

Zeitschrift: Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure
Band: 39 (1972-1973)
Heft: 94

Artikel: Simulation stochastique unidimensionnelle de séquences stratigraphiques molassiques
Autor: Favini, G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-198492>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 08.11.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Simulation stochastique unidimensionnelle de séquences stratigraphiques molassiques

par G. FAVINI*)
avec 2 figures

Introduction

Jusqu'à il y a quelques années «simuler» signifiait seulement feindre ou imiter ou encore prendre l'apparence de quelque chose sans en représenter la réalité. Récemment la simulation a pris un deuxième sens, celui de solution de problèmes qui ne peuvent pas être résolus par l'expérimentation classique. La simulation devient alors l'ensemble des techniques qui établissent un modèle de la réalité et qui effectuent des expérimentations sur ce modèle.

Les physiciens nucléaires furent les premiers à utiliser la simulation dans les années quarante. Les géologues commencèrent à faire usage de la simulation dès qu'ils purent employer les ordinateurs dans les années soixante. HARBAUGH et BONHAM-CARTER (1970) ont publié récemment un travail qui fait le point sur la simulation en géologie. Nous nous sommes inspirés de cette publication ainsi que des travaux de KRUMBEIN (1967, 1968) et VISTELIUS (1967) pour simuler des séquences stratigraphiques molassiques de Suisse romande. Les données géologiques que nous utilisons sont contenues dans un de nos travaux précédents (FAVINI, 1970) sur la stratonomie des formations molassiques où sont reportées les sources d'informations géologiques employées.

Généralités

Les données stratigraphiques récoltées sur le terrain par le géologue sont reportées généralement sous forme de coupe verticale à une dimension dont un exemple fictif est donné dans la figure 1, adaptée de KRUMBEIN (1967). Cette coupe de sept mètres d'épaisseur est constituée de trois types lithologiques, à savoir A, B, C.

Il y a différentes façons d'analyser statistiquement les données géologiques contenues dans une coupe. On peut déterminer par exemple la distribution de fréquence des épaisseurs avec les paramètres moyenne, médiane, mode, variance. On peut aussi déterminer la ou les lois théoriques des distributions de fréquence qui donnent des renseignements sur les variables géologiques prises en elles-mêmes sans tenir compte de leur distribution spatiale.

Par contre, si l'on veut obtenir une analyse statistique de la succession verticale des bancs, c'est-à-dire déterminer la ou les lois selon lesquelles les bancs ou couches se suivent selon l'ordre de dépôt, il faut faire intervenir d'autres techniques. Nous avons choisi la méthode de chaînes de Markov pour rendre compte des lois de succession des types lithologiques.

*) Département de Géologie, Université Laval, Québec 10, Canada.

