

## RECHERCHES MINÉRALOGIQUES SUR LE PERMO-TRIAS DES SONDAGES DE CAMPINE (\*)

par A.-M. FRANSOLET (\*\*)

(17 figures dans le texte)

### RÉSUMÉ

Dans le but de combler une lacune dans la connaissance du Permo-Trias de Campine, une étude détaillée de la fraction argileuse a été faite sur cent cinquante échantillons prélevés dans cinq sondages. L'analyse des minéraux argileux est complétée par l'étude pétrographique des échantillons et par une analyse des minéraux denses. Un inventaire de tous les minéraux rencontrés est établi de même que leur répartition et leurs associations.

Quelques conclusions sont dégagées de l'ensemble de ces investigations. L'hypothèse de l'influence d'une source scandinave dans le bassin limbourgeois est suggérée. Quelques données relatives au climat régnant à l'époque sont discutées. Les considérations génétiques et l'évolution des associations de minéraux argileux montrent la similitude nette existant entre le Permo-Trias de Campine et le Permo-Trias germanique eurafricain.

### ABSTRACT

In order to fill a gap in the knowledge of the Permo-Triassic rocks of Campine, a detailed study has been made of the argillaceous fraction in one hundred and fifty specimens collected from five borings. Analysis of the clay minerals is complemented by petrographic study of the specimens and by heavy mineral analysis. An inventory is given of all the minerals encountered, their distribution and their associations.

Some conclusions are drawn from the combined results of these investigations. The influence of a Scandinavian source in the Limbourg basin is suggested. Some data concerning the climate of the period are discussed. Genetic considerations and the evolution of the clay mineral associations show that clear similarities exist between the germanic eur-african Permo-Trias and that of Campine.

### I. INTRODUCTION

Le Permo-Trias de Campine n'a fait, jusqu'à ce jour, l'objet d'aucune recherche poussée, en particulier en ce qui concerne son contenu en minéraux argileux. Ce travail tente de combler cette lacune par l'étude des minéraux argileux en provenance de cinq sondages. Les résultats obtenus sont comparés avec les données déjà acquises sur le Trias des régions limitrophes.

Si les recherches minéralogiques sur le Permo-Trias de Campine ont été principalement axées sur les minéraux argileux, nous n'avons pas voulu abandonner

(\*) Communication présentée à la séance du 3 février 1970. Manuscrit déposé le 10 février 1970.

(\*\*) Université de Liège, Laboratoire de Minéralogie, Place du Vingt-Août 9, 4000 Liège.

l'étude des minéraux observables par les moyens classiques. D'ailleurs, la connaissance des argiles ne se borne pas à la seule définition des minéraux argileux.

En effet, la nature des minéraux argileux dépend à la fois de la composition de la roche mère et du milieu de dépôt, c'est-à-dire du faciès de l'évolution géochimique et du cadre paléogéographique d'un bassin sédimentaire.

Les argiles héritées du continent nourricier parviennent au bassin de sédimentation dans des états de dégradations variables; elles peuvent s'y reconstituer plus ou moins complètement (« agradation ») ou subir, au contraire, des modifications plus profondes conduisant à une minéralogie neuve n'ayant plus que des attaches lointaines, ou même nulles, avec les minéraux parentaux (« néoformation »). Lors de l'évolution de la matière argileuse, la diagenèse peut parfaire les caractéristiques nouvellement acquises des minéraux ou au contraire, masquer celles datant de la phase sédimentaire.

Ainsi une esquisse de l'évolution d'un bassin sous l'optique de la minéralogie des argiles doit s'accompagner de l'analyse des caractères pétrographiques des échantillons et, dans la mesure du possible, de leurs relations avec les régions voisines.

Les recherches minéralogiques poursuivies pour le Permo-Trias de Campine comportent trois volets :

1. *analyse des constituants minéralogiques* de roches détritiques et carbonatées;
2. *analyse des minéraux denses* du Buntsandstein et de leur répartition verticale;
3. *étude de la fraction argileuse* du Permo-Trias. Leur nature, leur répartition verticale et leur origine sont successivement examinées.

## II. SITUATION GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE

Parmi les nombreux sondages entrepris, au début du siècle, en Campine, pour la recherche et l'exploitation du charbon, quelques-uns ont recoupé, entre le Houiller et le Crétacé, des roches appartenant au Permien et au Trias (STAINIER, 1903).

Reconnus en Europe comme réservoir de sels, ces terrains intéressèrent alors l'industrie chimique belge et la Société SOLVAY entreprit dans ce but une campagne de sondages dont il ne reste que des descriptions plus ou moins précises (STAINIER, 1911 et 1943; FORIR, HABETS et LOHEST, 1903), et des collections d'échantillons parfois fort sommaires.

Plus tard, un autre sondage à Bullen (Meeuwen — n° 121) décrit par GULINCK (1953) fut effectué pour les charbonnages « Les Liégeois » de Zwartberg.

Monsieur DELMER, Directeur du Service Géologique de Belgique, a donné, avec une générosité qu'on ne saurait trop louer, tout ce qu'il possédait encore des sondages d'Eelen, Helchteren, Rotem, Neeroeteren et Bullen. Ces cinq localités se trouvent dans le Nord-Est du Limbourg (entre Hasselt et Maaseik) (fig. 1).

Il nous a paru inutile de reprendre les descriptions de STAINIER (1943) et du GULINCK (1953) et de faire figurer, dans les diagrammes, toutes les lithologies. Nous renvoyons à l'annexe pour l'essentiel des coupes de sondages étudiés, et aux auteurs précités pour la description lithologique détaillée.

Au Permien inférieur, le Nord de la Belgique appartient au domaine continental. L'érosion à laquelle il est soumis n'est guère de longue durée : le Zechstein inférieur repose partout sur le Westphalien et inaugure le Trias dont le bassin sédimentaire recouvre l'Allemagne du Nord, la Hollande, la Mer du Nord et les Midlands anglais (ANTUN, 1953).

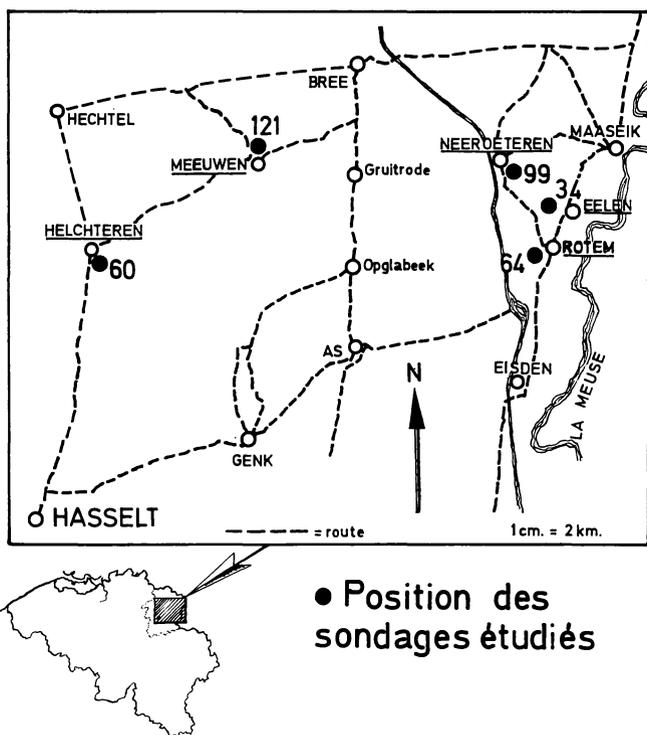


Fig. 1. — Situation géographique des sondages étudiés.

Le Permien, épais de 25 m, est mal représenté en Campine : il correspond au Zechstein inférieur de la Basse-Rhénanie (STAINIER, 1943).

Après le Zechstein inférieur, STAINIER (1943) admet seulement l'existence de l'assise moyenne de Buntsandstein. Par son caractère grossier, cette assise marque la reprise active du morcellement de l'ancienne chaîne varisque dont certains massifs se surélèvent tandis que d'autres s'affaissent.

Il résulte une différenciation faciétale entre les dépôts sédimentaires situés à l'intérieur et à l'extérieur de la chaîne. Le Trias de Campine appartient à cette dernière unité.

Le Buntsandstein moyen épais de 400 m est formé par des alternances uniformes de grès feldspathiques, rouges ou blancs, généralement grenus, avec joints de stratification recouverts de micas frais et avec intercalations plus pélitiques.

L'assise supérieure se caractérise, sur 125 m, par des psammites et des psammoschistes à ciment carbonaté avec des passées de marnes et de calcaires marneux, riches en anhydrite.

Le Muschelkalk, entièrement recoupé à Neeroeteren sur 85 m, montre d'avantage des sédiments calcaro-dolomitiques, des schistes et quelques psammites pauvres en fossiles, le tout chargé d'anhydrite et de gypse.

Les conditions lagunaires se poursuivent au cours du Keuper, puissant de 86 m, avec ses argiles et ses marnes rouges ou vertes à gypse et anhydrite.

La situation stratigraphique des cinq sondages est donnée dans la figure 2.

Les tronçons examinés sont figurés en noir. Les tronçons blancs représentent des niveaux dépourvus d'échantillons.

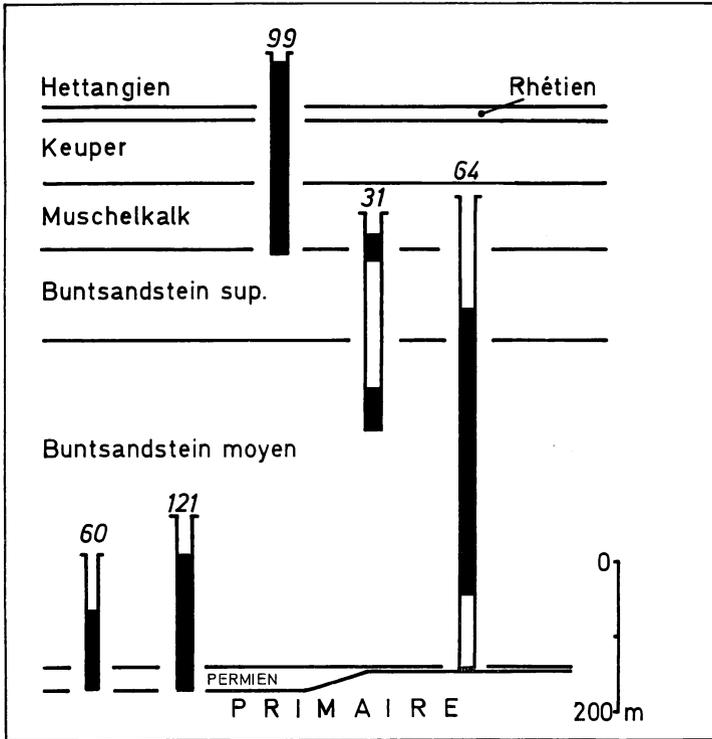


Fig. 2. — Position stratigraphique des sondages.  
(LEGRAND, 1962)

### III. PÉTROGRAPHIE

#### I. LES PRINCIPAUX TYPES PÉTROGRAPHIQUES

L'examen pétrographique préliminaire porte essentiellement sur les échantillons dont fut extraite la fraction argileuse et les minéraux denses.

Certaines descriptions lithologiques antérieures furent ainsi précisées. Dans la description de ces sondages, les différents auteurs (STAINIER, 1911 et 1943; HABETS, LOHEST et FORIER, 1903) se sont en effet contentés d'une terminologie assez vague et générale, souvent démentie par l'étude microscopique.

La gamme des roches analysées s'étend des types détritiques aux carbonates francs, constituant ainsi les deux pôles d'une série de lithotypes entre lesquels prennent place des roches intermédiaires détrito-carbonatées.

La classification adoptée dans la description des lithotypes détritiques est celle de P. MICHOT (1958) complétée par celle de J. THOREZ (1969) pour les lithotypes détrito-carbonatés. Les lithotypes carbonatés ont été définis en reprenant la classification proposée par H. PIRLET (1965).

La majorité des roches du Permo-Trias montre une structure réticulée dans laquelle le liant argileux tend à se répartir plus ou moins uniformément entre les corpuscules détritiques dont la granularité définit les classes des *grès*, des *psammites* et des *micropsammites*.

La plupart des grès triasiques examinés sont micropoudinguiiformes, c'est-à-dire hétérogènes et inéqui-granulaires. Le contenu élevé en feldspaths en fait des *grès feldspathifères* à *feldspathiques*. Par le contenu en débris de « schiste » et par la présence de carbonate, ce sont également des *grès subgrauwackoïdes calcareux*.

La proportion de carbonate intervenant dans le réseau peut excéder 25 % et atteindre près de 60 %. De telles roches sont alors qualifiées de grès ou de psammites à ciment calcitique ou dolomitique. Du gypse, associé au liant carbonaté, peut prendre une structure poecilitique interstitielle ou poikilitique.

La structure quartzitique franche, fréquemment représentée dans les galets roulés des poudingues, ne se rencontre que dans des roches arénacées de granularité inférieure à 250 microns : ce sont des *psammoquartzites* (\*) souvent hétérogranulaires. Les corpuscules de quartz et de feldspath sont entourés d'une couronne de néoformation, optiquement orientée sur les nucléus plus ou moins roulés et troubles. Cette couronne d'accroissement est parfois incomplète; les pores restés libres sont alors comblés par de la calcite ou de la dolomite assez pure, en plages xénomorphes. Le caractère nettement carbonaté de certains sédiments définit ainsi la classe des *psammoquartzites calcitiques* ou *dolomitiques*.

En outre, ces roches peuvent se charger de 10 à 15 % de galets de pélitoschiste : ce sont alors des *psammoquartzites subgrauwackoïdes*.

Par leur structure empâtée, d'autres roches encore entrent dans la classe des *psammoschistes* ou *micropsammoschistes*. La dolomite (poikilitique) à laquelle s'associe le gypse peut remplacer la matrice pélitique : la roche est dite un *dolpsammoschiste* (J. Thorez, 1969).

Les *pélitoschistes* interviennent dans certaines roches sous forme de microgalets ou de fines laies pratiquement constituées d'argile cryptogrenue à peine sertie de quelques menus grains détritiques et de quelques plages amoéboïdes de carbonates.

Seuls les types carbonatés à structure empâtée ont été reconnus. La matrice qui isole les corpuscules détritiques est entièrement recristallisée, ceci constitue un obstacle à la définition précise de certains types dans lesquels la part prise par les corpuscules organiques atteint plus de 30 %; la distinction entre ciment et matrice est également rendue difficile à la suite de la recristallisation. Ces roches sont définies comme des *cryptosomatites* ou *cryptites corpusculaires*, souvent quartzifères et faiblement feldspathifères. Une proportion en éléments détritiques comprise entre 5 et 10 % se retrouve constamment dans la masse calcitique.

Le sédiment carbonaté peut, en outre, être constitué de petites plages sub-rhomboédriques de dolomite, à dimension pélitomorphe remarquable (10 à 25 microns). Ce sont des *dolcryptites* quelquefois *pélitifères* (J. THOREZ, 1965).

Les dolomies interviennent fréquemment dans la série lithologique dès le Buntsandstein supérieur de Campine (sensu STAINIER, 1943). A défaut de contrôle pétrographique, cet auteur les a parfois qualifié de schiste calcareux compact.

Par la finesse du grain et par leur homogénéité granulaire, par l'absence de restes organiques, ces dolomies peuvent être rapportés à des *sédiments de précipitation physico-chimique*. Leurs caractères microscopiques sont analogues aux dolomies d'origine évaporitique décrites par J. THOREZ (1969) dans le Famennien supérieur.

(\*) Le préfixe psammo- désignant une granularité comprise entre 60 et 250 microns (P. MICHOT, 1958).

