plus basses, décroissantes, à l'exception d'une légère remontée à la base de E1. Dans cette partie, les valeurs sont toujours au-dessous de 70 ppm et peuvent même descendre jusqu'à 8 ppm au sommet du E1. L'auteur invoque, pour ces valeurs faibles, l'effet de recyclage de sel antérieurement déposé, en particulier sur des aires marginales. Au demeurant, de tels recyclages sont parfaitement prouvés dans certains cas, en particulier dans la série E1 (*cf.* § dissolutions).

D. Dumas, dans le Valentinois, a mesuré des valeurs très faibles à l'exception du sel A de T4, qui se trouve précisément encadré par les couches à nannofossiles calcaires. Cet auteur a invoqué au sujet des valeurs très faibles de brome trouvées dans le sel T5, où des dissolutions marginales sont prouvées, le jeu de recyclage de sel paléogène. Mais il faut reconnaître que l'hypothèse de saumures d'origine continentale est également parfaitement défendable pour cette série inférieure du Valentinois.

De rares données tirées des isotopes du soufre existent dans le bassin de Haute-Alsace (Blanc-Valleron, 1990-1991). Une valeur mesurée sur des sulfates à proximité de la potasse correspondrait à ce qui est admis pour les mers triasiques ou permienues. Au contraire, une mesure opérée dans la Zone fossilifère fournirait une valeur proche de la mer tertiaire, c'est-à-dire de l'Actuel.

3) Les données paléobiologiques

On a déjà remarqué que la série de Bresse n'avait jamais livré les moindres restes d'origine marine. Aucun des examens palynologiques n'a même relevé la présence de dinokystes pouvant témoigner d'influences marines.

Dans le bassin de Valence, plusieurs restes de poissons ont été trouvés, en général rapportés à l'espèce *Smerdis macrurus* (Gaudant et Guillevin, 1979 ; Dumas, 1988). Ils ont été trouvés dans les forages recoupant la fosse centrale, en particulier un niveau dans le membre B de la formation T4 (fig. 19) et dans des couches laminées à la partie inférieure de la Formation marneuse intermédiaire. Ils ont été observés également dans les couches laminées du bassin du Royans en position périphérique. J. Gaudant (1982) a considéré ces restes comme typiques d'un environnement dulçaquicole euryhalin. Mais ce type d'interprétation a été critiqué avec pertinence par D. Nury (1988).

Les nannofossiles calcaires sont présents dans des couches laminées ou un peu plus épaisses (quelques millimètres) ; chaque couche ou lamine pouvant ne contenir qu'une seule espèce. A la base de la Formation marneuse intermédiaire, des marnes et calcaires laminés ont livré plusieurs espèces de nannofossiles calcaires, souvent identiques aux espèces présentes dans le membre B et comprenant en particulier des *Braarudosphaera* et des *Reticulofenestra*. Les taxons représentés, la monospécificité fréquente sont des caractères connus dans la nature actuelle, dans les couches photiques de corps d'eau marins, plus ou moins profondément dessalés. Le fait que ces couches à nannofossiles calcaires soient séparées les unes des autres par des lits évaporitiques prouve la répétition des épisodes de confinement et des pulsations marines. Du point de vue chronologique, on a déjà évoqué l'ajustement satisfaisant entre ces couches à flore à tendance marine du Valentinois et l'ultime persistance du sillon marin périalpin à une latitude comparable. Mais, par ailleurs, la plus grande partie de la Formation marneuse intermédiaire n'a livré que des faunes ou flores remaniées ou autochtones, mais dessalées.

En Alsace, aux nombreux fossiles marins connus dans le bassin de Mulhouse au niveau de la Zone fossilifère, des investigations plus récentes ont ajouté la découverte de nombreux restes de dinokystes à plusieurs niveaux dans les bassins de Sélestat, Strasbourg, etc. Ces observations témoignent d'influences marines répétées. Des trois grands bassins salifères de la partie française du rift, celui de Haute-Alsace apparaît le plus touché par des influences marines. Il est pourtant le seul à présenter deux couches de potasse, dont la genèse correspond au confinement maximum. Certes, il est possible d'interpréter ces minerais potassiques comme le résultat de recyclage de couches du Zech-

stein germanique. Il paraît pourtant plus plausible d'invoquer le jeu de facteurs morphologiques dissemblables pour rendre compte de ces couches plus confinées dans un bassin qui, par ailleurs, serait plus soumis aux influences marines que les deux autres.

Nous ajouterons à ces données paléobiologiques locales quelques considérations à caractère plus général. La première sera tirée du lac Asal, petit appareil salifère de la République de Djibouti. Ce lac sursalé tire l'intégralité de la paragenèse saline présente des eaux de l'océan Indien qui percole à travers le seuil volcanique du Goubbat el Kharab. La zone de raccord avec l'océan étant souterraine, le lac ne peut entretenir la vie d'aucune espèce marine et ses dépôts ne doivent donc en présenter aucun reste. Il n'en demeure pas moins que la totalité de son stock salin est d'origine marine. L'absence d'éléments biologiques marins n'est pas, à elle seule, la preuve qu'un remplissage évaporitique ne résulte que d'un lessivage continental.

D'une façon plus générale, un fait important nous est suggéré par les milieux actuels. On a observé, dans les milieux sursalés les plus divers, qu'au-delà d'une salinité de 90 ‰ (et de façon beaucoup plus radicale encore au-delà d'une salinité de 150 ‰) les faunes et les flores à tests disparaissent. Les coquilles de mollusques, les tests de foraminifères et d'ostracodes, les frustules de diatomées ne dépassent pas ces valeurs de salinité. Dans ces milieux sursalés, la vie est exceptionnellement abondante, mais sous des formes qui ne fixent plus ni le calcaire, ni la silice, qu'il s'agisse de bactéries, de ciliés (*Favrea salina*), d'algues vertes (*Dunaliella salina*) de crustacés (*Artemia salina*), etc. Au surplus, dès un seuil de 200 ‰, ce biota apparaît très similaire dans les milieux sursalés d'origine marine et ceux d'origine continentale. La conséquence géologique est la suivante. Supposons qu'une série comme les Marnes Vertes à Limnées ait correspondu, pendant la majorité du temps représenté, à un dépôt dans des conditions sursalées, aucun reste minéral ne vient en porter témoignage. Au contraire, il aura suffi de quelques dessalures, même sporadiques, même très brèves pour que la vie à coquilles se développe, laissant le témoignage de Limnées, de *Melania*, etc. N'est-il pas évident, dans une telle supposition, que les enseignements de ces quelques phases auront toute chance d'être étendus par le géologue à l'ensemble de l'intervalle. Dans de telles conditions pourtant, ce témoignage des seules périodes compatibles avec la production de coquilles est un témoignage biaisé, si on l'étend à l'ensemble de la série, amnésique ou aphasique dans toutes les périodes sursalées.