CALCUL DES MATRICES DE TRANSITION

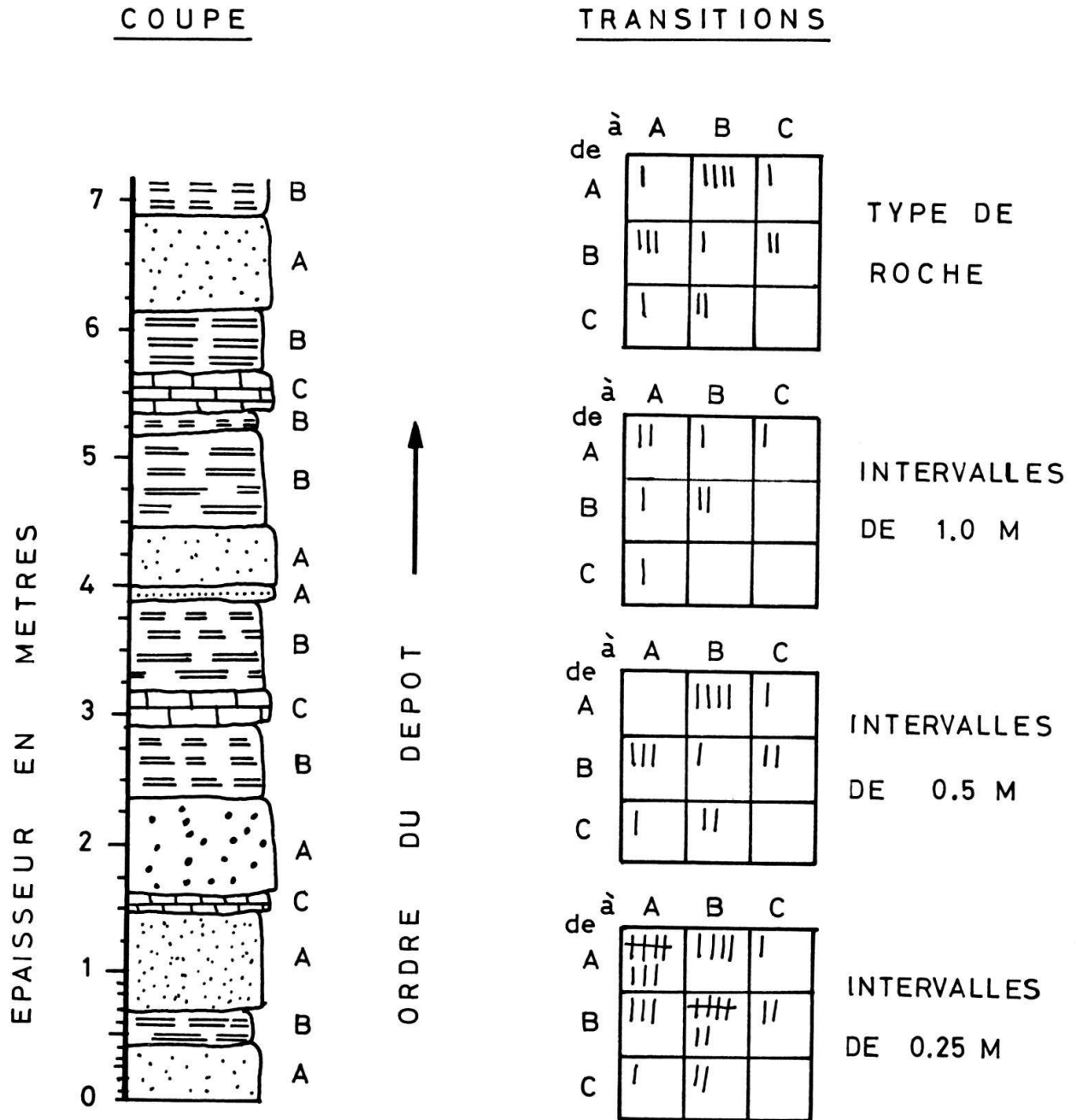


Fig. 1. Coupe stratigraphique fictive et différentes façons d'obtenir les matrices de transition (modifiée d'après KRUMBEIN, 1967).

En bref l'hypothèse est la suivante: l'apparition d'une couche de type donné dépend à la fois du type lithologique qui précède dans l'ordre de déposition et du hasard. Les chaînes de Markov, ou plus généralement les processus stochastiques, sont très fréquents dans la nature (KOCH et LINK, 1971).

Pour établir les probabilités de transition d'un type lithologique à un autre type selon une coupe verticale, il faut d'abord déterminer, à partir de la coupe stratigraphique, la matrice de transition des états selon une technique d'échantillonnage à choisir.

Dans la figure 1 sont montrées quatre possibilités d'échantillonnage avec les matrices de transition respectives. La première matrice de transition est calculée en tenant compte seulement de la succession des types lithologiques. Par exemple dans la coupe présentée, la succession, couche A suivie par la couche B, se rencontre quatre fois. Cette première technique d'échantillonnage ne fait pas intervenir l'épaisseur des bancs. Par contre les trois autres techniques sont basées sur la détermination de la succession des types lithologiques à des intervalles réguliers. Ainsi par exemple, pour des intervalles d'échantillonnage de un mètre, le banc B suit le banc A seulement une fois.

Les intervalles d'échantillonnage affectent la valeur de la matrice de transition. Un intervalle trop petit fait apparaître une grande proportion de transitions des états de même nom alors qu'un échantillonnage trop grand tend à ignorer les bancs minces.

Pour un problème donné il faut donc soigneusement choisir le type et l'intervalle d'échantillonnage afin d'obtenir des résultats cohérents.