## 2. ANALYSE DES COMPOSANTS MINÉRALOGIQUES

Les principaux constituants minéralogiques des roches du Permo-Trias de Campine, par ordre d'importance, sont les suivants :

1. *Les éléments quartziques* ;

- a. microgalets de quartz monocristallin à extinction franche ou onduleuse;
- b. galets de *silexite* constitués d'un agrégat de plages de quartz à morphoscopie quelconque, enchevêtrées les unes dans les autres, à contours plus ou moins crénelés et à extinction onduleuse;
- c. galets de *microquartzite*, à grains de quartz, à contour net et même arrondi, contrastant par là avec le contour crénelé des grains de quartz des *silexites*;
- d. galets de *métasilexite* à texture rubanée, constituée d'agrégats de petites plages allongées et parallèles, au contour finement sinueux; la texture schisteuse y est nettement exprimée.

Des inclusions, parfois fibroradiées, de *rutile*, des microcristaux hypidiomorphes de *tourmaline verte* ou des vermicules de *chlorite* sont parfois inclus dans les grains de quartz monocristallin.

2. *Les carbonates* ;

Une coloration sélective à l'Alizarine Red S a permis de distinguer en lame mince la calcite de la dolomite.

La *calcite* revêt différentes formes :

- a. ciment intergranulaire sous forme de petites plages monocristallines à structure poecilitique interstitielle;
- b. plages cryptogrenues recristallisées se disposant suivant une structure fibroradiaire (structure géopétale).

La *dolomite* montre également des plages variées :

- a. rhomboédriques et idiomorphes, hyalines dans le ciment de gypse, d'anhydrite ou de calcite;
- b. rhomboédriques à subrhomboédriques, de granularité extrêmement fine (10 à 25 microns), moulées les unes aux autres, localement séparées par de la calcite résiduelle;
- c. xénomorphiques, à structure amoéboïde; poecilitique interstitielle et poikilitique conduisant à des monocristaux de grande taille (0.5 à 0.7 mm) dans lesquels baignent les éléments détritiques fins;
- d. sous forme de « nuages » cryptogrenus ou de « pelotes » (oolithes dolomitisées) particulièrement dans les niveaux d'anhydrite;
- e. sous forme de cailloux constitués de dolomie cryptogrenue (*dolcryptites*), souvent impressionnés par les éléments détritiques.

3. *Les feldspaths* ;

Les feldspaths sont remarquables par leur fréquence, mais surtout par leur variété et leur état de fraîcheur. Le *plagioclase* est le plus abondant : c'est de l'albite ou de l'oligoclase (avec plus ou moins 10 % en anorthite, au maximum 20 %). Les *feldspaths potassiques* sont également représentés par du microcline et de l'orthose. Des feldspaths à structure de démixtion ont également été reconnus : ce sont des

*mésoperthites*, parfois des antiperthites, mais leur fréquence ne dépasse pas 3 à 4 grains, par lame mince.

#### 4. *Les sulfates* ;

Les sulfates sont représentés par du gypse, de l'anhydrite et de la barytine.

Fréquent dans les différents lithotypes, le *gypse* présente deux textures caractéristiques :

- a. chagrinée avec des plages à structure poecilitique interstitielle et même poikilitique ;
- b. fibreuse dans les veinules.

Le gypse se rencontre aussi sous forme de plages plus grandes, relativement hyalines.

L'*anhydrite* accompagne la dolomite et le gypse. Dans les dolocryptites, ce minéral se présente sous forme de « mouches » (RICOUR, 1962) dont le contour est profondément entamé par la dolomite. Dans le gypse, l'anhydrite apparaît le plus souvent sous forme de petits cristaux idiomorphes.

Certains niveaux d'anhydrite signalés par STAINIER (1943) sont constitués de cristaux aciculaires, à texture rayonnante (gerbes), aux aiguilles imbriquées les unes dans les autres et présentant un contour parfaitement crénelé. Des cristaux de quartz à contour hexagonal sont parfois isolés dans certains acicules.

La *barytine* est hypidiomorphe ou se présente sous forme de petites gerbes ; elle participe au ciment des microconglomérats et au liant des grès. Elle est rarement en petits cristaux idiomorphes dans les plages hyalines de gypse.

#### 5. *Les phyllites* visibles au microscope :

La *muscovite* en grandes paillettes (0.4-1 mm) ou en très fines paillettes (séricite) a conservé une fraîcheur remarquable.

La *biotite* est relativement bien conservée mais peut montrer divers stades d'altération : son pléochroïsme subsiste, mais les teintes tirent davantage sur le vert (Ng : vert foncé à vert bouteille ; Np : brun verdâtre à vert pâle).

La *chlorite* détritique (pennine et clinochlore) peut être fréquente ; ses dimensions sont plus fines que celles de la muscovite ou de la biotite.

Certaines roches détritiques, principalement des grès, contiennent de la *kaolinite* sous forme de petits nids de cristaux associés au ciment (liant) de la roche. Elle forme de petits vermicules, agglomérés dans les espaces intergranulaires.

#### 6. *Autres minéraux* ;

Les roches conglomératiques et certains grès contiennent des (micro) galets de phtanite ou de chlorite sous forme de pâte sertie de quelques grains de quartz.

D'autres, plus clairs, montrent, dans une matrice de silice cryptogrenue, de petits « yeux » fibroradiés à pourtour finement piqué de noir (calcédoine).

L'*hématite*, dont les raies caractéristiques ont été reconnues aux R.X., est fréquente ; sous forme d'une couronne pelliculaire subcontinue, elle souligne la morphologie des grains de quartz. Elle participe parfois largement au ciment.

La *pyrite* se présente en petits cubes, notamment dans les roches carbonatées, ou à l'état de filonnets anastomosés dans certains grès.

Il faut encore citer quelques débris, assez rares, de phosphate et de végétaux.

### 3. ENSEIGNEMENT DE L'ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE PRÉLIMINAIRE

L'analyse pétrographique des structures de roches a apporté des compléments à la connaissance et à la caractérisation du Permo-Trias de Campine.

Quelques faits intéressants se dégagent à l'actif de cette étude :

- a. galets polycristallins quartziques abondants;
- b. carbonates et sulfates variés;
- c. feldspaths assez frais parmi lesquels des mésoperthites;
- d. micas frais;
- e. kaolinite vermiculaire;
- f. pigment rouge (hématite);
- g. types pétrographiques bien classés peu abondants et, l'existence d'éléments remaniés mise à part, la majorité des roches arénacées à contenu corpusculaire hétérogène, marqué par des écarts de granularité parfois considérables;
- h. milieu progressivement magnésien et à tendance évaporitique : à la base du Permo-Trias, à une puissante série de termes détritiques rouges se substitue lentement une autre série rouge à niveaux plus fins et plus pélitiques et à niveaux dolomitiques et d'anhydrite francs.

## IV. ÉTUDE DES MINÉRAUX DENSES

### 1. OBSERVATIONS ANTÉRIEURES

Parmi les abondants travaux sur le Trias, s'étendant du NW au NE de notre pays, on peut retenir les observations suivantes.

VALK (1943) insiste particulièrement sur la régression du nombre de grenats lorsqu'on va du Hélioland vers le Peel et le Limbourg. Sur la base de 58 comptages, il envisage deux grandes provinces :

- une *province septentrionale*, riche en grenat et s'étendant en Allemagne nord-occidentale;
- une *province méridionale*, pauvre en grenat, comprenant partiellement le Trias anglais, le Sud de la Hollande (avec le Peel et la Campine belge) et l'Allemagne occidentale jusqu'à Kassel.

Entre ces deux provinces, existerait une zone d'interdigitation. Des venues riches en grenat caractérisent certains niveaux du Trias de la Province méridionale. VALK cite 41 % de grenat dans le Grès Bigarré d'un sondage à Xanten et 20 % de grenat dans le Keuper de Neeroeteren.

Tandis que MULLER (1943) y voit un accident stratigraphique, VALK défend plutôt l'idée de variations interprovinciales; il interprète ces pourcentages variables comme le résultat de pénétrations de la province riche en grenat dans la province sud déficitaire.

En s'appuyant sur des directions d'épendage des sédiments à l'Est de la Hollande et l'Ouest de l'Allemagne, SINDOWSKI (1958) distingue au Buntsandstein inférieur, une province ardennaise et une province de Hollande septentrionale. Au Buntsandstein moyen intervient une province de l'Eifel. Ces trois provinces se retrouvent au Buntsandstein supérieur.

Par sa position géographique et son contenu en grenat, la province Hollande septentrionale se situe approximativement dans la zone d'interdigitation de VALK.

## 2. OBSERVATIONS NOUVELLES

Contrairement au sondage de Neeroeteren, les minéraux denses des sondages de Rotem, Bullen, Eelen et Helchteren n'ont jamais été étudiés. Les vingt-trois échantillons examinés donnent une coupe à travers le faciès gréseux du Buntsandstein moyen de Campine.

Les minéraux denses sont extraits de grès hétérogranulaires, riches en feldspaths et plus ou moins cimentés par les carbonates. Quelques échantillons se rapprochent des psammites.

Les roches ont été broyées et passées au tamis de 297 microns. La fraction inférieure a été soigneusement lavée sur un tamis de 50 microns; le refus, lavé plusieurs fois à l'acide chlorhydrique 6N chaud jusqu'à décoloration du sable et élimination du ciment ferrugineux et carbonaté parfois abondant. Le sable propre, relavé à l'eau, a été séché avant d'être mis en suspension dans le bromoforme (densité 2.85). Après lavage à l'éther éthylique, la fraction dense a été montée en lame dans du baume de Canada. Elle comprenait un nombre très variable de grains identifiables à côté d'une abondance, parfois remarquable, de minéraux opaques. Aucune distinction entre grains opaques et grains troubles n'a été faite, ces minéraux n'intervenant ni dans les comptages, ni dans l'établissement des rapports.

### A. Inventaire des minéraux denses.

#### ZIRCON = Z

Le zircon se présente en grains incolores, assez souvent rosés sous forme de globules isométriques, de prismes arrondis ou de plages idiomorphes à arêtes vives. Le zircon peut être zonaire ou aciculaire. Les inclusions y sont fréquentes.

#### RUTILE = R

Le rutile est jaune à rouge sang foncé, presque opaque. Il est prismatique ou en granules, bien arrondi et porte parfois des stries obliques par rapport à l'allongement. Sans être abondant, le rutile est fréquent.

#### TOURMALINE = T

Les variétés suivantes de tourmaline se rencontrent dans tous les échantillons :

Schorlite :  $n_g$  jaune-mauve clair —  $n_p$  brun verdâtre  
 $n_g$  incolore à jaune pâle —  $n_p$  vert foncé à vert bouteille  
 $n_g$  rose à rouge —  $n_p$  brun foncé bleuté

Indicolite ou Elbaïte :

$n_g$  bleu clair —  $n_p$  bleu foncé

La schorlite brun verdâtre prédomine tandis que l'elbaïte, en fragments peu roulés, est assez rare.

De taille variable (100 à 250 microns), les grains sont parfois roulés mais d'autres sont anguleux et présentent quelquefois le prisme initial.

#### GRENAT = G

Le grenat est incolore ou rosé. Il atteint parfois 200 microns. Il forme des éclats anguleux, faiblement arrondis. Les grains ont parfois un aspect rongé ou même une forme quelconque. Sa fréquence est variable; mais il est quelquefois très abondant dans le résidu lourd.

**BROOKITE = Br**

La brookite se présente souvent en grains, en menues tablettes sans forme cristallographique nette d'un jaune plus ou moins orangé.

**ANATASE = A**

En tablettes carrées ou rectangulaires bleutées, incolores ou jaunâtres, l'anatase existe aussi sous forme de prismes délicats épitaxiaux sur un minéral opaque, brun rouge en lumière analysée et condensée (ce minéral serait du leucoxène).

**ANDALOUSITE = An**

Toujours en grains roulés, l'andalousite est incolore et montre rarement un faible pléochroïsme. L'andalousite se rencontre sporadiquement.

**ZOISITE = Zo**

D'occurrence irrégulière, la zoïsité se présente en grains très bien roulés, de 100 à 125 microns.

**EPIDOTE = Ep**

Quelques grains roulés existent dans les échantillons, ils sont d'un jaune impur à vert sale avec une forte biréfringence.

**BARYTINE = Ba**

Localisée, la barytine apparaît cependant en abondance et constitue parfois la fraction la plus importante de la phase lourde. Elle consiste en fragments anguleux et en éclats délimités par les clivages.

**B. Répartition des minéraux denses.**

Ce ne sont pas les variations de composition entre les échantillons mais bien les variations globales dans l'ensemble de la colonne stratigraphique du Buntsandstein et leurs relations qui ont été recherchées. Tous les grains denses transparents ont été comptés, exception faite pour la barytine, l'anatase et la brookite. Les valeurs obtenues ont été établies sur un total de 100 grains. La distribution qualitative et la composition minéralogique quantitative de chaque échantillon, replacées dans la colonne générale du Trias de Campine sont présentées dans le tableau I.

Les origines des variations sont multiples et bien connues des auteurs (VALK, 1943 et SINDOWSKI, 1949 et 1956).

Ce sont les erreurs imputables à l'échantillonnage, à la méthode analytique. Les variations granulométriques et les vicissitudes subies par les minéraux lors de l'altération et de leur transport interviennent également.

L'analyse des minéraux denses de Campine conduit à l'établissement des diagrammes de la figure 3 lesquels permettent de préciser l'évolution de leur association.

Les pourcentages en tourmaline, zircon, rutile et grenat ont été traduits en diagrammes.

La courbe du grenat (colonne IV) montre deux poussées. Un premier maximum, très faible, apparaît vers la base du profil. Le second, très net, se marque notamment à Rotem, avec une teneur de 61 %.

La teneur fluctue ensuite entre 31 et 8 % jusqu'au sommet du Buntsandstein moyen.

Il est important de remarquer que la répartition du grenat est indépendante du faciès et que la teneur élevée en grenats caractérise des roches où le nombre de grains de mésoperthites n'est pas négligeable (4 à 5 grains par lame mince).

TABLEAU I

*Composition minéralogique quantitative des échantillons du Buntsandstein moyen de Campine*

Échantillon	Z	R	T	G	And.	Zo.	Ep.	An.	Br	Ba
Ro 744	23	11	52	14				+	+	+
Ee 780	29	6	56	19				+		+
Ee 789	16	16	60	8					+	
Ro 789	26	10	33	31						
Ee 820	14	3	55	20	8			+	+	
Ro 799	4	8	27	61					+	
Ro 804	51	9	19	7	9	2	2		+	
Ro 860	35	11	35		15	4			+	
Ro 877	32	3	61	3		1		+		
Ro 904	76	5	19	+				+	+	
Ro 946	29	7	63	1					+	
Bu 713.95	43	7	49	1			+	+	+	
Ro 990	79	10	10	1					+	
Bu 765	59	9	32					+	+	
Bu 802.40	57	4	38	1				+		
Bu 813	68	10	22		+		+	+	+	
Bu 814.70	45	10	45					+	+	
Ro 1070	27	23	43		7				+	
Bu 832	54	16	22	8						+
Bu 862.50	43	13	43	1					+	
He 820	30	10	59	1				+	+	
Ro 1143	23	7	67		2		1	+		
He 848	37	8	52	2	1					

Z = zircon  
R = rutile  
T = tourmaline

G = grenat  
And. = andalousite  
Zo. = zoïsite

Ep. = épidote  
An. = anatase  
Br. = brookite  
Ba. = barytine

Ro = Rotem

Ee = Eelen

Bu = Bullen

He = Helchteren

La variation de la proportion de tourmaline roulée par rapport au pourcentage global de tourmaline (colonne VI) donne une courbe assez remarquable. Alors que la teneur en rutile croît lentement et que la courbe du grenat passe par son premier maximum, le pourcentage en tourmaline roulée fluctue. Ensuite, la courbe est plus continue quoique d'allure faiblement croissante. Vers le sommet, ce rapport décroît assez vite tout en oscillant faiblement, alors que le rutile redevient plus fréquent et que le grenat constitue, une part sensible de la phase lourde.