Reste le problème des contaminations de milieux continentaux par des facteurs tels que les pattes d'oiseaux. Les oiseaux amèneraient dans des milieux purement continentaux, dont la salinité ne diffère point trop de celle de l'eau de mer, des larves d'animaux marins qui proliféreraient alors, constituant en quelque sorte des dépôts pseudomarins. Ce mécanisme a pu être évoqué pour rendre compte de faune ou de flore marines (telles que les nannoflores calcaires pélagiques) dans des milieux qui en fait, seraient restés purement continentaux. Un tel mécanisme semble valide pour rendre compte des couches quaternaires à *Cardium* que les premiers auteurs avaient parfois imputées à une « mer saharienne » quaternaire tout à fait imaginaire. Mais ce

mécanisme hypothétique nous semble à rejeter en ce qui concerne les bassins salifères que nous examinons ici. C'est ainsi que les faunes, les microflores (dinoflagellés marins) et les nannoflores (coccolithes) livrés par le Salifère moyen du bassin de Mulhouse nous paraissent, avec le maximum de vraisemblance, imputables à des apports marins et non à des pattes d'oiseaux. L'évolution de la série montre, en effet, une bonne coïncidence entre l'apparition de ces restes marins, d'une part, et, d'autre part, l'évolution du brome dans les intercalations salines, l'augmentation de la matière organique de type 2, etc. Une contamination par des pattes d'oiseaux aurait eu toute chance, au contraire, de se produire à n'importe quel moment où la salinité du milieu se serait trouvée fortuitement ajustée à une valeur proche de celle de l'eau de mer, à n'importe quel niveau dans cette épaisse série évaporitique.

4) Conclusion

Dans les bassins mêmes que nous envisageons, l'Oligocène supérieur offre l'exemple de dépôts en grande partie évaporitiques et qui semblent bien strictement continentaux. Or, ces dépôts sont franchement caractéristiques : nature de la paragenèse évaporitique (y compris la présence de glauconite dans le Valentinien), grande variabilité des épaisseurs et des faciès d'un point à un autre, ceinture complète de sédiments détritiques qui finissent par « étouffer » les dépôts évaporitiques, etc. Dessous, les séries salifères du Stampien et du Ludien supérieur de Haute-Alsace, de Bresse et de Valence ne présentent pas la plupart de ces caractères. C'est sans doute *a contrario* un argument supplémentaire pour admettre l'origine marine des saumures qui leur ont donné naissance. Reconnaissons néanmoins que dans ce problème, nous en sommes encore à inventorier les arguments en faveur d'origine continentale et marine sans pouvoir trancher en toute certitude.

Que peut-on penser de solutions de compromis, qui, dans un bassin donné attribueraient une origine continentale aux saumures responsables d'une partie du sel (par exemple le Sel inférieur de Haute-Alsace) et une origine marine à une autre partie du gisement (par exemple le Sel III et le Sel IV) ? Dans la mesure où ces dépôts salins sont restés cantonnés au même bassin, à peu près identiquement localisés, dans un contexte paléogéographique dont rien n'indique qu'il ait varié de façon drastique, la solution apparaît inacceptable. Que ce soit un mécanisme ou l'autre, sa réalisation a exigé un dispositif paléogéographique que l'on peut qualifier d'improbable, car il a fallu un ajustement délicat entre les apports en ions, les eaux pour les véhiculer et la rareté des détritiques qui auraient rempli et supprimé le bassin. Le maintien de cet ajustement et son retour répété dans le temps sont déjà des phénomènes étonnants. Mais n'est-il pas purement invraisemblable que des dispositifs différents dans leur origine et dans leurs processus aient pu ainsi s'établir deux fois sur le même site ? On peut supposer que si le Salifère inférieur de Haute-Alsace ne contient pas d'organismes marins, c'est parce que seul l'environnement salin y était représenté par des eaux qui percolaient comme celles du lac Asal. Au contraire, des relations un peu moins mal aisées ont dû s'établir au niveau du Salifère moyen qui ont permis l'installation répétée de faune et de flore marines.

B. Les phénomènes climatiques et leurs approches

Les données stratigraphiques actuellement disponibles dans les trois grands bassins salifères considérés semblent établir une certaine contemporanéité des principales phases évaporitiques dans ces différents bassins. Il faut cependant veiller, en cette matière, à ne pas tomber dans le piège d'un raisonnement circulaire : après qu'une analogie de faciès ait renforcé la conviction d'une contemporanéité jusqu'alors basée par exemple sur des données paléontologiques un peu insuffisantes, il convient de ne pas tirer trop de conclusions de la contemporanéité des faciès observés dans les différents bassins ! Quoi qu'il en soit cette contemporanéité au moins relative des phases évaporitiques est une donnée importante. Des causes climatiques peuvent en rendre compte en partie. Une subsidence rapide par exemple est aussi un élément éminemment favorable au piégeage des évaporites. Et la généralisation d'une telle subsidence active peut être le fait d'une phase régionale de distension. Mais, le seul jeu de la tectonique ne peut pas être suffisant. Il a fallu que le bilan évaporatoire fut satisfaisant sur tous les bassins versants. Il a fallu que ces bassins de sédimentation ne se remplissent pas de détritiques au fur et à mesure qu'ils se creusaient. Il a fallu que la zone de raccord avec la mer ouverte offre les caractéristiques favorables si délicates à réaliser, etc. Et parmi ces conditions nécessaires, il est évident qu'une grande aridité représente un préalable rigoureusement indispensable. Cette aridité apparaît d'autant plus indiscutable que les évaporites se sont généralisées à ces époques, non seulement dans ces trois grands bassins salifères, mais dans une multitude d'autres bassins. Or n'est il pas évident qu'il est inimaginable que les multiples autres conditions (position par rapport à la mer et morphologie de la zone de raccord, affleurements éventuels du Trias évaporitique, mise en sommeil de la sédimentation détritique et relief de l'arrière-pays, etc.) aient été simultanément identiques en tous ces bassins et les plus favorables.

En dehors de ces principes, il est intéressant de tenter d'en savoir plus grâce à des disciplines telles que la palynologie, la géochimie, etc. Et les données ainsi apportées apparaissent d'autant plus fiables qu'elles sont convergentes. A cet égard, les analogies ou au moins les parentés entre la courbe des valeurs du brome dans la halite, témoignant de salinités plus ou moins fortes des saumures et donc *a priori* de climat plus ou moins aride, et la courbe de quelques grands groupes de palynomorphes (Pinacées, Cupressacées, etc.), plus ou moins caractéristiques des conditions climatiques, sont tout à fait remarquables. On a établi ces analogies aussi bien en Alsace (Schüler, 1988-1990, fig. 107), qu'en Bresse (fig. 4).

Toutefois, certaines interprétations climatiques tirées de la palynologie sont totalement irrecevables. Ainsi, il n'est pas admissible de considérer que pendant le dépôt de telle ou telle grande série saline, le climat était sub-tropical à tempéré ou *a fortiori* d'affirmer que la pluviosité était de 1 500 à 2 000 mm d'eau (Schüler, 1988-1990). Le bilan évaporatoire ne peut être satisfaisant sous une telle pluviosité. La présence de palynomorphes, d'où ces conclusions sont tirées, ne pouvant

être récusée, deux faits peuvent rendre compte de notre désaccord avec ces interprétations.

1) Des régions montagneuses, humides, coexistent couramment avec des régions basses et extrêmement arides. Il en est, ainsi, dans la nature actuelle des montagnes des confins éthiopiens et de la dépression d'Asal. Dans ce contexte, les régions montagneuses fourniront en abondance des pollens de végétation humide. Les régions arides, désertiques ne fourniront que très peu de pollens. Les populations observées alors dans les sédiments évaporitiques pourront avoir un cachet humide alors que le bassin de l'aire salifère *sensu stricto* sera extrêmement désertique.