A partir de la matrice de transition, on calcule la matrice de probabilité de transition en notant qu'une couche est toujours suivie par l'une ou l'autre des couches en présence, de telle façon que la somme des probabilités de transition d'une couche à toutes les couches de l'état successif vaut un.

Dans notre exemple, les matrices de probabilité de transition pour les types de roche et pour les intervalles de 0,5 mètres et de 0,25 mètres sont les suivantes:

Type de roche	Intervalle 0,50 M.				Intervalle 0.25 M.									
de/à	A	B	C	1,00	de/à	A	B	C	1,00	de/à	A	B	C	1,00
A	0,17	0,66	0,17	1,00	A	0,00	0,80	0,20	1,00	A	0,62	0,30	0,08	1,00
B	0,50	0,17	0,33	1,00	B	0,50	0,17	0,33	1,00	B	0,25	0,58	0,17	1,00
C	0,34	0,66	0,00	1,00	C	0,34	0,66	0,00	1,00	C	0,34	0,66	0,00	1,00

La connaissance des matrices de probabilité de transition permet ensuite de construire des séquences synthétiques qui constituent des coupes verticales possibles.

La matrice de transition contient donc sous forme condensée non seulement la description de la coupe originale mais aussi la description de toutes les coupes possibles liées à une sédimentation de même style. Les séquences stratigraphiques simulées constituent des modèles de la réalité sédimentologique aussi valables que les descriptions d'affleurement et de coupes verticales effectuées par le géologue de terrain.

Le passage du qualitatif tel que la coupe stratigraphique décrite par le géologue au quantitatif tel que la matrice de probabilité de transition requiert des précautions multiples afin d'éviter une application incorrecte des chaînes de Markov à l'analyse stratigraphique.

En particulier, il faut que le nombre de classes lithologiques soit élevé de même que le nombre des transitions afin d'obtenir des estimateurs valables pour la matrice de transition. De plus, il faut que les probabilités de transition ne varient pas trop tout au long de la séquence stratigraphique ce qui se traduit par l'hypothèse de stationnarité.

La très grande simplification des classes lithologiques diminue la finesse descriptive des séquences synthétiques, par contre elle élimine une grande partie de la subjectivité dans la description des coupes stratigraphiques effectuée par différents auteurs.

Données

Nous avons pris en considération les formations molassiques de Suisse romande appartenant aux trois étages Chattien, Aquitaniens et Burdigalien. Comme première approximation nous faisons l'hypothèse de stationnarité, c'est-à-dire l'hypothèse sur le même style de sédimentation et de diagenèse à l'intérieur des formations, en sachant pertinemment qu'on peut très bien diviser chaque formation en différents groupes possédant chacun son propre style de sédimentation, donc sa propre stationnarité. Mais pour le moment, on va s'occuper seulement des trois formations citées plus haut qui montrent des différences sédimentologiques sensibles entre elles, en vue de donner un exemple de simulation géologique.

Dans un travail précédent (FAVINI, 1970) nous avons montré que la loi de distribution des épaisseurs des bancs molassiques est lognormale et nous en avons calculé les estimateurs et les paramètres pour chaque classe lithologique des trois formations. L'échantillonnage était du type aléatoire par grappe basé sur les descriptions d'affleurements molassiques publiées par différents auteurs. Les affleurements sont considérés comme étant répartis au hasard et on prend comme échantillon toutes les épaisseurs des couches situées sur une ligne verticale de l'affleurement.

Les unités lithologiques constituant les bancs sont les grès, les grès marneux et les marno-grès, les marnes, les argiles et les calcaires lacustres d'après une classification généralement admise par la plupart des sédimentologues qui ont travaillé sur le bassin molassique. Dans le Chattien la séquence lithologique complète ou cyclothème est constituée de toutes les cinq unités qui se suivent dans l'ordre, dans l'Aquitaniens la séquence complète va des grès aux argiles et dans le Burdigalien la séquence va des grès aux marnes. L'observation géologique indique cependant que le plus souvent les séquences lithologiques sont incomplètes.