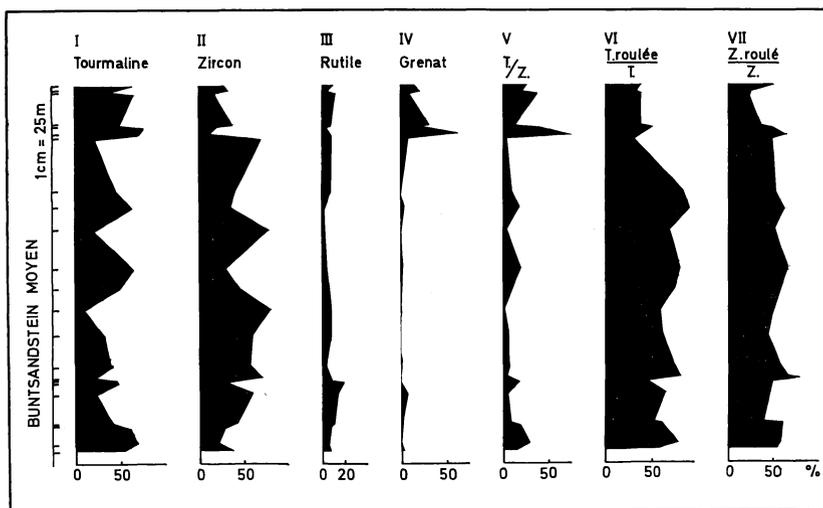


Fig. 3. — Variations de fréquence relative des minéraux denses dans le Buntsandstein moyen de Campine.

## V. ÉTUDE DE LA FRACTION ARGILEUSE

### I. MÉTHODES

La diffractométrie X est la technique la mieux appropriée pour identifier les minéraux argileux. Elle a été appliquée principalement aux agrégats orientés et, accessoirement aux poudres désorientées.

*Diffracton sur agrégats orientés* (fraction inférieure à 2 microns).

La fraction inférieure à 2 microns a été extraite des matériaux bruts suivant la chaîne de préparation : broyage, mise en suspension dans l'eau distillée, séparation granulométrique par sédimentation et centrifugation.

Les échantillons calcareux ou dolomitiques ont été préalablement décarbonatés par attaque à l'acide HCl 0.1 N à froid. Le gypse a été éliminé par lavages répétés à l'eau distillée bouillante.

La solution défloculée contenant la fraction inférieure à 2 microns a été mise à sécher sur lame de verre à la température ambiante du laboratoire ce qui permet l'obtention d'agrégats orientés (ool).

Après séchage, la lame est transférée dans une enceinte à atmosphère à 45 % HR avant de subir certains tests supplémentaires. Chaque échantillon a été passé au naturel (N), après traitement à l'éthylène glycol (G) et après chauffage à 490° C (2 heures) (Q).

L'appareil utilisé est un diffractomètre Philips équipé d'un spectrogoniomètre grand angle. Le tube générateur de rayons X est un tube scellé à anticathode de Cu et à filtre Ni.

Constantes de travail :

- générateur : tension 38 kV; intensité 18 mA;
- spectrogoniomètre : jeu de fentes : 1°; 0.1 mm; 1°;
- vitesse de rotation : 2°20/min.;

- enregistrement : taux d'intensité (RM)2; sensibilité 10;  
constance de temps : 2;
- déroulement du papier :  $20 \times 40$  mm/h.

## 2. ANALYSE DES MINÉRAUX ARGILEUX

L'identification d'un minéral ou d'un assemblage de minéraux argileux est fournie par l'interprétation des diffractogrammes N, G et Q des agrégats orientés où seules apparaissent les réflexions de la série (ool). Les principaux minéraux argileux sont ainsi caractérisés par une séquence d'harmoniques (ool). En général, la réflexion (001) au naturel peut déjà indiquer la nature du minéral. Cependant, sa composition exacte, éventuellement, son degré de cristallinité sont donnés par l'étude de la séquence complète et par l'étalement et l'intensité de certains harmoniques.

Le comportement au glycol et au chauffage des minéraux argileux simples permet de les différencier entre eux sur la base des modifications intervenant dans le réseau. Ces modifications se traduisent d'une manière caractéristique pour chacun d'eux et sont résumées dans le tableau II.

Pour certains minéraux, tels ceux du groupe des kandites, un diffractogramme de poudre permet de caractériser le degré d'ordre et de désordre.

### a. Les minéraux simples ;

#### La Kaolinite.

Le degré de cristallinité des minéraux du groupe de la kaolinite varie depuis celui de la kaolinite sensu stricto jusqu'à celui de l'halloysite.

L'étude par diffractométrie X d'un minéral de ce groupe en agrégats orientés ne permet pas d'apprécier le degré d'ordre ou de désordre cristallin. Si l'appréciation du degré de cristallinité peut être approchée en fonction de l'intensité et de l'étalement des réflexions (001) à 7.1 Å et (002) à 3.57 Å, ce critère n'est cependant pas suffisant et l'étude du minéral doit être menée sur poudre.

En accord avec les résultats de G. W. BRINDLEY (1951), le désordre de la kaolinite se traduit sur diagramme de poudre, par la substitution, à des triplets caractéristiques entre  $16^{\circ}20-22^{\circ}20$  et  $34^{\circ}20-40^{\circ}20$ , de bandes de diffraction.

Il n'existe pas de critères distinctifs pour les degrés de cristallinité. H. H. MURRAY et S. C. LYONS (1956) ont proposé une échelle : par comparaison entre les allures des diagrammes successifs de ce classement et le profil (*hkl*) d'une kaolinite de Campine, la kaolinite He 888 correspond au type E-C de MURRAY, c'est-à-dire à une kaolinite moyennement cristallisée.

#### Les Illites.

L'illite possède ses réflexions harmoniques (001) à 10 Å, (002) à 3 Å et (003) à 3.3 Å que n'affectent ni le traitement à l'éthylène glycol, ni le chauffage (490° C).

Par rapport à la muscovite, les illites présentent un degré de cristallinité moindre, ceci se traduit sur diffractogramme d'agrégats orientés par un élargissement à la base des réflexions (001). En effet, dans l'illite, un déficit d'Al tétraédrique par rapport à la muscovite entraîne un déficit en K<sub>2</sub>O et, suivant le degré de dégradation, l'intervention dans le réseau de molécules d'eau (J. LUCAS, 1963).

Cet auteur a introduit les critères de distinction dans les illites détritiques depuis des illites intactes (illites « fermées » ou I<sub>f</sub>) jusqu'aux illites ouvertes.

TABLEAU II

Valeur en Å des raies caractéristiques  
des minéraux argileux simples après différents traitements  
(LUCAS, 1963)

Kaolinite	N	7.1				3.58	2.33
	G	7.1				3.58	2.33
	Q	Disparition des raies après 2 heures de chauffe.					
Illite	N	10		5		3.33	2.50
	G	10		5		3.33	2.50
	Q	10		5		3.33	2.50
Montmorillonite	N	15-14		5.1		3.05	
	G	17	8.5	5.7	4.2	3.4	
	Q	10		5			
Chlorite	N	14	7-7.2	4.7	3.5	2.83	
	G	14	7-7.2	4.7	3.5	2.83	
	Q	14	—	4.7	—	2.83	
Chlorite gonflante	N	14	7-7.2	4.7	3.5		
	G	17	8.85	(5.85)			
	Q	14	—	4.7	—		
Vermiculite	N	14	7				
	G	14					
	Q	10					

Il reconnaît les types d'illites ouvertes :

- I<sub>V</sub> : Une asymétrie subsiste du côté des petits angles au traitement au glycol mais disparaît au chauffage : la réflexion (001) devient étroite et symétrique. Il y a là une analogie avec le comportement de la vermiculite (voir tableau II) : (10 Å, N; 14 Å, G; 10 Å, Q).
- I<sub>C</sub> : L'asymétrie du côté des petits angles de la réflexion (001) subsiste après chauffage. Il y a là une analogie avec le comportement de la chlorite.
- I<sub>M</sub> : L'asymétrie de la réflexion à 10 Å s'intensifie au glycol et disparaît au chauffage. Certains feuillets gonflent donc au glycol et s'écrasent à 10 Å comme le fait la montmorillonite.

Dans les phases argileuses analysées, à côté d'illite fermée, il n'existe que de rares cas d'illites typiquement ouvertes au sens où l'entend J. LUCAS (1963). Ce sont davantage des illites à pic large mais dont les modifications de l'allure des réflexions aux divers traitements (G et Q) les rapprochent des types I<sub>V</sub>, I<sub>C</sub> et I<sub>M</sub>. Ces types d'illites à pic large sont désignées par les symboles I<sub>αV</sub>, I<sub>αC</sub>, I<sub>αM</sub>.

La variation verticale et la nature de l'illite n'étant pas toujours aisée à mettre en évidence, nous avons tenté de compléter l'analyse en mesurant la largeur du pic à 10 Å de l'illite, à la moitié de sa hauteur (KUBLER, 1966).

LUCAS (1968) utilise ce rapport aisé à calculer pour distinguer les divers illites :  
 illites à pic aigu ( $l = 3$  mm)  
 illites à pic large ( $l = 6$  mm)  
 illites ouvertes ( $l =$  ou  $> 10$  mm).

Les valeurs des mesures faites sur chaque diffractogramme montrent, en plus des illites à pic aigu, une prédominance nette des illites à pic large.

GRIM (1953) a tenté de lier les variations de l'intensité des réflexions (001) des illites à leur composition chimique. Il distingue deux pôles de variations pour les micas dioctaédriques :

1. le type alumineux pur où les intensités des réflexions (001) et (002) sont du même ordre de grandeur;
2. le type ferrifère pur où l'intensité de la réflexion (002) est très faible par rapport à celle de la réflexion principale.

A la suite de KLINGEBIEL et LATOUCHE (1962), une nouvelle distinction des illites a été faite : si le rapport des intensités des réflexions (001) et (002), mesuré sur le diffractogramme de l'échantillon glycolé est inférieur à 3, l'illite est alumineuse, sinon l'illite est considérée comme ferreuse.

Le succès de cette distinction est discutable pour le Trias de Campine car les résultats obtenus varient souvent entre 2.3 et 3.7.

Enfin, la réflexion (060) obtenue sur diffractogramme de poudre montre qu'il s'agit d'illites dioctaédriques. L'examen du profil ( $hkl$ ) complet dénote la présence d'un mélange d'illites des types 1M et 2M<sub>1</sub>, ce dernier prédominant. (SMITH & YODER, 1956-58 et MACKENZIE, 1956-58).

#### La Montmorillonite.

La montmorillonite est faiblement cristallisée ce que dénote l'absence ou la faible singularisation des réflexions harmoniques (002) et (003) après traitement au glycol. Si la réflexion (003) se présente sous la forme d'une bosse ou d'une réflexion étale et peu intense vers 5.5 Å, l'harmonique (002) à 8.8 Å n'apparaît pas sur les diffractogrammes glycolés.

#### La Chlorite.

La présence de chlorite est établie par la réflexion (001) à 14 Å, stable aux différents traitements, mais surtout par la réflexion (003) à 4.7 Å au naturel.

Dans le cas de mélange chlorite-kaolinite, les réflexions (001) de la kaolinite à 7.1 Å et à 3.57 Å (002) viennent se superposer aux réflexions d'ordre pair à 7 Å (002) et à 3.53 Å (004) de la chlorite. Pour vérifier le mélange éventuel de la kaolinite et de la chlorite, on a traditionnellement recours à deux tests supplémentaires, ceux-ci n'ont en fait qu'une valeur relative car ils sont fonction de l'état de cristallinité des deux minéraux.

En effet, si dans le mélange chlorite-kaolinite, les deux minéraux sont bien cristallisés, une attaque HCl 2N à chaud, détruit la seule chlorite. D'autre part, et pour autant que les proportions relatives soient sensiblement égales, un doublet 3.53-3.57 Å rend compte de la présence simultanée des deux minéraux.

#### b. Les minéraux et édifices interstratifiés.

— Les minéraux interstratifiés réguliers : la **Corrensite**.

Ce minéral est fondé sur l'alternance régulière de feuilletts élémentaires à 14 Å;

les uns sont des feuillets chloritiques ( $14_C$ ) et les autres, des feuillets montmorillonitiques ( $14_M$ ); la formule représentative schématique est ( $14_C$ - $14_M$ ) pour reprendre la nomenclature de J. LUCAS (1963).

Le tableau III donne les équidistances observées sur les diagrammes obtenus à partir d'une corrensite (sondage de Laveron, J. LUCAS, 1963) et les équidistances observées pour une corrensite du sondage de Rotem.

TABLEAU III  
Distances réticulaires en Å

Indices	N		G		Q	
	Laveron	Rotem	Laveron	Rotem	Laveron	Rotem
(001)	28.5	29	31.5	32	24	?
(002)	14.2	14.3	15.5	15.5	12	12
(003)	9.5	10	9.9	10	8	8
(004)	7.1	6.9	7.8	7.7		
(005)	—	—	6.3	—		
(006)	4.73	4.69	5.2	5.15		
(007)	4.1	—	4.5	4.48		
(008)	3.55	3.5	—	—		
(009)	3.18	—	3.45	3.40		

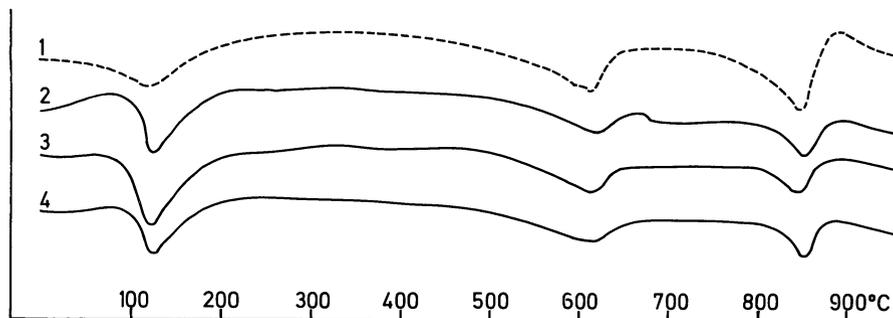


Fig. 4. — Courbes d'analyse thermique différentielle de la corrensite.

1. D'après LIPPMANN (1956)
2. Neeroeteren n° 76 : I = 4; C = 1; corrensite = 5
3. Neeroeteren n° 47 : I = 3; C = 2; corrensite = 5
4. Neeroeteren n° 60 : I = 3; C = 2; corrensite = 5

L'analyse thermique différentielle de trois échantillons à forte proportion de corrensite présente la série de pics caractéristiques.

Un pic endothermique de forte amplitude vers 125° C; entre 510° et 620°, une inflexion endothermique asymétrique avec un pic à 630° C; un pic endothermique, aux environs de 850° C, plus étroit que celui à 630° C, immédiatement suivi par

une « bosse » exothermique à 880° C. Bien que les diagrammes obtenus ne montrent pas toujours des pics endothermiques d'amplitude nette et que souvent le pic exothermique se détache mal à 880° C, cet essai a permis de retrouver les caractéristiques thermiques de la corrensite déterminées par LIPPMANN (1956) (fig. 4).

— Les édifices interstratifiés irréguliers.

Suivant J. LUCAS (1963), les édifices interstratifiés irréguliers ne sont plus de véritables minéraux mais des édifices cristallins constitués de l'empilement désordonné de feuillets appartenant à deux (ou plusieurs) minéraux : illite, chlorite, montmorillonite et vermiculite.

Les réflexions résultantes ne conduisent plus à des effets de pointe résultant, comme dans les minéraux réguliers, de la composition et de l'interférence des réflexions de feuillets ayant le comportement d'illite, de chlorite, etc. (MERLING J., 1949). Les édifices interstratifiés se traduisent dès lors par des « bosses », des « plateaux », des asymétries plus ou moins prononcées de certaines réflexions. La forme et la position, surtout de la première réflexion (001) de l'édifice interstratifié après traitement (N, G, Q), renseignent assez aisément sur la qualité et la répartition des feuillets constitutifs.