2) Les palynologistes qui savent la grande pauvreté des sédiments salins ou anhydritiques en pollens, échantillonnent préférentiellement les passées détritiques, si rares soient-elles dans les séries évaporitiques. A l'évidence, on a pu se laisser aller à étendre aux conditions de sédimentation de toute une série saline des enseignements qui n'étaient valables que pour de très fines passées détritiques, pourtant franchement anormales par rapport au sel dans lequel elles étaient encaissées. On a peut-être perdu de vue le fait que la **période** des phénomènes climatiques est susceptible d'être d'une extrême brièveté en comparaison des temps nécessaires aux phénomènes géologiques (Busson, 1983). Et de ce fait, le climat humide coïncidant avec telle ou telle très fine passée argileuse dans une série halitique peut différer totalement du climat qui aura présidé au dépôt du sel encaissant où les palynomorphes sont absents ou trop rares et trop dispersés pour être étudiés.

C. Morphologie et profondeur de dépôt

1) Morphologie

La morphologie : 1) des bassins, 2) des aires continentales voisines qui alimentent l'alluvionnement détritique, 3) de la zone de raccord avec la mer, etc., est une résultante complexe des déformations tectoniques et des facteurs de la sédimentation, en particulier du climat. Ce dernier joue évidemment, non seulement sur le bilan évaporatoire, capital pour une sédimentation en grande partie saline, mais également sur la profondeur de l'altération, la vitesse et la force de l'érosion, l'activité de l'alluvionnement, etc. Si ces segments français du rift paléogène européen sont remarquables par l'importance du sel, la sédimentation conjointe et antagoniste des détritiques n'est pas moins remarquable. Le fait s'explique à la fois par la petitesse des bassins et la période paléogène où les déformations ont été fréquentes et intenses.

Nous ne savons pratiquement rien de la zone de raccord avec la mer qui conditionne un élément capital « aussi important que la tectonique et le climat pour ce type de sédimentation » : la capacité d'apports en eau marine et les entraves éventuelles au reflux de saumures.

Une remarque s'impose au sujet d'éventuels témoins de cette zone de raccord entre la mer et les bassins évaporitiques. L'absence fréquemment complète de ces témoins est parfois interprétée comme la preuve du caractère strictement continental de ces dépôts.

Soulignons que si les zones de raccord avaient eu une ampleur suffisante en épaisseur et en superficie pour que des dépôts marins aient des chances d'avoir été épargnés par l'érosion et d'être retrouvés, les bassins ici examinés auraient eu toute chance d'échapper aux confinements évaporitiques ! C'est parce que les relations ont été, au contraire, extrêmement limitées à un simple flux (voire peut-être limitées même à des apports par référoflux comme au lac Asal) que des dépôts salins ont pu occuper et remplir ces bassins.

On admet que ces grands bassins salins, malgré le parallélisme des grandes pulsations sédimentaires, ont été isolés les uns des autres. En Bresse et dans le Valentinois, par ailleurs, des seuils (Limonest, Montmiral) ont isolé des sous-bassins qui ont servi utilement d'aire de décantation piégeant des détritiques qui ne sont pas allés combler des fosses qui ont pu jouer en réceptacle salin. L'intensité de la structuration aux époques considérées rend possible qu'il y ait eu érection de seuils et formation d'autres avant-bassins ; les uns et les autres séparant nos trois grands bassins salifères de la mer ouverte et y favorisant confinement et sursalure. On pourrait retrouver là un dispositif de bassins en chapelet tels que A. Jauzein (1984) les a évoqués et tels que nous en avons signalé l'intérêt (Busson, 1990) pour l'interprétation des séries messiniennes de Méditerranée. L'hypothèse peut ainsi en être faite pour les quatre bassins alsaciens *grosso modo* disposés du nord au sud. Une eau de mer, puis des saumures de plus en plus concentrées ont pu cheminer du nord vers le sud, se faisant piéger de plus en plus efficacement vers le cul-de-sac méridional (bassin de Mulhouse) ; les trois autres bassins auraient joué en bassins de concentration à l'instar de ce qui se passe à une tout autre échelle dans les marais salants. M.-M. Blanc-Valleron (communication orale) réfute cette hypothèse en faisant observer que synchroniquement au sel et à la potasse de la base du Sel IV, intervalle où le contrôle stratigraphique est bon, on a des dépôts fluviatiles dans des séries plus septentrionales et, sur le seuil entre Mulhouse et Sélestat, par exemple à DP 35, on est en présence de dépôts de mangroves. Cette réfutation toutefois n'est pas entièrement convaincante. L'intervalle de temps considéré laisse la place pour des alternances de faciès différents et les dépôts de saumures en voie de concentration peuvent avoir été discrets dans les premiers bassins alors qu'ils ont été importants dans le dernier. La formation des couches de potasse elles-mêmes qui exige des conditions conjointes d'alimentation et d'évaporation si difficiles à réaliser, s'explique probablement mieux par un dispositif de bassins en chapelet, exportant irréversiblement de l'un dans l'autre des saumures de plus en plus concentrées.

En dépit de cas où le sel a largement transgressé les marges, la sédimentation évaporitique apparaît très inféodée à une structuration forte des dépôts-centres. Le sel, plus que les évaporites en général, apparaît comme un véritable réactif des fortes subsidences.

C'est ainsi que si nous reprenons l'exemple alsacien au niveau du Sel V, on constate que les isopourcentages de halite les plus forts sont atteints dans le bassin de Mulhouse (65 %) alors que dans les autres bassins ces pourcentages sont moins élevés (40, 20 et 10 % au centre des bassins de Sélestat, Strasbourg et Pechelbronn), coïncidant avec des épaisseurs globales moins

fortes. La relation entre l'abondance du sel et la subsidence se vérifie donc aussi bien dans un bassin donné, c'est le schéma concentrique de la répartition des sels, que d'un bassin à l'autre. Cette relation rend probable le jeu irremplaçable d'une morphologie différenciée pour piéger les saumures à l'origine de ces accumulations salines.

Un jeu complémentaire d'exhaussement des marges accompagnant l'enfoncement du dépôt-centre a entraîné la dissolution systématique du sel déposé sur les bordures, réalimentant la fosse centrale où il se déposait et se conservait. Cette localisation nous conduit naturellement à envisager le problème de la profondeur de dépôt de ces séries salines.

2) Profondeur de dépôt des séries salines

Les travaux de C.R. Handford (1981) et T.R. Lowenstein et L.A. Hardie (1985) ont illustré récemment des conditions de sédimentation et de diagenèse précoce sous tranche de saumures très faible et même éphémère. Il s'agit des dépôts de *salt pans*, plaines périodiquement inondées où l'on observe successivement une phase d'inondation où il y a dissolution d'une partie du sel précédemment développé ; puis une phase de concentration avec dépôt des insolubles, puis la cristallisation de trémies et chevrons de halite ; puis phase de dessiccation où s'opèrent les diagenèses correspondant à la croissance syntaxique, à la cimentation et au développement interstitiel de phénoblastes. R. Moretto (1987), ayant observé des analogies entre les structures pétrographiques du sel de Bresse et certaines structures de ces *salt pans*, a discuté et réfuté cette interprétation environnementale pour les séries qu'il étudiait.