La formation et la qualification des édifices interstratifiés irréguliers reconnus dans le Trias (et l'Hettangien) de la Campine sont basées sur les symboles proposés par J. LUCAS (1963), pour les feuillets à 14 Å, et ceux utilisés au laboratoire des argiles de Liège, pour les feuillets à 10 Å (J. THOREZ, 1967).

10 : feuillet à comportement illitique : stable au glycol et à la chaleur.

14<sub>C</sub> : feuillet à comportement chloritique : stable à la chaleur.

14<sub>G</sub> : feuillet à comportement de chlorite gonflante : stable à la chaleur, gonflant au glycol.

14<sub>M</sub> : feuillet à comportement montmorillonitique : gonflant au glycol et s'écrasant à 10 Å à la chaleur.

C : feuillet de chlorite véritable engagé dans l'édifice interstratifié.

M : feuillet de montmorillonite.

A l'aide de parenthèses et de traits d'union et en tenant compte du comportement des réflexions résultantes (002) et accessoirement (003) et (004) aux divers traitements (G, Q), les édifices interstratifiés irréguliers suivants ont été identifiés : (14<sub>C</sub>-14<sub>G</sub>); (14<sub>C</sub>-14<sub>M</sub>); C-(14<sub>C</sub>-14<sub>G</sub>); C-(14<sub>C</sub>-14<sub>M</sub>); C-(14<sub>C</sub>-14<sub>M</sub>)-M; 10-(10-14<sub>M</sub>).

Nous passerons en revue et détaillerons ces différents types d'édifices interstratifiés dans des exemples d'associations de minéraux argileux. Les plus courants et principaux types sont reproduits sous forme de diffractogrammes (N, G, Q). Chaque échantillon est qualifié et quantifié par une formule.

Les analyses diffractométriques portant à la fois sur le contenu qualitatif et semi-quantitatif relatif. Ce dernier critère est établi dans chaque phase argileuse en faisant appel aux considérations suivantes :

— dans le cas d'un mélange de kaolinite avec d'autres minéraux (illite, montmorillonite, interstratifiés à 10 ou à 14 Å), la réflexion (001) à 7 Å de la kaolinite est estimée avec une intensité trois fois supérieure à l'intensité (001) à 10 Å de l'illite, à 17 Å de la montmorillonite glycolée, à 14 Å de la réflexion (002) des interstratifiés. Une règle de trois rétablit la proportionnalité.

— la proportion relative d'interstratifiés, d'illite, de montmorillonite est mesurée en fonction des intensités de leurs réflexions principales (001) accessoirement (002) après traitement à l'éthylène glycol.

Les valeurs indiquées n'ont rien d'absolu mais permettent de se faire une idée sur l'intervention relative des constituants de la phase argileuse.

### 3. PRINCIPALES ASSOCIATIONS DES MINÉRAUX ARGILEUX

*Sondage de Rotem, 802 m. Buntsandstein moyen (fig. 5).*

N. Les trois réflexions étroites et intenses à 10 Å et 3.3 Å sont caractéristiques de l'illite.

G. Aucun changement.

Q. Aucune modification n'intervient si l'on excepte un très faible rétrécissement de la base de la réflexion (001) à 10 Å.

*Interprétation :* La roche ne contient que de l'illite fermée, notée  $I_f$ .

*Sondage de Bullen 794.40 m. Buntsandstein moyen (fig. 6).*

N. Le diffractogramme présente trois réflexions nettes et très intenses à 10 Å, 5 Å et 3.3 Å. Celle à 10 Å montre une légère asymétrie du côté des petits angles; sa base, large, se situe à 13.5 Å. La réflexion à 3.3 Å présente une légère asymétrie vers les grands angles.

G. L'allure des réflexions reste inchangée.

Q. Un affinement des réflexions à 10 Å et à 3.3 Å accompagne un rétrécissement considérable de la base de la réflexion à 10 Å.

*Interprétation :* On reconnaît les trois réflexions harmoniques de l'illite : (001) à 10 Å, (002) à 5 Å et (003) à 3.3 Å.

Les asymétries des réflexions dénotent le caractère légèrement ouvert de l'illite; cependant, celle-ci présente des espaces interfoliaires, caractérisés par une distance réticulaire supérieure à 10 Å, stables au glycol mais détruits après chauffage.

Ce type d'illite ouvert se rapproche, sans en être identique, à l'illite à comportement de vermiculite ( $I_V$ ) de LUCAS (1963). Nous le désignons donc ici par le symbole  $I_V$ .

Formule représentative :  $I_V = 10$

*Sondage d'Eelen, 871 m. Buntsandstein moyen (fig. 7).*

N. Le diagramme montre deux séries d'harmoniques. Trois réflexions très élevées apparaissent à 10 Å, 5 Å et 3.3 Å. La deuxième série comporte quatre réflexions d'intensité nettement plus faible : la première, très faible, située à 14 Å; une seconde, effilée, à 7 Å; une réflexion à 4.7 Å se marquant sous forme d'épaulement dans la descente de la réflexion à 5 Å; une quatrième réflexion à 3.50 Å.

G. Pas de changement notable, cependant la réflexion à 10 Å tend à s'affiner tandis que sa base devient plus large par suite d'une élévation sensible du bruit de fond.

Q. La réflexion à 10 Å est complètement nettoyée et sa base s'est rétrécie. La réflexion à 14 Å augmente légèrement d'intensité; la réflexion à 7 Å a considérablement diminué d'intensité; celle à 3.5 Å a disparu; la réflexion à 4.7 Å s'est tassée.

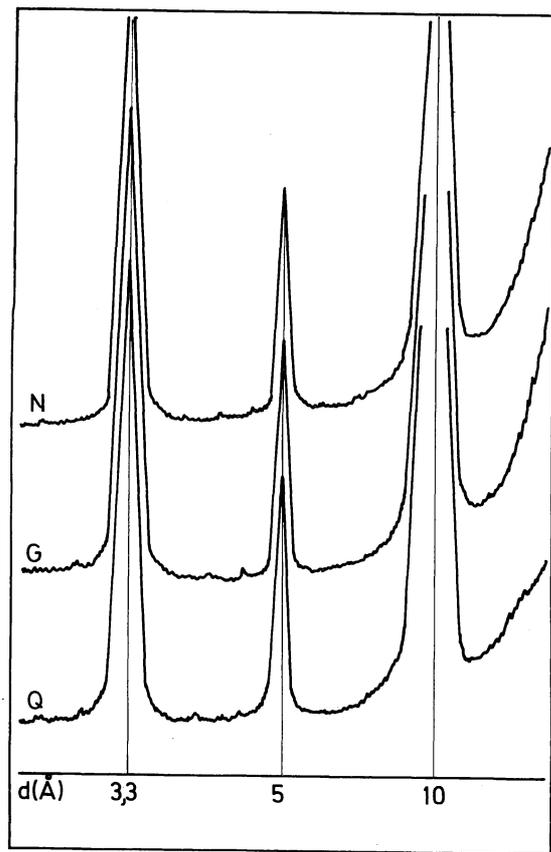


Fig. 5

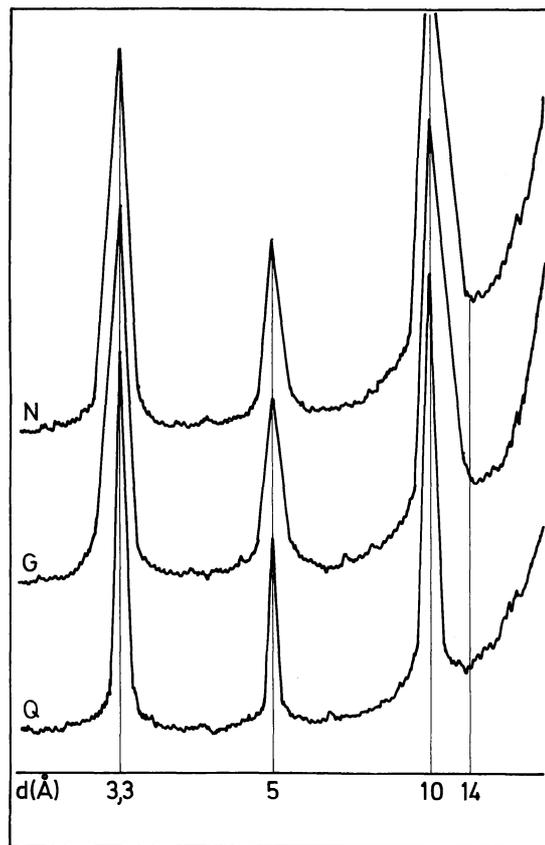


Fig. 6

*Interprétation* : Les réflexions à 14 Å, 7 Å, 4.7 Å et 3.5 Å appartiennent à la chlorite ferreuse (la qualité « ferreuse » de la chlorite est déduite de l'augmentation de l'intensité de la réflexion à 14 Å après chauffage). L'illite est légèrement ouverte; ses trois réflexions principales ont un pied assez large; la réflexion à 3.3 Å comme celle à 10 Å sont asymétriques respectivement du côté des grands angles et des petits angles. Les espaces interfoliaires de l'illite sont donc sensibles au traitement au glycol et à la chaleur. Ils tendent à se comporter comme ceux de la montmorillonite. Cette illite rappelle la variété  $I_M$  (J. LUCAS, 1963).

Formule représentative de l'échantillon :

$$I_M = 9; C = 1$$

*Sondage d'Helchteren, 888 m. Zechstein* (fig. 8).

- N. L'illite présente une réflexion à 10 Å intense et à pied large et asymétrique vers les petits angles dont la base se situe aux environs de 14 Å. Les réflexions à 5 Å et 3.3 Å sont plus faibles. Deux réflexions fines et très intenses apparaissent au plus à 7 et 3.5 Å.
- G. Une partie de la réflexion à 10 Å se nettoie et se dégage au-dessus d'une base large formant un plateau très incliné vers les petits angles. Les autres réflexions de l'illite restent inchangées.
- Q. La réflexion à 10 Å est complètement nettoyée et est devenue plus aiguë. Les réflexions à 7 Å et 3.5 Å ont disparu du diffractogramme.

*Interprétation* : Une partie des feuillets de l'ensemble à 10 Å est sensible au glycol et à la chaleur. Des espaces interfoliaires sont relâchés et se comportent comme ceux de la montmorillonite (gonflement au glycol, écrasement à la chaleur). L'autre partie est insensible aux traitements et est constituée de feuillets stables au glycol et à la chaleur comme ceux de l'illite typique. Suivant la nomenclature de J. LUCAS (1963), le mélange de feuillets à 10 Å stables et instables peut s'écrire  $I + I_M$ . Les deux autres réflexions sont celles d'un minéral détruit après le chauffage; leur forte intensité au N et au G et l'absence de réflexion à 14 Å et 4.7 Å conduisent à l'identification de la kaolinite.

Formule représentative :

$$I + I_M = 7; K = 3$$

*Sondage de Rotem, 757 m. Buntsandstein moyen* (sommet) (fig. 9).

- N. Le diagramme présente une série d'harmoniques intenses rapportés à l'illite. Mais la réflexion à 10 Å se dégage au-dessus d'une base très large et fortement ouverte vers les petits angles. Une réflexion à 7 Å très aiguë apparaît nettement. Un épaulement peu intense à 4.7 Å flanque la réflexion à 5 Å du côté des grands angles.
- G. Une réflexion intense se dégage à 17 Å. La réflexion à 14 Å s'individualise mieux tandis que celle à 10 Å présente encore son asymétrie mais a diminué d'intensité. Une « bosse » apparaît à 5.5 Å.
- Q. La réflexion à 14 Å se maintient et augmente d'intensité; les trois réflexions harmoniques de l'illite subsistent; la première, (001) à 10 Å, est complètement nettoyée.

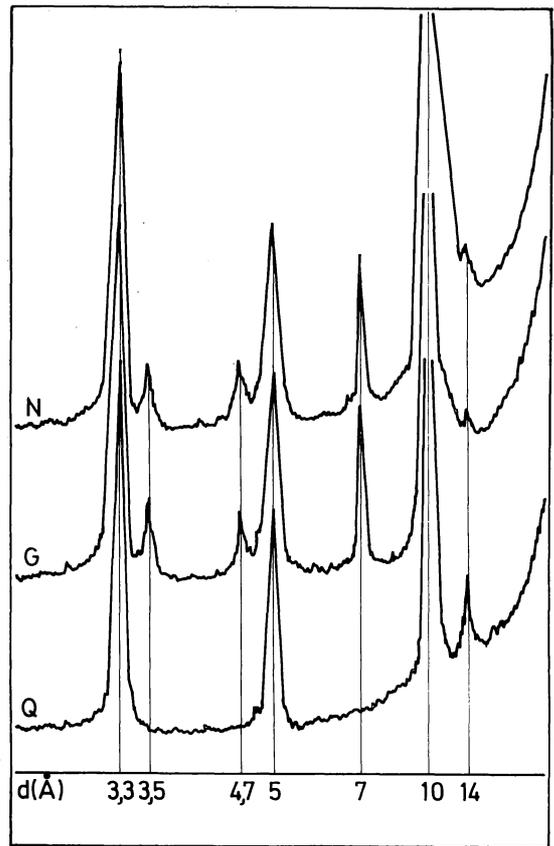


Fig. 7

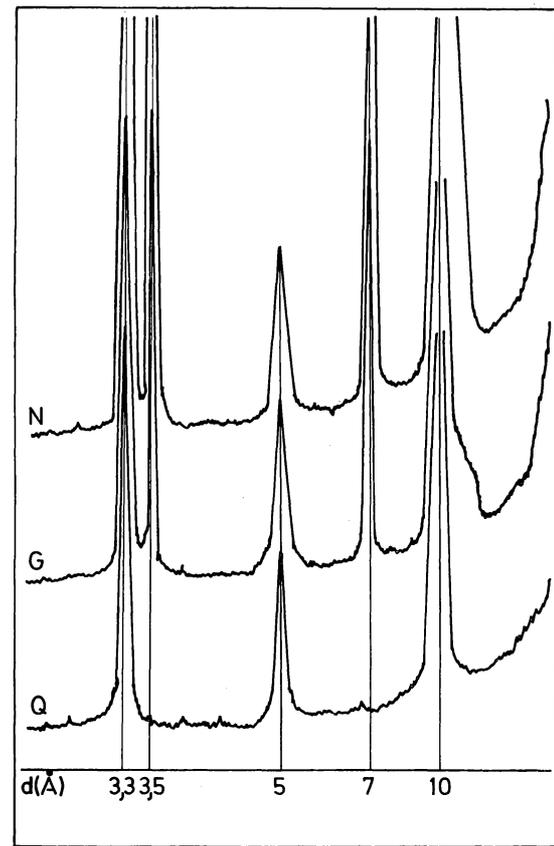


Fig. 8

*Interprétation* : La phase argileuse comprend une illite gonflante à tendance  $I_V$ . Après traitement au glycol, les réflexions à 17 Å et 5.5 Å sont caractéristiques de la montmorillonite. Les réflexions à 14 Å, 7 Å, 4.7 Å et 3.5 Å sont celles d'une chlorite ferrique. Un traitement supplémentaire à l'acide chlorhydrique 2N détruit cette chlorite en laissant subsister deux réflexions fines à 7 et 3.5 Å, caractéristiques de la kaolinite.

Formule représentative :

$$I_V = 6; M = 2; K = 1; C_{Fe} = 1$$

*Sondage d'Eelen, 620 m. Muschelkalk inférieur (fig. 10).*

- N. Une réflexion bien marquée et symétrique se situe à 14 Å et est suivie d'une réflexion plus intense à 10 Å mais à pied large. Les autres harmoniques de la réflexion à 14 Å sont plus ou moins étalés et faibles.
- G. Une partie de la réflexion à 14 Å migre vers 15.5 Å tandis qu'une bosse résiduelle faible se maintient vers 14 Å. La réflexion à 7 Å se tasse; une réflexion supplémentaire, mal ébauchée, la flanque à 7.7 Å. La réflexion à 5 Å tend à s'étaler et l'étroussure de la réflexion correspondante dans l'échantillon au naturel fait place à une réflexion moins bien ébauchée.
- Q. La réflexion à 14 Å acquiert une asymétrie vers les grands angles qu'accompagne un déplacement de 14 Å à 13.6 Å. Les autres harmoniques du complexe à 14 Å ont disparu du diffractogramme.

*Interprétation* : Le gonflement à 15.5 Å et la réflexion bifide à 14 Å obtenus à partir de la réflexion à 14 Å après traitement au glycol traduisent la présence de certains feuillettes à 14 Å gonflants, avec interstratification d'espaces interfoliaires stables au glycol et d'autres espaces interfoliaires instables.

Les uns présentent une stabilité à la chaleur, les autres une tendance à l'écrasement au chauffage. Les feuillettes stables se comportent comme ceux d'une chlorite gonflante. Cet édifice est noté (14<sub>C</sub>-14<sub>G</sub>) (LUCAS, 1963).

L'illite est ouverte mais difficilement qualifiable; elle est dénommée simplement  $I_0$ .

Formule représentative :

$$I_0 = 8; (14_C-14_G) = 2$$

*Sondage de Neeroeteren, 946 m, n° 104. Muschelkalk supérieur (fig. 11).*

- N. Le diffractogramme montre une réflexion intense à 10 Å, assez large, légèrement asymétrique vers les petits angles; une réflexion moins intense à base à 5 Å, une réflexion asymétrique vers les grands angles à 3.3 Å. Elles appartiennent à une illite ouverte. Les réflexions à 14 Å, 7 Å, 4.7 Å et 3.5 Å sont peu intenses et mal définies. Elles appartiennent à un minéral à tendance de chlorite. Il faut cependant noter la forte asymétrie, du côté des petits angles, de la réflexion à 7 Å.
- G. La réflexion à 14 Å fait place à un palier horizontal limité à 14 Å d'un côté et à 15.5 Å de l'autre. La réflexion à 10 Å de l'illite conserve la même allure.
- Q. La réflexion à 14 Å reprend la position qu'elle occupait au naturel. La réflexion à 10 Å reste inchangée.

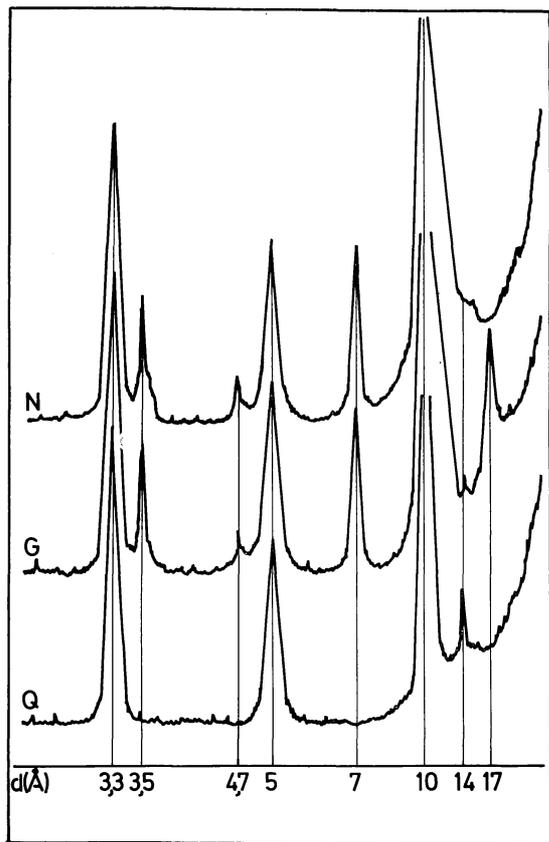


Fig. 9

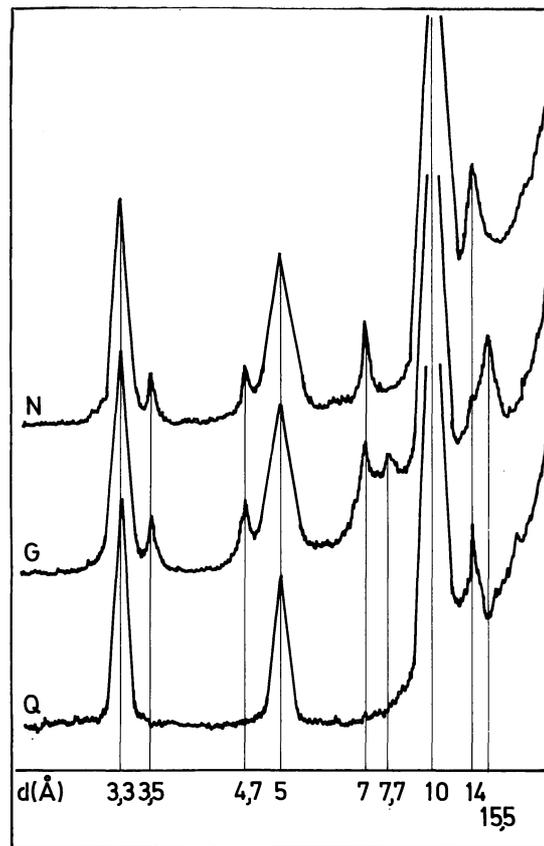


Fig. 10

*Interprétation* : L'allure asymétrique de la réflexion à 10 Å, avec sa base largement ouverte, fait penser à une illite ouverte où certains espaces interfoliaires se comportent comme ceux de la chlorite : asymétrie stable au glycol et au chauffage. Le minéral est appelé  $I_C$  (LUCAS, 1963).

L'ensemble minéralogique à 14 Å (au naturel) est un complexe formé de feuillets stables aux traitements (G, Q) et de feuillets instables à taux d'interstratification variable. Le gonflement maximum enregistré après traitement au glycol est de 15.5 Å.

La réflexion unique, même mal définie, à 14 Å après chauffage montre que les feuillets instables au glycol sont stables au chauffage comme ceux d'une chlorite gonflante. Cet édifice complexe comporte dès lors de la chlorite et des feuillets interstratifiés à comportement de chlorite et de chlorite gonflante d'où l'expression de l'ensemble : C-(14<sub>C</sub>-14<sub>G</sub>).

Formule représentative :

$$I_C = 8; C-(14_C-14_G) = 2$$

*Sondage de Rotem, 700 m. Buntsandstein supérieur* (fig. 12).

N. Le diffractogramme présente les trois réflexions intenses et assez fines, caractéristiques d'une illite. Un complexe est en outre représenté à 14 Å par une réflexion symétrique mais large et tronquée.

G. Le traitement au glycol transforme la réflexion initiale à 14 Å en une réflexion bifide à 14 Å et à 15.5 Å. On note également l'apparition d'une réflexion supplémentaire mal définie (bosse) à 7.8 Å.

Q. La réflexion résultante à 13.8 Å (chlorite) présente une asymétrie nette du côté des grands angles avec un épaulement distinct à 12 Å.

*Interprétation* : La réflexion bifide à 14 Å de l'échantillon glycolé montre que le complexe à 14 Å est formé :

a. de feuillets stables au glycol;

b. d'un ensemble de feuillets séparés les uns stables au glycol et les autres, instables (gonflement à 15.5 Å). Les feuillets instables au glycol le sont aussi à la chaleur; ce comportement est identique à celui de la montmorillonite mais l'écrasement est moindre. La réflexion résiduelle à 12 Å résulte donc de la combinaison (interstratification irrégulière) de feuillets chloritiques (14<sub>C</sub>) et de feuillets montmorillonitiques (14<sub>M</sub>). L'ensemble à 14 Å peut s'exprimer sous la forme : C-(14<sub>C</sub>-14<sub>M</sub>).

Formule représentative :

$$I_f = 7; C-(14_C-14_M) = 3$$

*Sondage de Rotem, 689 m. Buntsandstein supérieur* (fig. 13).

N. L'échantillon, riche en illite, fournit en plus des réflexions peu intenses à 14 Å, 7, 4.7, 3.5 Å.

G. Un palier se dessine entre 14 Å et 17 Å.

Q. La réflexion à 14 Å se maintient. La base de la réflexion à 10 Å débute vers 14 Å et détermine ainsi une légère élévation du bruit de fond.

*Interprétation* : Le complexe à 14 Å comporte :

a. des feuillets stables au glycol (chlorite);

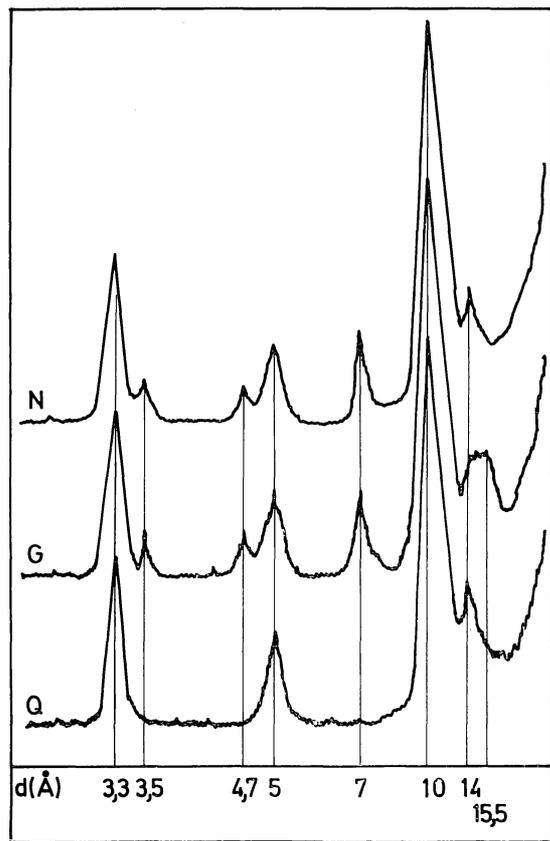


Fig. 11

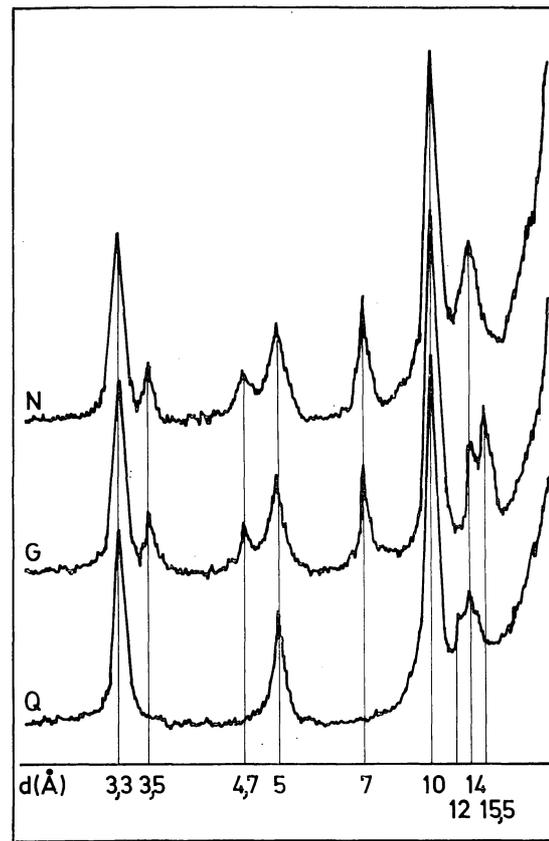


Fig. 12

- b. des feuillets dont tous les espaces interfoliaires gonflent à 17 Å;
- c. des feuillets interstratifiés à 14 Å stables et instables.

Les espaces interfoliaires instables au glycol le sont aussi à la chaleur : les feuillets à 17 Å s'écrasent à 10 Å après chauffage. Ils s'identifient à la montmorillonite.

Le complexe à 14 Å peut être : C-(14<sub>C</sub>-14<sub>M</sub>)-M. L'illite ouverte se rapproche du type I<sub>C</sub> (J. LUCAS, 1963).

Formule représentative :

$$I_C = 9; C-(14_C-14_M)-M = 1$$

*Sondage de Neeroeteren, 799 m, n° 20. Hettangien (fig. 14).*

- N. La réflexion (001) à 10 Å de l'illite est particulièrement asymétrique vers les petits angles dont la base se situe à 14 Å; la réflexion (003) à 3.3 Å présente l'asymétrie inverse mais moins prononcée.
- G. Tout en diminuant l'intensité, une réflexion à 10 Å se dégage au-dessus d'un plateau limité à 10 Å d'une part et à 14 Å d'autre part.
- Q. La réflexion à 10 Å est nettoyée et est devenue étroite et intense. La réflexion à 14 Å est maintenant bien individualisée.

*Interprétation* : Le palier 10-14 Å fourni par l'échantillon glycolé traduit la présence d'un complexe comportant :

- a. des feuillets à 10 Å stables (feuillets illitiques);
- b. un ensemble de feuillets stables à 14 Å et d'espaces interfoliaires gonflants (entre 10 et 14 Å). Après chauffage, la réflexion unique à 10 Å montre que les espaces interfoliaires instables au glycol se sont écrasés à 10 Å comme le fait la montmorillonite.

Cet édifice comprend donc l'illite (I), des feuillets interstratifiés illitiques et montmorillonitiques et répond à la formule :10-(10-14<sub>M</sub>) (J. THOREZ, 1967).

Formule représentative :

$$I = 6; C = 2; 10-(10-14_M) = 2$$

*Sondage de Rotem, 705 m. Buntsandstein supérieur (fig. 15).*

- N. Le diagramme montre une réflexion intense à 28 Å, une autre aussi intense et parfaitement symétrique à 14.2 Å et les réflexions de l'illite et celles d'un minéral chloritique (7 Å, 4.7 Å et 3.5 Å).
- G. La majeure partie de la réflexion à 14 Å migre à 15.5 Å tandis qu'un épaulement résiduel subsiste à 14 Å du côté des grands angles; il flanque la nouvelle réflexion à 15.5 Å tout en se situant à l'emplacement de la réflexion initiale à 14 Å au naturel. Une autre réflexion nette apparaît à 7.7 Å. La réflexion à 5 Å s'élargit considérablement vers les petits angles et montre une bosse à 5.2 Å; d'autres réflexions apparaissent à 4.5 Å, à 3.45 Å (entre les pics à 3.5 Å moins intenses et 3.3 Å).
- Q. La réflexion à 15.5 Å dans l'échantillon glycolé fait place à un doublet : réflexions à 13.8 Å et à 12 Å, assez intenses. Une bosse résiduelle se marque à 8 Å; les réflexions à 7, 4.7 et 3.5 Å disparaissent.