Ainsi, cet auteur a fait observer l'absence très générale, sinon totale, de craquelures de dessiccation. Il a fait également observer, en ce qui concerne les phénoblastes de halite que, s'il s'était agi de croissance capillaire en milieu sub-aérien, les teneurs en brome devraient être supérieures à celle de la halite laiteuse de la même série, déposée sous une certaine tranche de saumure, ce qui n'est pas le cas. Dans le bassin de Mulhouse, M.-M. Blanc-Valleron a noté que les craquelures de dessiccation sont absentes dans le bassin au moins jusqu'au Sel IV, où elles ont été notées dans une série où apparaissent également la trace de tapis algaires. Dans un autre ordre d'idées, on peut remarquer, dans ce même bassin, que les séries marginales calcaires (carrière de calcaires à *Melania*) et gypseuses ont livré de nombreux restes de mammifères terrestres (une vingtaine d'individus dont des *Paleotherium*). Or, ceux-ci n'ont jamais été observés dans le dépôt-centre, malgré la présence dans ce bassin de plusieurs kilomètres de galeries de mine où de tels restes auraient pu être identifiés. En fait, l'ensemble des auteurs qui ont étudié ces bassins, ont admis sans réserve une sédimentation très largement sous-aquatique même si elle a été entrecoupée de phases temporaires d'assèchement.

Mais au-delà de ce consensus, il est beaucoup plus difficile d'évaluer une profondeur de dépôt.

Des arguments ont été avancés en faveur d'un dépôt sous tranche de saumure peu profonde. Ainsi, aussi bien en Bresse (Moretto, 1986-1987) que dans le Valentinois (Dumas, 1988), on a tiré argument des dissolutions constatées systématiquement au toit de

chacun des rythmes élémentaires de la halite. Et il est vrai qu'il est peu probable que la saumure de l'ensemble du bassin ait ainsi été amenée sous la saturation jusqu'à l'interface saumure-sédiments à chaque nouvelle arrivée d'eau si ce bassin avait été profond.

De même, D. Dumas observant les importantes et brusques variations des teneurs en brome au sein de chaque rythme salifère en déduit, légitimement semble-t-il, que le corps de saumure devait être peu épais. R. Moretto tire également parti de la faiblesse des dissolutions qui ont affecté les trémies et les radeaux au cours de la chute dans la saumure pour supposer un corps de saumure peu épais. Cet argument peut toutefois être réfuté car, si l'on suppose un corps de saumure à saturation ou proche de la saturation, celui-ci, même épais, n'aura pas eu de raison d'exercer de dissolution importante sur des cristaux de sel le traversant.

D'autres arguments apparaissent en faveur de profondeurs plus importantes, par exemple de l'ordre de quelques dizaines de mètres, voire de l'ordre de la centaine de mètres à certains moments. La pérennité de sel massif zébré (par exemple dans le T6 du Valentinois) où, sur de très fortes épaisseurs, se reproduit le rythme carbonates, anhydrite, halite doit être rappelée. La pérennité de ce système est telle qu'elle évoque une grande stabilité des conditions sédimentaires peu compatibles avec une tranche d'eau trop mince. Les corrélations qui se font à longue distance dans ces bassins, et qui sont quelquefois merveilleusement précises, établissent la généralisation d'horizons indépendants de la morphologie du fond. Cela suppose également une tranche d'eau qui ne soit pas trop mince. La pureté du sel si remarquable en Bresse, dans le Valentinois et même dans certaines séries alsaciennes (grand banc de sel gemme du S I) est un caractère dont on a souvent tenté de tirer parti pour interpréter la bathymétrie de dépôt des séries salifères. Pour nombre d'auteurs, ces séries très pures n'ont pu se déposer que si elles ont comblé très rapidement des fosses préexistantes, affamées. Si la sédimentation de telles séries avait dû attendre que la subsidence lui offre la place nécessaire, il semble que l'on ne se trouverait pas en présence de séries aussi pures, mais polluées par des apports détritiques, au moins fins ou très fins. Reconnaissons que cet argument est cependant fragile et qu'un tel remplissage a pu se faire par bancs (regroupant un certain nombre de rythmes) d'épaisseur au total relativement modeste.

Le fait que les intercalaires insolubles, par exemple dans le Sel IV de Haute-Alsace, soient souvent finement laminés implique la pérennité d'un système à deux corps d'eau peu compatible avec une très faible profondeur d'eau. Le même raisonnement s'impose *a fortiori* pour les séries laminées parfois épaisses, rapportées en Bresse (E4) ou dans le Valentinois (partie inférieure de la Formation marneuse intermédiaire). Le maintien sur des mètres ou des dizaines de mètres de cette lamination très fine, souvent riche en matière organique, exige ici encore la grande stabilité d'un système d'eau stratifié. Certes, la profondeur d'eau qui s'en trouve impliquée ne correspond pas à la sédimentation salifère, mais ces laminites sont parfois directement superposées au sel et certaines intercalations laminées sont même intercalées d'évaporites.

Certes, toutes ces données sont qualitatives ; la tentative d'avancer des chiffres de profondeur serait tout à fait irréaliste. Au demeurant et à supposer qu'il y ait eu remplissages successifs de bassins temporairement affamés, **la profondeur risque d'avoir varié radicalement entre le début et la fin de chacune de ces phases de remplissage.**

On a longuement insisté, dans le texte ci-dessus, sur la coïncidence dans ces bassins entre les aires à sel dominant (quelquefois presque ubiquiste) et les aires les plus épaisses. Il est vrai que les maximums d'épaisseur ne font que traduire les maximums de subsidence et n'impliquent rien sur la profondeur de dépôt. Néanmoins, en présence de cette coïncidence assez stricte et assez générale, on ne peut échapper à l'idée que les aires les plus épaisses représentaient, à un instant donné de la sédimentation, des aires au moins légèrement déprimées par rapport aux marges détritiques ou carbonatées ou sulfatées. Mais, même l'existence d'aires plus ou moins centrales déprimées n'implique pas forcément une différenciation bathymétrique. On peut imaginer, dans une cuvette topographique très légère et soumise à des assèchements répétés, l'individualisation d'aires à vocation interstitielle différente. La disposition des faciès et les mécanismes relevés dans les argilites inférieures de la formation E4 (Bresse) peuvent jeter quelque lumière sur ce dilemme.

On se rappelle que dans ces bancs successifs, métriques ou plurimétriques, les apports détritiques grossiers, puis fins, venant du sud, emplissent les aires méridionales, mais s'amenuisent et même se biseautent et disparaissent vers le nord un peu plus subsident, laissant un bassin affamé à l'échelle du banc. Puis, après cette progression centripète incomplète, la sédimentation salifère démarre au cœur de la fosse affamée, puis progresse lentement vers le sud, et par ce mouvement centrifuge, finit par conquérir une partie de ces marges méridionales. Après quoi, à la prochaine phase diluvienne, ce sel est dissous dans le sud, moins subsident ou peut-être même très légèrement exhaussé. Il est, au contraire, protégé au nord dans la partie la plus subsidente. Il est évident que cette vaste marge sud, rapidement comblée par l'alluvionnement détritique et où le sel est « scalpé » à la fin de chaque cycle, devait être en contre-haut par rapport à la fosse salifère centrale. Celle-ci devait être non seulement subsidente, mais, au début de chaque banc de sel au moins, légèrement plus profonde.

Un autre fait rend probable la persistance de saumures dans la région des dépôts-centres évaporitiques. C'est l'extrême difficulté qu'il y a à évaporer les saumures ultimes dont la tension de vapeur est extrêmement basse. Il n'y a d'ailleurs pas de dépôt des sels correspondants (chlorures et sulfates de Mg et de Ca) ni en Bresse, ni à Valence, ni en Haute-Alsace, hormis dans la partie inférieure du sel IV. La forme très circonscrite de ces bassins ne rend pas plausible le reflux de ces saumures ultimes. L'hypothèse la plus simple serait qu'elles soient restées piégées dans ces dépressions centrales, qui n'ont donc dû être que très exceptionnellement asséchées en totalité.