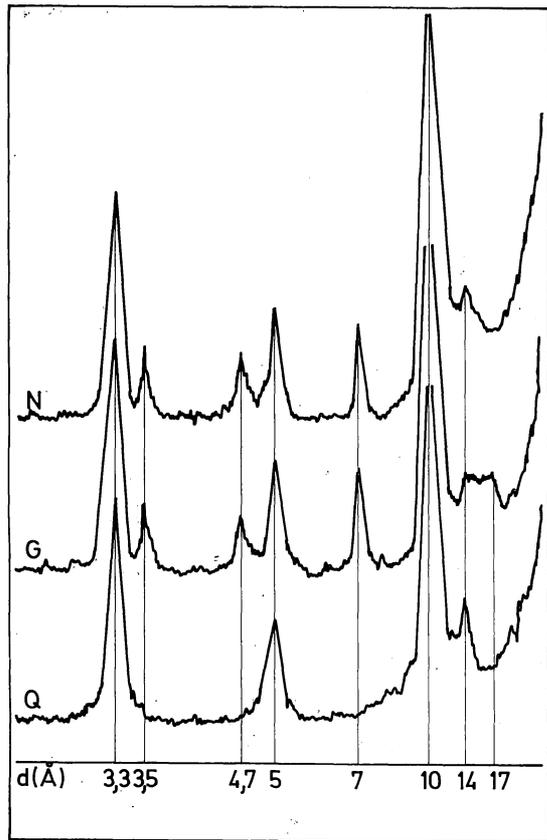


Fig. 13

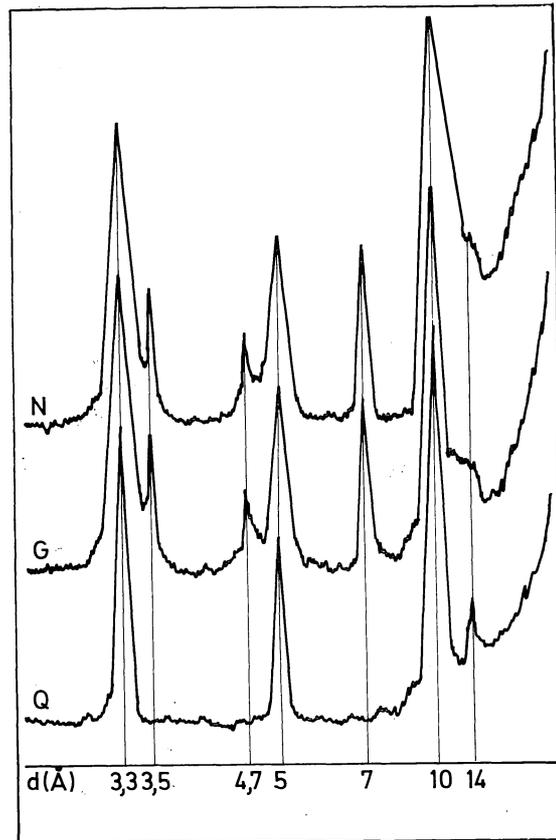


Fig. 14

*Interprétation* : La fraction argileuse contient de l'illite fermée, de la chlorite et un autre minéral argileux.

Les distances réticulaires fournies par le diffractogramme de l'échantillon glycolé rendent compte d'un minéral dont la réflexion principale (001) se situe à 31 Å; les autres réflexions sont situées à

15.5 Å (002)	5.2 Å (006)	3.45 Å (009)
7.7 Å (004)	4.5 Å (007)	

Le bruit de fond de la courbe reste très élevé entre 2° et 3°2θ dans le diffractogramme de l'échantillon glycolé. L'épaisseur élémentaire du feuillet que traduit la réflexion (001) ne correspond pas à un minéral argileux simple mais bien à un interstratifié régulier représenté par une série rationnelle de réflexions harmoniques (001).

La réflexion principale à 31 Å après traitement à l'éthylène glycol correspond à un empilement régulier de feuillets chloritiques à 14 Å stables et de feuillets montmorillonitiques gonflants (17 Å). Ce minéral est la corrensite (LIPPMANN, 1956; LUCAS, 1963). Le diagramme ATD le confirme (fig. 4).

Formule représentative :

$$I_f = 4; \text{ corrensite } (14_C-14_M) = 5; C = 1$$

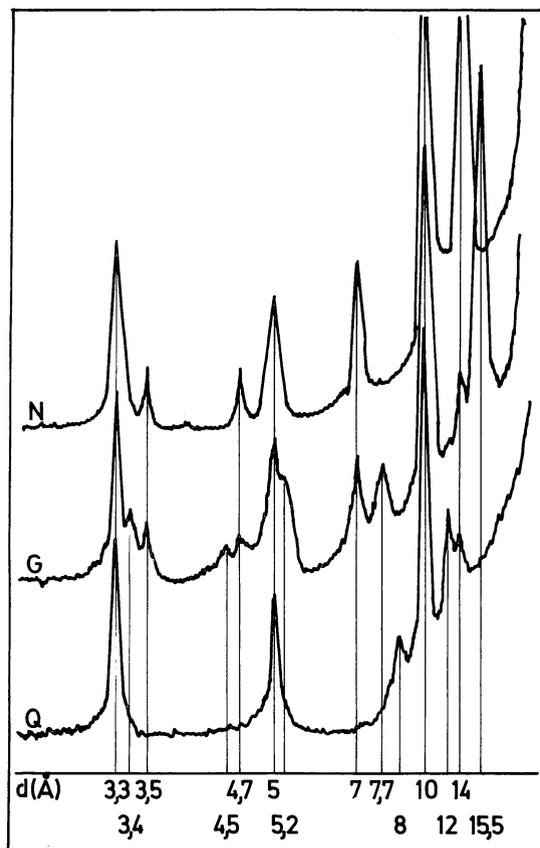


Fig. 15. — Association à corrensite.

## 4. RÉPARTITION DES MINÉRAUX ARGILEUX DANS CHAQUE SONDAGE

*Sondage d'Eelen* (n° 31).

Deux portions du sondage ont pu être étudiées.

De 870 m à 820 m, les échantillons prélevés dans les roches fines, ont donné de l'illite ouverte très abondante avec un peu de chlorite dans le schiste calcaireux de la base.

De 655 à 610 m, c'est la zone à corrensite et à chlorite. L'illite, de type fermée, est en proportion égale au complexe à 14 Å mais elle reste encore nettement prédominante à certains niveaux (fig. 16).

*Sondage d'Helchteren* (n° 60).

Le Zechstein est caractérisé par une illite ouverte, de type I<sub>V</sub>, associée à de la kaolinite en proportion notable.

De 863 à 770 m, la fraction argileuse des échantillons recueillis est uniquement formée d'illite à pic large avec traces de kaolinite (fig. 16).

*Sondage de Neeroeteren* (n° 99).

L'étude des argiles permet de distinguer deux zones.

De 1025 à 844 m, l'illite, plus ou moins fermée, est encore présente en forte proportion, mais le complexe à 14 Å acquiert de l'importance. La chlorite est presque constante dans tout l'intervalle. Elle accompagne la corrensite souvent bien représentée, ou passe à un interstratifié irrégulier de type C-(14<sub>C</sub>-14<sub>G</sub>).

De 844 à 788 m, l'illite prédomine dans la phase argileuse et accompagne une chlorite dont la fréquence ne varie pas. A partir de 844 m et dès le Rhétien, la corrensite et les autres interstratifiés à 14 Å disparaissent; ils sont remplacés par un autre interstratifié irrégulier, de type 10-(10-14<sub>M</sub>) dont la proportion (20 %) reste constante dans l'Hettangien. La kaolinite semble exister en traces (fig. 16).

*Sondage de Rotem* (n° 64).

Le degré de resserrement des prélèvements est irrégulier. Quarante-cinq échantillons ont été prélevés dans les sédiments les plus fins.

L'étude des argiles a permis de reconnaître plusieurs zones.

De 1.050 à 865 m, la fraction argileuse est surtout constituée d'illite de type I<sub>V</sub>. Les niveaux grossiers contiennent souvent de la kaolinite en traces ou en faible proportion (10 %).

De 865 à 805 m, l'illite I<sub>V</sub> diminue légèrement au profit de la chlorite (10 % au maximum). La montmorillonite apparaît en traces à 815 m.

De 805 à 770 m, l'illite ouverte de type I<sub>V</sub> est accompagnée de chlorite mal structurée et d'un peu de montmorillonite.

De 770 à 715 m, l'illite se ferme progressivement et sa teneur diminue suite à l'apparition de quelques interstratifiés mal définis avec chlorite et montmorillonite peu cristallisées. La chlorite est assez constante; la montmorillonite peut atteindre localement 20 %. La kaolinite existe en traces vers 755 m.

De 715 à 685 m, l'association de minéraux argileux varie. La chlorite, mal cristallisée, est sporadique.

On note l'apparition plus franche de minéraux interstratifiés; certains niveaux

contiennent de la corrensite typique, mais les interstratifiés irréguliers C-(14<sub>C</sub>-14<sub>G</sub>) et C-(14<sub>C</sub>-14<sub>M</sub>)-M sont plus fréquents (fig. 16).

*Sondage de Bullen, n° 121.*

Le Zechstein est caractérisé par une illite ouverte, I<sub>V</sub> ou I<sub>M</sub> prédominante, accompagnée d'une faible proportion de chlorite. La kaolinite se trouve en traces dans la moitié inférieure du tronçon.

De 908 à 850 m, l'illite ouverte, I<sub>M</sub> dans le faciès schisteux et de type mal défini dans le faciès arénacé, est le seul constituant argileux de la fraction fine avec traces de kaolinite dans les horizons plus gréseux.

De 850 à 750 m, l'illite ouverte I<sub>V</sub> reste dominante. Les phases grossières et les faciès directement sus-jancets aux niveaux conglomératiques ont une teneur notable en kaolinite. La chlorite est pratiquement inexistante sauf en traces dans les roches arénacées de types gréseux ou microconglomératiques. De même, la montmorillonite apparaît sporadiquement en traces vers 750 m (fig. 16).

## 5. VUE D'ENSEMBLE

Après avoir noté leur répartition et leur association dans les sondages étudiés, une vue d'ensemble sur les minéraux argileux du Permo-Trias de Campine peut être maintenant envisagée.

Les minéraux argileux caractéristiques sont donc l'illite, la kaolinite, la montmorillonite, la chlorite et les interstratifiés.

L'illite est présente à tous les niveaux et en tous les points étudiés. Généralement ouverte dans les faciès détritiques et détrito-carbonatés, elle est mieux cristallisée dans les roches appartenant au sommet du Trias et dans l'Hettangien. Vers le sommet de ce profil, l'illite diminue concurremment à l'apparition d'interstratifiés, surtout avec la corrensite.

Si les illites sont en majorité dioctaédriques, le Permien de Bullen contient, dans les roches calcaires, des illites alumineuses (KLINGEBIEL et LATOUCHE, 1962), avec un rapport d'intensité des réflexions (001) et (002) inférieur à 3.

Dans le Buntsandstein et le Muschelkalk, toutes les illites sont « ferrifères » avec un rapport supérieur à 3. La présence de la réflexion à 9.9 Å de la corrensite (réflexion peu intense) ne fausse que faiblement ce rapport.

La kaolinite n'existe que dans le Permien et le Buntsandstein; elle peut atteindre une proportion notable dans les conglomérats et les grès micropoudingui-formes. Elle accompagne donc les détritiques ce qui reflète l'héritage depuis le continent nourricier (LUCAS, 1961).

La montmorillonite est très localisée : elle n'apparaît qu'au sommet du Buntsandstein moyen et sa proportion n'excède pas 30 %.

La chlorite se présente sous un double aspect : elle accompagne les minéraux simples et participe aux associations de minéraux argileux caractérisées par les interstratifiés.

Quand elle accompagne les minéraux simples, elle reste toujours en proportions faibles. Elle apparaît mal structurée sur les diffractogrammes : les réflexions sont peu intenses et fort étalées. Elle est souvent ferreuse; présente dans le Permien de

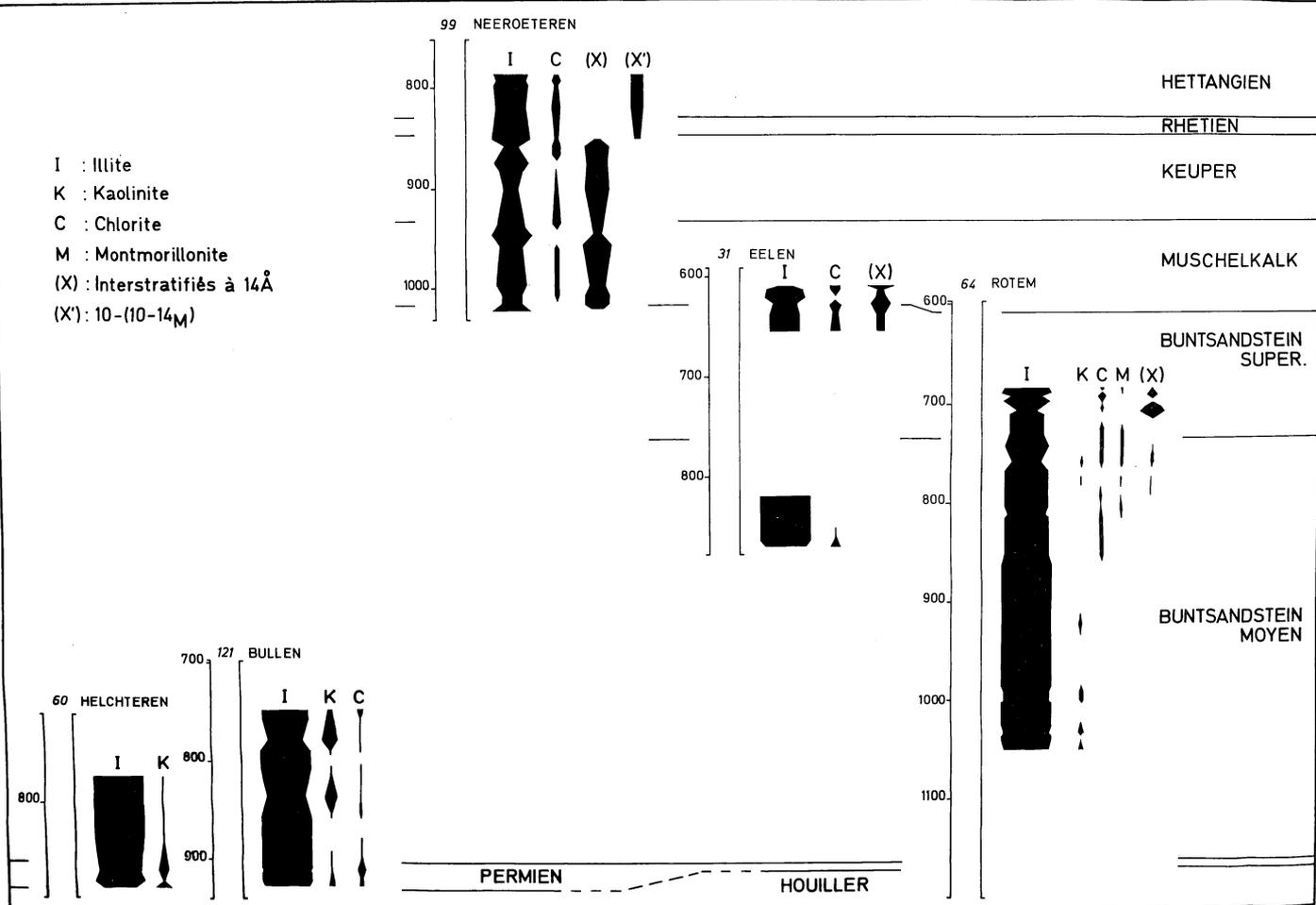


Fig. 16. — Évolution des associations de minéraux argileux dans le Permo-Trias de Campine.

Bullen, elle apparaît sporadiquement dans le Buntsandstein moyen à faciès détritique.

La chlorite qui accompagne les interstratifiés peut évidemment être engagée dans l'édification du complexe à 14 Å. Quoiqu'associée à la corrensite dès le Buntsandstein supérieur jusqu'à l'Hettangien, elle ne dépasse pas la proportion de 20 % de la fraction argileuse.

Les *interstratifiés* apparaissent assez nettement dès la base du Buntsandstein supérieur. La *corrensite* s'individualise très rapidement et succède à des niveaux caractérisés par des interstratifiés irréguliers à feuillets à 14 Å. Si on ne peut pas affirmer que la tendance à la régularisation des réseaux se maintient de bas en haut dans la colonne stratigraphique, il est cependant remarquable de constater les faits suivants : les interstratifiés à feuillets chloritiques et la corrensite disparaissent brutalement dès le Rhétien; l'édifice 10-(10-14<sub>M</sub>) apparaît et se maintient en proportion constante (20 %) dans l'Hettangien de Neeroeteren. Il est important de noter que cette dernière évolution s'impose d'une manière indépendante de la lithologie (schiste, marne et calcaire).

On peut résumer d'une autre manière les observations faites pour l'ensemble du Trias de Campine : en comparant la fréquence de répartition et d'apparition de chaque minéral argileux en fonction de la lithologie. Ainsi les relations suivantes, traduites sous forme de tableau, peuvent être mises en évidence :

TABLEAU IV

	I <sub>0</sub>	I <sub>f</sub>	K	C	(x) irr.	(x) rég.	M
Conglomérat et grès poudinguiformes	+		+	+			
Grès	+			+			(+)
Psammite	+	+		+	+		(+)
Schiste	(+)	+		+	+		
Calcaire et grès calcaireux	(+)	+		+	+		
Dolomie (1)		+		+		+	

(1) Il faut inclure aussi les dolcryptites et les dolpsammoschistes.