Les mécanismes ainsi reconstitués sur ces bancs de la formation E4 à l'échelle du mètre ou de quelques

mètres doivent être transposables à des formations salifères plus épaisses et plus massives où le diachronisme du détritique d'une part, des sels d'autre part, a dû être de règle et où une certaine différenciation altimétrique a dû être fréquente.

Certes, ces bassins ont pu être très plats et les pentes très faibles : mais même des pentes infimes sur des bassins de plusieurs dizaines de kilomètres peuvent avoir pour résultat un dépôt-centre couramment recouvert de saumures épaisses de plusieurs mètres ou de plusieurs dizaines de mètres. Nous serions loin alors de *salt pans* saisonnièrement exondés.

Les conditions de sédimentation et de diagenèse ont pu être très sensiblement différentes dans le cas des évaporites continentales de l'Oligocène supérieur du Valentinois. Il est possible que dans la genèse de cette halite centrale et des auréoles concentriques, glaubéritiques, sulfatées-calciques, puis carbonatées et enfin silicoclastiques, les dessiccations aient été plus poussées et les processus interstitiels plus développés. Il est possible que cette sédimentation se soit effectuée dans un paysage rappelant les *saline mud flats* de L.A. Hardie *et al.* (1978). La glaubérite, par exemple, pourrait ainsi être largement de transformation diagénétique, alors qu'une saumure enrichie en sulfate et appauvrie en Ca imbibait et parcourait un sédiment antérieur.

V. Conclusions générales

1) Les observations faites aux échelles les plus diverses sur ces grands bassins salifères ont convergé pour suggérer une sédimentation sous-aquatique. Dans différentes lithologies (carbonates, sulfates, sel), les observations faites par l'équipe même qui a rédigé l'étude de sédiments actuels subaquatiques dans des ouvrages (Busson *et al.*, 1982 ; Orti Cabo et Busson, 1984) auxquels les auteurs de cet article ont également participé, confirment, précisent et illustrent cette interprétation. Par ailleurs, cette interprétation est parfaitement cohérente avec la position centrale de ces évaporites et avec leur coïncidence avec l'aire affectée de la subsidence la plus rapide et la plus forte. Il est sans doute salutaire d'illustrer de tels modèles après plus de deux décennies où les interprétations en termes de *sebkha* supratidale, platier sub-aérien, etc... ont été données aux dépôts évaporitiques les plus variés, souvent sur la foi de simples similitudes pétrographiques.

Par ailleurs, du point de vue des appareils évaporitiques dans leur ensemble, aucune comparaison ne nous paraît valide entre ces bassins salifères et les bassins de dépôts évaporitiques actuels, au demeurant fort discrets. Par contre, une comparaison valide pourrait sans doute être faite avec le sel quaternaire du fossé de la Mer Morte (sous-jacent aux évaporites actuelles de ce lac) ou avec des évaporites du fossé Danakil (Hutchinson et Holwerda, 1968 ; Hutchinson *et al.*, 1970). Parmi les points de rapprochement, on citera : la forme allongée, imposée par l'origine structurale ; l'importance très prépondérante du sel et, en contrepartie, la discrétion

des carbonates (en contraste avec de nombreux autres dépôts évaporitiques fossiles) ; la dissymétrie antéro-postérieure imposée par l'alimentation marine à une extrémité et le fait que ces deux bassins sont complètement circonscrits par des reliefs alimentant la sédimentation détritique, etc... Malheureusement, ces deux importants gisements ne sont pas illustrés par des données publiées récentes, suffisamment détaillées pour qu'une telle comparaison puisse être approfondie de façon fructueuse.

2) Au sujet du déterminisme de ces remplissages évaporitiques, on a méthodiquement recherché la part qui pouvait revenir aux mouvements tectoniques, aux péjorations climatiques, aux possibilités d'alimentation en saumures, etc... Le maintien presque permanent d'une sédimentation évaporitique tout au long du Ludien supérieur et du Stampien (avec parfois récurrence dans l'Oligocène supérieur) est tout à fait étonnant si l'on songe à la conjonction de facteurs délicatement ajustés indispensables pour permettre le dépôt de sels, *a fortiori* quand ceux-ci sont très purs. Le maintien de telles circonstances pendant des temps géologiques (une dizaine de millions d'années) dans un bassin donné pose des problèmes non résolus. Le fait est encore plus remarquable quand cette prolifération évaporitique ne se cantonne pas, par exemple à la bordure d'une plate-forme, mais tend à envahir tous les bassins qui apparaissent dans une très vaste région.

Soulignons que malgré l'ampleur des investigations menées, de l'échelle de la sismique à l'échelle du nanofaciès, de nombreux problèmes classiques dans l'étude des évaporites restent non résolus. C'est ainsi que sur l'origine des saumures (marines ou continentales), la profondeur de dépôt du sel, etc., nous n'avons pu conclure que par une discussion des observations, arguments et conclusions apportés.

3) Pour terminer, nous ne ferons qu'évoquer ici une comparaison qu'il sera intéressant d'approfondir dans un autre cadre. Il s'agit de la comparaison entre cette période Éocène supérieur-Oligocène, d'une part, et, d'autre part, le système triasique, par exemple en Europe occidentale, en Afrique du Nord, etc... Dans les deux cas, il s'agit de dépôts post-tectoniques (et partiellement syntectoniques), ayant fait suite à de longues émergences qui ont favorisé des altérations importantes. Citons ainsi les faciès altérés et le Sidérolithique qui ont précédé les évaporites paléogènes et les « maladies du Trias ». Dans les deux cas, ces dépôts exposent souvent en transgression discordante sur des ensembles épais (pouvant comprendre plusieurs systèmes), qui souvent sont *grosso modo* caractérisés par une concordance générale. Dans les deux cas, on a noté une équivalence latérale et un affrontement remarquable entre des sels épais, massifs, extensifs et des sédiments détritiques, les uns et les autres témoignant de conditions climatiques un peu contradictoires, évidemment alternantes. Les différences ne sont pas moins remarquables.

Le Trias évaporitique s'est étalé sur d'immenses plates-formes et, pour l'essentiel, les sels sont d'origine marine. Le Paléogène évaporitique des rifts et grabens que nous examinons est surtout remarquable dans ces

fossés très subsidents (1). L'origine des sels est plus ambiguë et l'on ne peut exclure qu'une partie provienne du Trias. Le Trias est caractérisé par l'ampleur de ses diagenèses magnésiennes, aussi bien carbonatées (dolomies) qu'argileuses (corrensite, chlorites magnésiennes, etc...). Ces mêmes diagenèses sont, au contraire, d'une extrême discrétion dans les séries salifères épaisses du Paléogène évaporitique. N'est-il pas évident que même l'explication d'une différence aussi considérable n'apparaît pas clairement ?

Remerciements

Une évocation exhaustive des aides reçues pour les travaux de base dont quelques données ont été ici synthétisées, se trouve dans les thèses. Elle ne sera évidemment pas reproduite ici, où nous ne citerons que quelques points importants. Les salaires des chercheurs non statutaires ont représenté des sommes particulièrement importantes et sans ces fonds rien n'eût été possible. Outre la bourse ayant financé la thèse de R. Moretto, rappelons la bourse de thèse Société Géologique de France-Schlumberger (Curial). De son côté, D. Dumas a reçu pendant l'exécution de sa thèse, une aide modique des crédits de Naturalia et Biologia gérés par le signataire de ces lignes. Le contrat Andra n° 1240 a permis pendant deux années le financement de recherches post-doctorales de R. Moretto et de A. Curial.

Sous la responsabilité de G. Busson, une formation de recherche du CNRS : « Nature et Genèse des Faciès Confinés » (RCP 459 de 1977 à 1981 ; GRECO 52 de 1982 à 1985, Unité Associé 1209 de 1986 à 1988 ; SDI 189 depuis) a fourni le cadre scientifique de ces études ainsi qu'un financement de fonctionnement minime, mais assuré. Dans cette formation, l'étude des segments de rifts paléogènes français a tenu une part relativement importante. Dans le même cadre, une équipe intimement associée à celle du Paléogène étudiait les phénomènes actuels des milieux sursalés et en faisait bénéficier l'interprétation des séries fossiles. Cette étude des phénomènes actuels a été largement irriguée par un contrat de recherche avec SNEAP (contrat n° 3845 de 1980 à 1983). L'Agence Nationale de Gestion des Déchets Radioactifs, dans le cadre d'un contrat pour « l'étude géologique et diagraphique des formations salifères du Paléogène de Bresse » a apporté à ces études une contribution déterminante. La Délégation Générale à la Recherche Scientifique avec les projets « Valorisation des Ressources du Sous-sol » 77-7-516 et 81-D-1100, a largement aidé nos recherches. Les Mines de Potasse d'Alsace, dans le cadre d'une convention avec l'Université L.-Pasteur (1981-1985), puis avec l'Unité 1209 à partir de 1985, ont participé au soutien des études de M.-M. Blanc-Valleron.

Les laboratoires d'implantation des chercheurs impliqués dans ces études ont évidemment contribué à

l'efficacité de leurs efforts : laboratoire de Géologie du Muséum National d'Histoire Naturelle (Busson, Blanc-Valleron, Rouchy, Cornée), laboratoire de Géologie des Ensembles Sédimentaires de l'Université Nancy 1 (Moretto), Département des Sciences de la Terre de l'Université Claude-Bernard (Curial, Dumas, Dromart). Nous sommes également considérablement redevables à l'égard du laboratoire de Géochimie de l'Institut Français du Pétrole qui a permis l'acquisition de très nombreuses données sur la matière organique dans ces séries. La quasi-unanimité des données qui sont à la base de ces études, se localisent en subsurface. Rien n'aurait été possible sans la coopération des organismes détenteurs de ces données. Gaz de France a confié à nos chercheurs ses carottes, ses diagraphies, ses rapports de fin de sondage, ses collections de photos, etc., des concessions d'Etrez et Tersanne. Les Mines de Potasse d'Alsace ont mis à la disposition de M.-M. Blanc-Valleron leurs sondages, leurs mines, les innombrables données d'observation et d'interprétation accumulées depuis des décennies. Le Service de Conservation des Gisements d'Hydrocarbures a fonctionné très efficacement pour ces recherches, comme pour l'ensemble des recherches académiques, jusqu'en 1987, année où il a supprimé la gratuité de ses prestations. Les sociétés Géostock, Rhône-Poulenc, SNEAP, SSRP, Compagnie Française des Pétroles (Total), les services régionaux du BRGM et la Mairie de Valence, ont mis à la disposition des chercheurs leurs logs, carottes, profils sismiques, etc.

Que toutes ces entreprises et ces organismes soient remerciés pour la compréhension dont ils ont fait preuve à l'égard de la recherche académique et pour la confiance qu'ils nous ont personnellement témoignée.

Les séjours si bénéfiques du Professeur B.C. Schreiber ont été permis grâce à un poste de Professeur associé au Muséum, par une subvention de l'OTAN et enfin par des fonds de la Research Fondation de la cité de New York.

A. Roure s'est avérée une documentaliste particulièrement efficace à tous les stades de ce travail. E. Cambreleng pour le dessin, N. Day pour la bibliographie, S. Guillon et M. Pallas pour la dactylographie ont également contribué à la mise au point du manuscrit. J. Sorant et M.-C. Laurent ont été des collaborateurs bénévoles auxquels nous adressons également nos bien vifs remerciements.

Bibliographie

BLANC-VALLERON M.-M. (1990-1991). - Les formations paléogènes évaporitiques de Mulhouse et des bassins plus septentrionaux d'Alsace. Thèse Doct. ès Sciences Naturelles, Univ. Louis-Pasteur, Strasbourg, 1990, 350 p., 162 fig., 25 pl. photo, annexes : 136 p., Documents du BRGM, Fr., n° 204.

BLANC-VALLERON M.-M., GELY J.-P., SCHULER M., DANY F., ANSART M. (1991). - La matière organique associée aux évaporites de la base du Sel IV (Oligocène inférieur) du bassin de Mulhouse (Alsace, France). *Bull. Soc. géol. Fr.*, **162**, 1, pp. 113-122.

BUSSON G. (1972). - Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. *Mém. Mus. nat. Hist. nat. Paris, sér. C.*, **26**, 441 p.

(1) A. Curial *et al.* (1988) opposent des bassins où les corrélations à longue distance sont excellentes, jusqu'à l'échelle du banc ou du faisceau aux bassins tels que ceux de Bresse et de Valence, où seuls les événements majeurs se retrouvent d'un bassin à l'autre. Et ils imputent ces différences au fait que les premiers se seraient déposés sous tranche d'eau plus épaisse que les seconds. On peut pourtant penser que cette différence, très réelle, tient plus à des contrastes structuraux que bathymétriques : la sédimentation de plate-forme très extensive du Trias a sans nul doute été plus favorable à de telles corrélations très fines que les grabens très localisés et très subsidents du Ludien-Stampien.