(x) Minéraux interstratifiés.

La nature des argiles apparaît ainsi en partie liée au faciès. Un cas particulièrement net est celui de la corrensite incluse dans les dolomies à texture massive du Trias.

La kaolinite est surtout limitée aux sédiments les plus grossiers. Si la chlorite apparaît comme un ubiquiste en fonction du faciès, il est remarquable de noter la localisation des interstratifiés irréguliers dans les sédiments plus fins (psammites

et schistes) et dans les roches carbonatées. Il est d'ailleurs symptomatique de relever cette présence en liaison avec une illite mieux structurée.

## VI. INTERPRÉTATION ET CONCLUSIONS

L'analyse minéralogique du Permo-Trias de Campine ne peut évidemment pas rendre compte de l'ensemble des faits caractérisant une époque aussi complexe que celle du Trias.

Bien que les sondages de Campine ne constituent, dans le bassin triasique septentrional, qu'un point portant sur l'ensemble de la colonne stratigraphique du Trias, les résultats acquis au cours de cette étude permettent néanmoins de dégager quelques conclusions :

1. Contribution à la connaissance du Trias de Campine ;
2. Valeur stratigraphique des minéraux argileux ;
3. Genèse des minéraux argileux ;
4. Évolution des associations argileuses dans le Trias de Campine.

### I. CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DU TRIAS DE CAMPINE

En Campine, le Buntsandstein moyen est constitué, sur 400 m, d'une série alternante de grès feldspathiques et de psammites. Pour ANTUN (1954), l'origine des feldspaths potassiques et des micas frais « implique » l'affleurement de roches granitiques sur le continent méridional. Cet auteur situe cette source assez loin au Sud sur le Massif du Brabant, le matériau provenant en grande partie de régions cachées actuellement sous le Bassin de Paris.

Bien que le problème délicat de l'origine des feldspaths et des micas frais ne puisse être tranché, on peut émettre cependant quelques remarques relatives aux hypothèses d'ANTUN (1954).

La provenance de matériaux à partir de régions situées au Sud du Bassin de Paris est difficilement admissible car d'autres massifs cristallins peuvent fournir les feldspaths et les micas. En effet, des auteurs anglais (DOUBLE, 1926 et FLEET, 1923) ont mis en évidence l'influence des Cornouailles, de la Chaîne Pennine et des massifs écossais au cours de la sédimentation triasique en Angleterre. SINDOWSKI (1958) a montré, par l'étude des minéraux denses, l'influence des massifs du Spessart et du Hunsrück au cours du Trias inférieur.

La puissance de 400 m, qui est celle du Buntsandstein moyen de Campine, n'implique pas nécessairement une large extension méridionale de cette assise, comme l'entend ANTUN.

Dans son travail sur la paléogéographie du Trias en France, RICOUR (1962) ne parle pas d'une ingression de la mer triasique au Nord du Bassin de Paris. Cette puissance pourrait être aussi due au comblement d'une fosse, située au Nord-Est du Massif du Brabant émergé.

a. Conclusion tirée de l'examen pétrographique et de l'analyse des minéraux denses : *Influence d'une source scandinave.*

En plus de la relative abondance des feldspaths et micas frais, l'étude pétrographique a révélé l'existence de plagioclases et de mésoperthites. THOMAS (1909) signale des feldspaths potassiques, des plagioclases et des perthites dans le New Red Sandstones de l'Ouest de l'Angleterre ; il ne parle cependant pas de l'origine possible de ces perthites.

Par sa position géographique, la source des mésoperthites dans le Trias de la Campine serait la chaîne scandinave ou éventuellement ses massifs marginaux méridionaux, actuellement enfouis sous les terrains plus récents.

L'étude des minéraux denses du Buntsandstein moyen de Campine confirme notamment l'existence d'une province méridionale déficitaire en grenat (VALK, 1943). A la fin du Buntsandstein moyen, un apport en grenat important (61 % de la phase dense) a été observé dans des roches plus « riches » en mésoperthites. Cette relation renforce l'hypothèse de l'influence d'une source scandinave dans l'évolution du bassin triasique du Nord et, rejoignant les idées de VALK (1943), d'un débordement momentané de la province grenatifère du Nord.

*b. Comparaison entre le Buntsandstein de Campine et les grès rouges permo-triasiques des Vosges.*

Les caractères pétrographiques des grès rouges permo-triasiques des Vosges ont été résumés par MILLOT, PERRIAUX et LUCAS (1961);

- fréquence de galets gneissiques, pélitiques et polycristallins;
- feldspaths alcalins relativement frais et plagioclases « rarissimes »;
- grains de quartz ni éclatés, ni cariés, enveloppés d'un enduit ferrugineux; agrégats ferrugineux de grains de quartz;
- fraction argileuse exclusivement illitique, la chlorite et la kaolinite étant subordonnées.

Selon MILLOT, PERRIAUX et LUCAS (1961), le faciès grès rouge est le produit du remaniement d'altérations aréniformes rubéfiées, nées sous climat chaud, à saisons sèches et humides alternantes.

L'humidité et la chaleur amorcent des hydrolyses modérées, détruisant les plagioclases et les ferromagnésiens, préservant une grande partie des feldspaths alcalins et dégradant faiblement l'illite. Localement, la kaolinite prendra naissance dans les profils bien drainés et la montmorillonite, dans les bas-fonds mal drainés.

L'aridité et la chaleur fixent le fer et stabilisent la rubéfaction. Tous les caractères sédimentologiques des séries gréseuses rouges témoignent de l'existence de reliefs cristallins « animés d'une tectonique vivante » contrebalancée par une érosion vive.

Mis à part l'abondance des plagioclases, les caractères pétrographiques observés en Campine permettent d'y rattacher le Buntsandstein aux grandes séries rouges. Une partie des sédiments déposés en Campine serait le produit de remaniements de dépôts rubéfiés élaborés sur un continent soumis à un climat chaud à saisons contrastées. Mais le manque de renseignements sur la provenance d'une grande partie des sédiments déposés en Campine empêche d'être plus affirmatif. En effet, l'Ardenne et le Brabant qui ont certainement contribué à l'alimentation du bassin triasique en Campine n'ont pas le caractère cristallin évoqué par MILLOT (1967). On peut cependant penser que ces reliefs étaient recouverts, au Permien, par des dépôts issus de massifs cristallins, formés dans les conditions énoncées plus haut.

## 2. VALEUR STRATIGRAPHIQUE DES MINÉRAUX ARGILEUX

Les associations argileuses sont souvent ou trop variables ou trop uniformes et ne présentent pas d'intérêt stratigraphique. Il s'agit alors d'associations qui caractérisent de grandes aires et de longues périodes de sédimentation (SITTLER, 1965).

a. *La distinction Zechstein — Buntsandstein moyen.*

L'apport d'illite, de chlorite et de kaolinite en Campine est resté constant pendant la longue période qui s'étend du Permien au Buntsandstein.

La distinction Permien et Trias est extrêmement difficile dans les sondages étudiés. Aucune modification brutale dans le contenu argileux ne traduit le passage d'une formation à l'autre. Les grès et les calcaires permien de Campine sont légèrement plus riches en kaolinite, celle-ci accompagnant une illite à caractère alumineux (KLINGEBIEL et LATOUCHE, 1962); mais cette différence reste très ténue.

b. *Conclusion concernant les minéraux argileux du Lias de Neeroeteren.*

1. Les argiles du Lias de Neeroeteren ont également été étudiées (fig. 16). L'illite et la chlorite, en proportions plus ou moins constantes, sont associées à des édifices irréguliers différents.

On y trouve le type 10-(10-14<sub>M</sub>), constant dans le tronçon examiné et indépendamment du faciès. Les diagrammes obtenus sont fort semblables à ceux observés par KUBLER (1962) dans le Portlandien marnocalcaire de Neuchâtel en Suisse.

Il est actuellement difficile de préciser la genèse de certains édifices interstratifiés en Campine. Ils semblent constituer un stade intermédiaire propre au milieu calcaire.

2. Dès le Rhétien (sensu STAINIER, 1943), les interstratifiés du Trias, caractérisés par leurs feuilletés chloritiques, disparaissent; jusqu'au sommet du sondage de Neeroeteren, on observe la présence constante de l'édifice 10-(10-14<sub>M</sub>). Cependant, il faut se garder de vouloir accorder une valeur stratigraphique absolue, même à l'échelle du bassin campinois, à une telle association de minéraux argileux.

## 3. GENÈSE DES MINÉRAUX ARGILEUX

L'analyse détaillée des minéraux argileux du Permo-Trias de Campine permet d'émettre plusieurs hypothèses sur leur genèse.

a. *Les minéraux hérités.*

Le Permien, le Buntsandstein moyen de Campine sont caractérisés par les minéraux argileux : illite, chlorite ferreuse et kaolinite. Parmi ceux-ci, le plus commun est l'illite. Elle domine dans le Buntsandstein détritique, en association plus ou moins constante avec la chlorite ferreuse souvent mal structurée.

On retrouve encore l'illite avec la kaolinite dans les horizons plus grossiers.

En relation avec les roches détritiques, cette association permet d'affirmer que l'apport continental est uniquement formé de ces minéraux.

Une difficulté dans l'interprétation de l'origine des minéraux argileux subsiste. Typiques des séries rouges, ces associations de minéraux argileux constituent néanmoins un mélange de minéraux hérités des roches-mères du continent et de minéraux issus d'une altération ménagée grâce à la rapidité de l'érosion.

b. *Le problème de la montmorillonite.*

La montmorillonite apparaît en Campine en faibles proportions au sommet du Buntsandstein moyen. Son origine reste problématique. Elle peut être néoformée dans le bassin sédimentaire mais aussi sur le continent dans les profils mal drainés ou dans les « bas-fonds du paysage tropical » (SITTLER, 1965). D'après le même auteur, on ne peut distinguer avec certitude ces deux origines, d'ailleurs très voisines, du

point de vue géochimique car il s'agit d'un milieu confiné soit pédologique soit sédimentaire.

La montmorillonite de Campine se trouve, dans des roches détritiques contenant encore des feldspaths mais montrant davantage un ciment carbonaté en association avec une illite ouverte de type I<sub>M</sub>.

L'origine pédologique ou la néoformation en milieu marin, dans un environnement favorable, sont difficiles à démontrer. On serait encore tenté d'admettre que la montmorillonite résulte ici d'un état de transformation au contact de solutions concentrées d'un minéral hérité et dégradé.

*c. Genèse des minéraux argileux en milieu magnésien.*

Dès le Buntsandstein supérieur, des dolomies à texture massive s'interstratifient parmi des sédiments beaucoup plus fins. Au Muschelkalk et au Keuper, les conditions lagunaires se maintiennent. On retrouve les dolomies et les minces niveaux d'anhydrite signalés par STAINIER (1943).

L'illite parvient toujours au bassin mais on constate que la montmorillonite a disparu au profit des édifices irréguliers du complexe à 14 Å. Les interstratifiés passent ensuite, dans les dolomies, à la corrensite.

— *Analogie des associations à corrensite du Trias de Campine et du Trias germanique eurafricain.*

La corrensite, associée à l'illite, est un minéral fréquent dans les argiles du Trias moyen et supérieur de Campine. Les diffractogrammes de corrensite obtenus dans ces niveaux sont pratiquement identiques à ceux obtenus en Espagne, en France, et même au Maroc par LUCAS (1963).

D'autre part, ce minéral est intimement lié aux dolomies d'origine évaporitique. Cette relation a déjà été mise en évidence par GRIM et coll. (1959). FUCHTBAUER et GOLDSCHMIDT (1959) observent aussi la corrensite dans les faciès évaporitiques du du Zechstein allemand. LIPPMANN (1956) l'a trouvée à Göttingen dans le Trias inférieur, accompagnée d'édifices à 14c. DUMBLETON et WEST (1966) retrouvent la corrensite avec l'illite et la chlorite dans le Keuper anglais et ils rejoignent les idées de LUCAS (1963) en discutant la genèse de ce minéral.

En Campine, la corrensite est accompagnée de chlorite dont le caractère ferreux n'apparaît plus. La proportion de ce dernier minéral reste trop faible pour qu'un diffractogramme de poudre permette de déceler un caractère trioctaédrique.

Les édifices irréguliers se rencontrent dans les psammites et les psammoschistes rouges intercalés dans les niveaux de dolomies évaporitiques et d'anhydrite. Tous ces complexes ont déjà été décrits par LUCAS dans les terrains triasiques eurafricains.

— *Rajeunissement de l'illite.*

L'illite qui se dépose dans le bassin a une double vocation.

Elle va soit s'agradar, soit donner naissance aux minéraux argileux magnésiens. En effet, dans la zone de transition des minéraux hérités et des minéraux néoformes, on voit l'illite s'ouvrir au point de montrer sur les diffractogrammes l'existence de feuillets gonflants ou à comportement chloritique, s'interstratifiant dans l'empilement de feuillets illitiques.

Dans le mécanisme de l'agradation, l'état de l'appauvrissement en cations interfoliaires n'intervient pas à lui seul; l'influence du diamètre des particules détritiques joue aussi un rôle décisif (LUCAS, 1963). Ainsi, avec le remplacement par le Mg<sup>++</sup>, des ions K<sup>+</sup>, libérés des particules plus altérées, vont combler les

vides existant dans les espaces interfoliaires de certaines illites moins dégradées, reformant, par un chemin inverse de celui de la dégradation, des micas mieux cristallisés.

C'est le cas de l'illite dans les sondages de Campine. De la base au sommet du profil, on observe la succession : illite à pic large — éventuellement ouverte — et illite à pic de plus en plus aigu. Cette agradation de l'illite est en quelque sorte un rajeunissement du minéral.

— *Néof ormation des édifices interstratifiés.*

Dès l'apparition des faciès lagunaires au sommet du Buntsandstein, les minéraux argileux magnésiens prennent assez vite le pas sur l'illite. Le milieu devient plus basique avec l'apport de solutions riches en silice,  $Mg(OH)_2$  et  $Ca(OH)_2$ , issus d'un lessivage continental hydrolisant.

Des phyllites dégradées, introduites dans le bassin, sont soumises à une forte concentration en cations. La perte des ions  $K^+$  sur le continent et en cours de transport a provoqué un relâchement dans les forces de liaison. Mais arrivées en milieu « à forte pression » de magnésium (LUCAS, 1963), les ions  $Mg^{++}$  pénètrent dans ces particules instables et de faible diamètre; le K, mal lié dans un espace devenu trop grand pour lui, est éliminé. On assiste à la transformation de l'illite en feuillets chloritiques. Cette agradation ne se fait pas d'une manière identique pour tous les feuillets d'une même particule. Certains feuillets moins lessivés résistent alors que d'autres acceptent l'occupation par les ions  $Mg^{++}$ . Ce qui conduit ainsi aux différents interstratifiés irréguliers.

Ces édifices interstratifiés occupent une position transitoire dans la transformation des minéraux argileux. Ils représentent un compromis, en équilibre instable, entre la composition de la phyllite et la composition du milieu (LUCAS, 1963). Cet équilibre va dépendre étroitement des conditions de milieu très variables dans un même bassin, dans le temps et dans l'espace ce qui explique les variations de détail dans la composition des édifices interstratifiés d'un même sondage et la difficulté de détermination précise.

#### 4. ÉVOLUTION DES ASSOCIATIONS ARGILEUSES DANS LE TRIAS DE CAMPINE

L'étude minéralogique de la fraction argileuse du Permo-Trias de Campine permet de résumer sous forme de schéma l'évolution des associations argileuses.

Héritage	Sédimentation	Agradation
Illite à pic large (chlorite et kaolinite)	→ Illite à pic large (ou même ouverte) → et complexe à 14 Å	Illite fermée et corrensite (et chlorite Mg)

Cette évolution dans les associations argileuses du Trias de Campine est remarquable car on peut l'intégrer dans le Trias germanique caractérisé par l'uniformité des conditions de milieu (KRUMM, 1969)

Dans la majorité des sondages du Jura, LUCAS (1961 et 1963) a observé une lente variation de la composition globale des argiles. Dans les niveaux inférieurs gréseux, l'illite ouverte est largement dominante, accompagnée subsidiairement de chlorite mal structurée et d'un peu de kaolinite. Au fur et à mesure qu'on monte



## ANNEXE

## Description lithologique sommaire des sondages étudiés

1. *Sondage d'Eelen* n° 31.

Ce sondage, commencé au trépan avec injection d'eau, a traversé 586 m de morts-terrains et 15 m de Muschelkalk moyen. Après 601 m, il a été poursuivi à la couronne diamantée jusqu'à 878.55 m et arrêté à 300 m du Houiller (STAINIER, 1943).

Le sondage a recoupé le Muschelkalk inférieur, le Buntsandstein supérieur et le sommet du Buntsandstein moyen.

La coupe schématique, tirée de STAINIER (1943), est la suivante :

## — Muschelkalk inférieur :

601 à 623 m : Calcaire argileux gris vert. A la base, « un joint pailleté avec petites cavités cubiques (sel gemme dissous) ».

623 à 628 m : « Macigno » gris verdâtre. Veinules et enduit de gypse.

## — Buntsandstein supérieur :

628 à 638 m : Psammite rouge et « macigno » gris verdâtre. Gypse en veinules et eau salée.

638 à 760 m : Alternances de « macigno » gris avec des bancs rouges et des lits de gypse fibreux. « Certains lits ont un aspect argileux, sale, bariolé (Salzthon) ».

## — Buntsandstein moyen :

760 à 784 m : Grès blanc, très grenu, feldspathique à grandes lamelles de mica.

784 à 820 m : Psammite rouge.

820 à 866 m : Alternances de grès blanc rosé et de psammite brun rouge.

866 à 878.55 m : Schiste calcareux gris avec bancs de psammite rouge.

2. *Sondage d'Helchteren* n° 60.

Pratiqué à la couronne diamantée de 713 à 887.50 m, ce sondage a recoupé le Buntsandstein moyen et le Zechstein (STAINIER, 1943). La coupe schématique est la suivante :

## — Buntsandstein moyen :

713 à 770 m : Grès argileux devenant de plus en plus grossier et feldspathique.

770 à 863 m : Grès grossier clair, plus ou moins feldspathique avec niveaux conglomératiques et bancs de psammites rouges.

## — Zechstein :

863 à 887.50 m : 0.50 m de poudingue gris surmonté de calcaire parfois dolomique.

Minéralisation de pyrite et de chalcopryrite.

3. *Sondage de Neeroeteren* n° 99.

« Ce sondage a été entrepris par la Société Solvay pour la recherche du sel » (STAINIER, 1943). Le forage à la couronne a successivement recoupé l'étage Hettangien, le Rhétien, le Keuper, le Muschelkalk et le sommet du Buntsandstein supérieur. STAINIER (1943) en donne la relation suivante :

## — Hettangien :

788 à 827 m : Alternances de calcaires gris foncé et de schistes noirs à gris foncé calcareux.

- Rhétien :  
827 à 844 m : Calcaire gris avec niveaux schisteux et marneux compacts.
- Keuper :  
844 à 862 m : Schiste rouge avec, au sommet, 6 m de gypse rose, bérchoïde.  
862 à 887 m : Marne rouge, localement mêlée de gypse, avec un lit d'anhydrite.  
887 à 909 m : Schiste psammitique rouge brun.  
909 à 930 m : « Pas d'échantillon. Faille ou amas de sel ».
- Muschelkalk supérieur :  
930 à 959 m : Calcaire argileux rouge avec quelques niveaux gréseux et schisteux au sommet.  
Anhydrite en lits minces.
- Muschelkalk moyen :  
959 à 990 m : Calcaire gris clair avec bancs dolomitiques, très épais vers la base. Présence de gypse et d'anhydrite.
- Muschelkalk inférieur :  
990 à 1.015 m : Schiste gris noir et calcaire impur; un banc de « macigno ».  
Lits, joints ou nodules de gypse et d'anhydrite.
- Buntsandstein supérieur :  
1.015 à  $\pm$  1.025 m : Psammite et « macigno » rouges. Un lit irrégulier d'anhydrite au sommet.

#### 4. Sondage de Rotem n° 64.

Ce sondage a recoupé complètement le Buntsandstein et le Zechstein jusqu'au Houiller. STAINIER (1943) écrit : « Les limites et déterminations d'âges... sont très problématiques. J'ai placé les limites en me basant sur les coupes des sondages d'Eelen et de Neeroeteren ».

- Buntsandstein supérieur :  
605 à 686 m : Forage au trépan. Couches rouges et grises à gypse. Schiste compact.  
686 à 730 m : Psammite et schiste rouges et verts avec quelques niveaux de calcaire argileux gris verdâtre. Gypse fréquent.
- Buntsandstein moyen :  
730 à 797 m : Alternances de grès clair grenu, feldspathique et psammite rouge. Beaucoup de galets d'argile (« Thongallen »).  
797 à 1.150 m : Alternances de grès rosé, parfois à Thongallen et de psammite rouge.  
Quelques niveaux conglomératiques.  
1150 à 1165 m : Grès rose plus ou moins grenu, feldspathique.
- Zechstein :  
1165 à 1168 m : Calcaire clair, grenu, un peu dolomitique.  
1168 à 1171 m : Grès à gros grains dans une pâte kaolineuse.  
Cailloux avellanaires de quartzite noir et de schistes.

#### 5. Sondage de Bullen (Meeuwen) n° 121.

La description détaillée de ce sondage est due à GULINCK (1953). La partie carottée a recoupé notamment le Buntsandstein et le Zechstein.

## — Buntsandstein moyen et inférieur :

705 à 896 m : Grès assez fin brun rouge avec des niveaux schisteux et psammitiques. Localement, le grès devient grossier avec des épisodes conglomératiques parfois assez fréquents.

896 à 908 m : Schiste rouge, peu gréseux avec, à la base, un calcaire rosé, dur.

## — Zechstein :

908 à 935.50 m : Série carbonatée (dolomie et marne) à passées schisteuses.

935.50 à 936.50 m : Poudingue à gros cailloux roulés de calcaires, grès et schistes.

## BIBLIOGRAPHIE

- ANTUN, P., 1954. — Le Permien, le Trias et le Jurassique du Nord-Est de la Belgique, in *Prodrome d'une description géologique de la Belgique*. Publié sous la direction de P. FOURMARIER, Vaillant-Carmanne éd., pp. 377-384.
- BRINDLEY, G. W., 1951. — X-ray identification and structures of clay minerals. *Min. Soc. (Clay Min. Group), London*, 345 pp.
- DOUBLE, 1926. — The petrography of the triassic rocks of the Vale of Clwyd. *Proc. Liverpool geol. soc.*, part III, vol. XIV, pp. 249-262.
- DUMBLETON, M. and WEST, G., 1966. — Studies of the Keuper Marl : mineralogy. *Road Research Laboratory, Ministry of Transport, RRL Report n° 40*.
- FLEET, 1923. — Notes on the triassic sands near Birmingham, with special reference to their heavy detrital minerals. *Proc. Geol. Ass. London*, vol. 34, pp. 114-119.
- FORIR, HABETS et LOHEST, 1903. — Étude géologique des sondages exécutés en Campine. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. XXX, pp. m 101.
- FÜCHTBAUER, H. et GOLDSCHMIDT, H., 1959. — Die Tonminerale der Zechsteinformation. *Beitr. Min. Petr.*, 6, p. 325.
- GRIM, R. E., 1953. — Clay mineralogy. Mc Graw Hill, ed., N. Y., 384 pp.
- GRIM R. E., DROSTE, J. B. et BRADLEY, W. F., 1959. — A mixed-layer clay mineral associated with an evaporatite. *Clays and clay minerals, 8th nat. conf.*, pp. 228-236.
- GULINCK, M., 1953. — Description du sondage de Meeuwen (Bullen). *Communication du Service Géologique de Belgique*.
- KLINGEBIEL, A. et LATOUCHE, 1962. — Étude cristallographique des illites dans les séries éocènes du Bordelais. *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 255, pp. 142-144.
- KRUMM, H., 1969. — A scheme of clay mineral stability in sediments based on clay mineral distribution in Triassic sediments of Europe, in *Proceedings of the International Clay Conf.*, vol. 1, Tokyo, Japan, 1969, pp. 313-324.
- KUBLER, B., 1962. — Sur quelques interstratifiés irréguliers mica-montmorillonite. *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, t. n° 4, pp. 173-178.
- KUBLER, B., 1966. — La cristallinité de l'illite et les zones tout à fait supérieures du métamorphisme. *Colloque sur les âges tectoniques, à la Baconnière, Neuchâtel, Suisse*, pp. 105-122.
- LEGRAND, R., 1962. — In A. DELMER, Carte des Mines du Bassin Houiller de la Campine. *Ann. des Mines Belg.*, 1963, 6<sup>e</sup> livraison, pp. 739-754.
- LIPPMANN, F., 1956. — Clay minerals from the Rôth member of the triassic near Göttingen (Germany). *Journ. Sedim. Petrol.*, 26, pp. 125-129.
- LUCAS, J., 1963. — La transformation des minéraux argileux dans la sédimentation. Études sur les argiles du Trias. *Mém. Serv. Carte Géol. Lorr.*, n° 23, 202 pp.
- LUCAS, J. et BRONNER-TASSEL, A. M., 1961. — Évolution des argiles sédimentaires dans le bassin triasique du Jura français. *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 14, fasc. 4, pp. 137-147.
- LUCAS, J. et coll., 1968. — Étude des minéraux argileux du paléogène des sondages de Chaignes, Montjavoult, le Tillet et Ludes (Bassin de Paris), in *Colloque sur l'Éocène, Mém. du B.R.G.M.*, vol. II, pp. 53-76.

- MACKENZIE, R. C., 1956-58. — The illite in some Old Red Sandstones soils and sediments. *Min. Mag.*, vol. 31, pp. 681-689.
- MERING, J., 1949. — L'interférence des rayons X dans les systèmes à stratification désordonnée. *Acta Crist.*, 2, pp. 371-377.
- MICHOT, P., 1958. — Classification et terminologie des roches lapidifiées de la série psammite-pélique. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. 81, pp. 311-342.
- MILLOT, G., 1964. — Géologie des argiles. Masson, Paris, 499 pp.
- MILLOT, G., 1967. — Signification des études récentes sur les roches argileuses dans l'interprétation des faciès sédimentaires (y compris les séries rouges). *Sedimentology*, 8, pp. 259-280.
- MILLOT, G., PERRIAUX, J. et LUCAS, J., 1961. — Signification climatique de la couleur rouge des grès permio-triasiques des Vosges et des grandes séries détritiques rouges. *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 14, fasc. 4, pp. 91-100.
- MURRAY, H. H. et LYONS, S. C., 1956. — Correlation of paper-coating quality with degree of crystal perfection of kaolinite. *Clays and clay min.*, 4th nat. conf., 1955, pp. 31-40.
- MULLER, J. E., 1943. — Sedimentpetrologie van het dekgebte in Limburg. *Mededeel. Geol. Stichting*, Serie C-II-2, n° 2.
- PIRLET, H., 1965. — Classification des calcaires de la série des aréno-cryptites. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. 88, Bull. 7-10, pp. 395-410.
- RICOUR, J., 1962. — Contribution à une révision du Trias français. *Mém. Carte Géol. Détail. France*.
- SINDOWKI, H., 1949. — Results and problems of heavy mineral analysis in Germany : A review of sedimentary petrological papers, 1936-48. *Journal Sedim. Petr.*, vol. 19, pp. 3-24.
- SINDOWSKI, H., 1958. — Schütungsrichtungen und Mineral-Provinzen im Westdeutschen Buntsandstein. *Geol. Jahrb.*, band 73, pp. 277-294.
- SITTLER, C., 1964. — Le paléogène des fossés rhénan et rhodanien. Études sédimentologiques et paléoclimatiques. *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 24, 392 pp.
- SMITH, J. V. et YODER, H. S., 1956-58. — Experimental and theoretical studies of the mica polymorphs. *Min. Mag.*, vol. 31, pp. 209-235.
- STAINIER, X., 1903. — De l'âge des roches rouges du Limbourg belge. *Bull. Soc. Belg. Géol.*, t. XVII, p. 180.
- STAINIER, X., 1911. — Sur les recherches de sel en Campine. *Ann. des Mines de Belg.*, t. XVI, pp. 117-169.
- STAINIER, X., 1943. — Le Jurassique, le Triasique et le Permien de la Campine. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. LXVI, pp. 163-207.
- THOMAS, H. H., 1909. — Petrography of New Red Sandstones. *Quart. J. Geol. Soc. London*, 65, p. 231.
- THOREZ, J., 1969. — Sédimentologie du Famennien supérieur dans le synclinorium de Dinant (Belgique). *Thèse de doctorat*.
- THOREZ, J. et coll., 1967. — Les minéraux argileux et leurs altérations dans le Namurien inférieur de Belgique (Synclinal de Namur). *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. 90, Bull. 4-6, pp. 329-380.
- VALK, W., 1943. — Sedimentpetrologie van het Perm en de Trias in den ondergrond van Nederland. *Geol. Stichting, Mededeel. beh. b. Jaarverslag over 1942 en 43*, n° 13, pp. 1-17.

## DISCUSSION

M. EK : Le gypse et l'anhydrite représentent-ils une fraction importante des roches ?

Réponse : Mis à part l'existence de veinules de gypse, celui-ci n'existe, dans les roches échantillonnées, qu'à l'état de ciment accompagnant la dolomite. La proportion de gypse reconnue dans certains niveaux n'excède pas 20 %.

Par contre, l'anhydrite peut constituer des couches plus ou moins épaisses, relativement homogènes où le minéral prend une structure rayonnante nette.

M. VAN LECKWIJCK demande de quelle manière s'opère le passage vertical des faciès gréseux aux faciès psammitiques.

*Réponse* : On ne peut pas observer la manière dont s'opère le passage vertical des faciès gréseux aux faciès psammitiques. Les sondages étudiés n'existent plus selon un ensemble complet de carottes, mais sont à l'état de collections d'échantillons parfois fort pauvres.

M. P. MICHOT : Jusqu'où peut-on considérer que les minéraux argileux actuels sont bien les mêmes que ceux qui se sont formés à l'origine ? Quelle est l'influence éventuelle de la diagenèse ?

*Réponse* : Dans des terrains qui n'ont pas subi une diagenèse intense (enfouissement profond du bassin, phase de plissement) — et c'est le cas du Trias germanique épicon-tinental de Campine — on peut considérer que les minéraux argileux portent encore nettement les marques de l'influence géochimique et faciétale du bassin.

Il est probable, mais la démonstration est difficile, que certaines illites du Bunt-sandstein moyen de Campine ont subi des effets diagénétiques de faible intensité. De même, dans les niveaux gréseux où on peut voir une structure quartzitique naissante, la kaolinite montre parfois, dans les vermicules, des feuilletés confus de nature différente, suggérant une illitisation diagénétique.

Dans le processus normal de la diagenèse des terrains plus anciens, les minéraux argileux se trouvent dans des conditions d'instabilité. Ils se transforment en illite et chlorite dont ils augmentent la fréquence. La montmorillonite et les interstratifiés disparaissent. L'indice de cristallinité de l'illite augmente et l'illite évolue vers la séricite. La kaolinite, souvent héritée, peut aussi être un produit diagénétique transitoire dans l'évolution de sédiments perméables, parcourus par des eaux acides. Finalement, la séricitisation de la kaolinite est la règle dans la diagenèse avancée.