- BUSSON G. (1974). - Le Trias évaporitique d'Afrique du Nord et d'Europe occidentale : données sur la paléogéographie et les conditions de dépôt. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), **16**, pp. 653-665.
- BUSSON G. (1978). - L'unité des faciès confinés en milieu de plate-forme carbonatée. In : « Livre jubilaire Jacques Flandrin ». Docum. Lab. Géol. Fac. Sci. Lyon, **4**, pp. 87-112.
- BUSSON G. (1983). - Sur la signification paléoclimatologique des roches salines. Actes Coll. A.G.S.O., Bordeaux, mai 1983. *Bull. Inst. Géol. Bass. Aquitaine*, Bordeaux, **34** et Cah. du Quaternaire (CNRS) n° spécial, pp. 59-85.
- BUSSON G. (1988). - Relations entre les types de dépôts évaporitiques et la présence de couches riches en matière organique (roches-mères potentielles). *Rev. Inst. fr. Pétrol.*, Paris, **43**, 2, pp. 181-215.
- BUSSON G. (1990). - Le Messinien de la Méditerranée... vingt ans après. *Géologie de la France*, n° 3-4, pp. 3-58.
- BUSSON G., CORNÉE A., DULAU N. *et al.* (1982). - Données hydrochimiques, biologiques, isotopiques, sédimentologiques et diagénétiques sur les marais salants de Salin-de-Giraud (Sud de la France). *Géol. médit.*, Marseille, **9**, (4), 1982 (publ. 1984), 288 p.
- BUSSON G., CORNÉE A. (1988). - Enseignements généraux de l'extrême constance de la séquence argile-halite du Carnien de bassins distants et isolés d'Europe du Nord-Ouest. *Eclogae geol. Helv.*, Bâle, **81**, 2, pp. 441-455.
- BUSSON G., CORNÉE A. (1988 a). - Données sur les paléoclimats déduites de la sédimentation continentale du Mésozoïque saharien. Publ. occasionnelle CIFEG, Paris, 1989, **18**, 87 p.
- BUSSON G., CORNÉE A. (1989 b). - Quelques données sur les antécédents climatiques du Sahara : la signification des couches détritiques rouges et des évaporites du Trias et du Lias-Dogger. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (8), **5**, 1, pp. 3-11.
- BUSSON G., NOËL D. (1972). - Sur la constitution et la genèse de divers sédiments finement feuilletés (« laminites »), à alternances de calcaire et de matière organique ou argileuse. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, (D), **274**, pp. 3172-3175, 3 pl.
- BUSSON G., PERTHUISOT J.-P. (1977). - Intérêt de la Sebkhah el Melah (Sud-Tunisie) pour l'interprétation des séries évaporitiques anciennes. *Sedim. Geol.*, Amsterdam, **19** (2), pp. 39-164.
- BUSSON G., ROUCHY J.-M. (1987). - Étude pétrographique et géochimique de grandes accumulations évaporitiques du Trias et du Paléogène français. C.R. fin étude d'une recherche financée par le Ministère de la Recherche et de l'Enseignement supérieur, aide 81.D.1100, 356 p.
- CAVELIER C. (coordinateur) *et al.* (1984). - Paléogène in Synthèse géologique du Sud-Est de la France. Stratigraphie et paléogéographie. Mém. BRGM, Fr., **125**, pp. 389-468.
- CODY R.D. (1979). - Lenticular gypsum : occurrences in nature, and experimental determinations of effects of soluble green plant material on its formation. *J. Sedim. Petrol.*, **49**, 3, pp. 1015-1028.
- CODY R.D., CODY A.M. (1988). - Gypsum nucleation and crystal morphology in analog saline terrestrial environments. *J. Sedim. Petrol.*, **58**, 2, pp. 247-255.
- COURTOT C., GANNAT E., WENDLING E. (1972). - Le bassin potassique de Mulhouse et ses environs. Étude du Tertiaire. *Sci. Géol. Bull.*, Strasbourg, **25**, 2-3, pp. 69-91.
- CURIAL A. (1986-1987). - La sédimentation salifère et suprasalifère du Paléogène Bressan (France). Comparaison entre les données diagraphiques et lithologiques. Étude diagraphique du Champ d'Étrez et synthèse du bassin. Thèse Univ. Claude-Bernard, Lyon I, 1986, 254 p., 70 fig., 22 tabl. et Docum. Lab. Géol. Lyon, 1987, **100**, 192 p.
- CURIAL A. (1988). - Multiples applications of Dipmeter curves for analyzing evaporite formations : examples from Paleogene of Bresse trough, France. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, Tulsa, **72**, 11, pp. 1323-1333.
- CURIAL A., DUMAS D., MORETTO R. (1988). - Évolution comparée et corrélation entre deux bassins salifères paléogènes du rift ouest-européen : les fossés de Bresse et de Valence (France, Sud-Est). *C.R. Acad. Sci. Fr.*, (2), **306**, pp. 655-661.
- CURIAL A., MORETTO R. (en préparation). - The salt basin of Bresse (southern Saône graben). In Sedimentary deposition in rift and foreland basins : the Paleogene evaporites and related sediments of Eastern France and Northern Spain. Busson G. et Schreiber B.C. (eds).
- CURIAL A., MORETTO R. (1988). - Rapport final - contrat ANDRA 1240 - avenant n° 1 (AND/7 1240 BOOA), 80 p., inédit.
- DEGOUTIN M. (1922). - Description d'un gisement de sel actuellement en formation et théories relatives aux gisements anciens de sel gemme et de sels de potasse. *Ann. Mines*, (12), **2**, pp. 5-54.
- DEMANGE J., STIELTJES (1975). - Géologie de la région Sud-Ouest du TFAI (Région Lac Abhé-Lac Asal). *Bull. BRGM, Fr.* (2), Section IV, 2, pp. 83-119.
- DROMART G., DUMAS D. (en préparation). - Valence basin. In Sedimentary deposition in rift and Soudland basins: the Paleogene evaporites and related sediments of Eastern France and Northern Spain. BUSSON G. et SCHREIBER B.C. (eds).
- DUMAS D. (1988). - Le Paléogène salifère du bassin de Valence (Sud-Est de la France). Géométrie et sédimentologie des dépôts. Synthèse de bassin. Thèse Univ. Claude-Bernard, Lyon, 280 p.
- GAUDANT J. (1982). - Apport de l'Ichthyofaune à la caractérisation des milieux saumâtres cénozoïques. Mém. Soc. géol. Fr., Paris, n.s. 114, pp. 139-146.
- GAUDANT J., GUILLEVIN Y. (1979). - Découverte de *Dapalis (Smerdis) maclurus* (poisson téléostéen) dans l'Oligocène du bassin de Valence (Drôme) : implications stratigraphiques et paléogéographiques. *Bull. Mus. nat. Hist. nat.*, Paris, (C), **4**, 1, pp. 25-33.
- GOY G., BUSSON G. (1980). - Inventaire des évaporites du sous-sol : les bassins profonds du Trias du Sud-Est français, du Paléogène de Bresse et de Valence. C.R. fin étude DGRST (Action concertée « valorisation des ressources du sous-sol »), aide 77-7-1516, 169 p.
- HANDFORD C.R. (1981). - A process-sedimentary framework for characterizing recent and ancient sabkhas. *Sedim. Geol.*, Amsterdam, **30**, pp. 255-265.
- HANDFORD C.R. (1991). - Marginal marine halite : sabkhas and salinas. In : Evaporites, Petroleum and Mineral Resources, MELVIN J.L. (ed). Dev. in Sedimentology, **50**, Elsevier, Amsterdam, pp. 1-68.
- HARDIE L.A. (1990). - Potash evaporites, rifting, and the role of hydrothermal brines. *Amer. J. Sci.*, New-Haven, **290**, pp. 43-106.
- HARDIE L.A., SMOOT J.P., EUGSTER H.P. (1978). - Saline lakes and their deposits. In : Modern and ancient lake sediments. A Matter et M.E. Tucker (eds). Spec. Publ. Intern. Assoc. Sedim., **2**, pp. 7-41.
- HITE R.J., CATER F.W. (1972). - Pennsylvanian rocks and salt anticlines, Paradox Basin, Utah et Colorado. In : Geologic Atlas of the Rocky Mountains region. Rocky Mountain Assoc. Geol. Denver, Colorado : pp. 133-137.
- HUTCHINSON R.W., HOLWERDA J.G. (1968). - Potash-bearing evaporites. Danakil Area, Ethiopia, and discussion. *Econ. Geol., U.S.A.*, **63**, 8, pp. 978-979.
- HUTCHINSON R.W., ENGELS G.G., HOLWERDA J.G. (1970). - Potash bearing evaporites. Danakil Area, Ethiopia, discussion. *Econ. Geol. U.S.A.*, **65**, 4, pp. 516.
- JAUZEIN A. (1984). - Sur la valeur de quelques hypothèses relatives à la genèse des grandes séries salines. *Rev. Géol. dyn. Géogr. phys.*, **25**, 3, pp. 149-156.
- KIENER M. (1984). - Étude sédimentologique, pétrographique et minéralogique à partir des carottes et des diagraphies de la partie supérieure du sel et de sa couverture paléogène dans le sondage EZO8 (concession d'Étrez, Bassin de Bresse, Ain). Rapport fin d'étude. GRECO 52, Paris, 113 p. (inédit).
- LANGFORD F.F., BLANC-VALLERON M.M. (1990). - Interpreting Rock Eval pyrolysis data using graphs of pyrolyzable hydrocarbons. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, Tulsa, **74**, 6, pp. 799-804.
- LAUBAIN M. (1988). - Paléogène. *Géochronique*, 26, p. 30.
- LOWENSTEIN T.K., HARDIE L.A. (1985). - Criteria for the recognition of salt-pan evaporites. *Sedimentology*, **32**, pp. 627-644.
- MORETTO R. (1985). - Sédimentologie de la série salifère du Paléogène de Bresse (France). *Bull. Soc. géol. Fr.*, Paris, **1**, pp. 849-855.
- MORETTO R. (1986-1987). - Étude sédimentologique et géochimique des dépôts de la série salifère paléogène du bassin de Bourg-en-Bresse (France). Thèse Univ. Nancy I, 1986 : 312 p., 82 fig., 12 tabl., 21 pl. photogr. et Mém. Sci. Terre, Nancy, 1987, **50**, 250 p.
- MORETTO R. (1988). - Observations on the incorporation of trace elements in halite of Oligocene salt beds, Bourg-en-Bresse, France. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, pp. 2809-2814.

NURY D. (1988). - L'Oligocène de Provence méridionale. Stratigraphie-Dynamique sédimentaire. Reconstitutions paléogéographiques. *Documents du BRGM, Fr.*, **163**, 412 p., 120 fig., 37 tabl., 7 pl. photogr.

ORTI-CABO F., BUSSON G. (1984). - Introduction à la sédimentologie des salines maritimes de Santa Pola (Alicante, Espagne). *Rev. Invest. Geol.*, Barcelone, **38/39**, 236 p.

ORTI-CABO F., PUEYO-MUR J.J., GEISLER-CUSSEY D. et DULAU N. (1984). - Evaporitic sedimentation in the coastal salinas of Santa Pola (Alicante, Spain). *Rev. Invest. Geol.*, Barcelone, **38/39**, pp. 169-220.

POMEROL C. (1973). - Stratigraphie et paléogéographie. Ere Cénozoïque (Tertiaire et quaternaire). Ed. Doin, Paris, 270 p.

ROUCHY J.M. (en préparation). - Introduction - *in* Sedimentary deposition in rift and foreland basins : The Paleogene evaporites and related sediments of eastern France and Northern Spain, Busson G. et Schreiber B.C. (ed).

SCHMALZ R.F. (1971). - Evaporites and petroleum : Reply in *AAPG Bull.*, Tulsa, **55**, 11, pp. 2042-2045.

SCHULER M. (1988-1990). - Environnements et paléoclimats paléogènes. Palynologie et biostratigraphie de l'Éocène et de l'Oligocène inférieur dans les fossés rhénan, rhodanien et de Hesse. Thèse Doct. ès Sci. nat., Strasbourg, 384 p., 146 fig., 78 tabl., 14 pl. photo. + annexe : 80 p. et Documents du BRGM, Fr., n° **190**, 1990, 503 p.

SITTLER C. (1965). - Le Paléogène des fossés rhénan et rhodanien. Études sédimentologiques et paléoclimatiques. Mém. Serv. Carte géol. Alsace-Lorraine, Strasbourg, **24**, 392 p.

SONNENFELD P. (1984). - Brines and evaporites. Academic Press Inc., Orlando, Florida, 613 p.

TRIAI J.-M., TRUC G. (1974). - Évaporites continentales du domaine rhodanien. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, Fr. (II), **16**, 2, pp. 235-262.

TABLE DES MATIÈRES

I. Introduction	17	C. Les dissolutions des séries salifères	40
II. Aperçu méthodologique	18	1. Aux échelles centimétriques et décimétriques.....	40
A. Exploitation sédimentologique des diagraphies	18	2. Les dissolutions à l'échelle du banc.....	40
1. L'évolution subtile d'un composant minéralogique au sein d'un ensemble pétrographique complexe.....	20	3. Les dissolutions à l'échelle décamétrique.....	41
2. Le SHDT et la structure du sel.....	20	4. La brèche du sommet du sel en Bresse.....	42
3. Les diagraphies géochimiques.....	20	5. Les dissolutions à l'échelle de toute la formation salifère.....	42
B. Les inclusions fluides et les teneurs en brome, potassium et magnésium du sel	20	6. Conclusion.....	42
III. Descriptions	21	D. Essai de synthèse stratigraphique et paléogéographique	44
A. Coupes-types et généralités sur chaque bassin	21	1. Avant le Ludien supérieur.....	46
B. Résultats géochimiques, minéralogiques et pétrographiques	31	2. Le Ludien supérieur.....	46
1. Les détritiques terrigènes.....	31	3. Le Stampien.....	47
2. Les argiles.....	32	a) les bassins salifères.....	47
1) Les faciès.....	32	b) les autres régions rhodaniennes et méditerranéennes.....	48
2) Minéralogie.....	32	c) le Massif central.....	48
3. Les carbonates des aires de dépôt-centre.....	33	d) les Alpes occidentales.....	48
1) Les calcaires finement dispersés dans le sel massif..	33	4. L'Oligocène supérieur.....	49
2) Les calcaires un peu plus massifs.....	33	5. Conclusion.....	49
3) Les calcaires laminés.....	34	E. Schéma de répartition des grands groupes de faciès dans les bassins salifères	49
4) Faciès oolitiques et dolomies.....	34	1. Le bassin de Valence.....	49
4. Les sulfates de calcium.....	34	2. La Bresse.....	52
1) Les formes primaires ou précoces.....	35	3. Le bassin de Haute-Alsace.....	53
a) le gypse.....	35	4. Conclusion.....	54
b) l'anhydrite.....	35	IV. Interprétation et discussion	55
2) Diagenèses plus tardives.....	35	A. L'origine continentale ou marine des sels et le caractère des saumures	55
5. Les autres sulfates.....	35	1. Les arguments paléogéographiques.....	55
1) La glaubérite.....	35	a) le recyclage d'évaporites triasiques (ou permiennes ?).....	55
2) La célestine.....	36	b) l'alimentation par les mers paléogènes.....	55
6. Le sel.....	36	2. Les données pétrographiques et géochimiques.....	56
1) Halite primaire et sel « zébré ».....	36	3. Les données paléobiologiques.....	56
2) Les diagenèses halitiques précoces.....	37	4. Conclusion.....	57
3) La halite de diagenèse plus tardive.....	37	B. Les phénomènes climatiques et leurs approches	58
4) Le refermement des cavités salines.....	37	C. Morphologie et profondeur de dépôt	58
5) Conclusion.....	37	1. Morphologie.....	58
7. Couches potassiques.....	38	2. Profondeur de dépôt des séries salines.....	59
8. Diagenèses siliceuses.....	39	V. Conclusions générales	61
9. La matière organique dans les dépôts-centres des bassins salifères.....	39		
1) Haute-Alsace.....	39		
2) Bresse.....	40		
3) Bassin de Valence.....	40		