Dans le tableau 1 nous présentons les deux paramètres moyenne et déviation standard des distributions lognormales de chaque type lithologique des trois formations (FAVINI, 1970). Les valeurs sont exprimées en logarithme naturel.

Tableau 1: Paramètres des distributions des épaisseurs [logarithme naturel]

Lithologie	Chattien		Aquitaniens		Burdigalien	
	Moyenne	Dév. st.	Moyenne	Dév. st.	Moyenne	Dév. st.
Grès	-0,55	1,05	0,75	1,25	1,20	1,30
Grès-marneux	-0,33	0,84	-0,15	0,85	0,35	0,85
Marne	-0,60	0,99	-0,55	0,95	0,00	0,80
Argile	-2,00	0,80	-1,20	0,80		
Calcaire lacustre	-1,80	0,84				

Pour le calcul des matrices de transition nous avons utilisé une autre méthode que celle décrite dans les généralités puisque, étant donné le caractère aléatoire par grappe de l'échantillonnage, nous ne possédions pas de coupe complète et représentative des

formations. Nous avons alors utilisé le nombre total des bancs classés par type lithologique et par formation (tableau 2).

Tableau 2: Nombre ou taille des bancs

	Chattien	Aquitaniien	Burdigalien	
Grès	157	127	84	
Grès-marneux	178	141	43	
Marne	249	165	15	
Argile	71	42	-	
Calcaire lacustre	64	-	-	
	717	475	142	1334

Nous pouvons maintenant noter que la somme par ligne et par colonne des éléments de la matrice de transition d'une formation n'est rien d'autre que le nombre total des bancs classés par unités lithologiques. Il s'agit alors de donner une valeur aux éléments de la matrice de transition en tenant compte du nombre des couches. Mathématiquement ce problème possède un nombre infini de solutions obtenues en résolvant un système de $n + n$ équations avec $n \times n$ inconnues. Mais en considérant que les valeurs des solutions doivent être positives et entières et en respectant l'observation géologique qui indique une succession préférentielle des types lithologiques, on arrive à déterminer un petit nombre de solutions pour les matrices de transition qui diffèrent très peu l'une de l'autre.

Le tableau 3 présente les trois matrices de probabilité de transition que nous avons calculées en choisissant les matrices de transition les plus simples.

Tableau 3: Matrices des probabilités de transition

de/\grave{a}	G	G-M	M	A	CL	Chattien
G	0,30	0,30	0,30	0,05	0,05	1,00
G-M	0,15	0,28	0,45	0,05	0,07	1,00
M	0,16	0,19	0,46	0,14	0,05	1,00
A	0,11	0,20	0,05	0,24	0,40	1,00
CL	0,55	0,30	0,05	0,05	0,05	1,00

de/\grave{a}	G	G-M	M	A	Aquitaniien
G	0,26	0,37	0,33	0,04	1,00
G-M	0,30	0,30	0,33	0,07	1,00
M	0,23	0,28	0,41	0,08	1,00
A	0,38	0,12	0,25	0,25	1,00

de/\grave{a}	G	G-M	M	Burdigalien
G	0,59	0,34	0,07	1,00
G-M	0,54	0,27	0,19	1,00
M	0,74	0,18	0,08	1,00

Les lois de distribution des épaisseurs des bancs et les matrices des probabilités de transition constituent les éléments obtenus d'une façon statistique à partir des données géologiques observées et publiées, qui vont nous servir pour la simulation de séries stratigraphiques à une dimension des molasses de Suisse romande.

Simulation

Les étapes qui permettent d'obtenir une séquence simulée à partir des distributions des épaisseurs et de la matrice de transition pour une formation donnée sont les suivantes:

1. choix au hasard de la lithologie du premier banc déposé,
2. choix au hasard de l'épaisseur de ce banc suivant la loi de distribution du type lithologique choisi,
3. choix au hasard de la lithologie du banc successif suivant les probabilités de transition,
4. de nouveau les étapes 2 et 3 jusqu'à l'obtention d'une coupe constituée d'un nombre déterminé à l'avance de bancs.

Le programme d'ordinateur que nous avons établi en modifiant celui publié par KRUMBEIN (1967) fournit la représentation graphique d'une coupe fictive avec des signes distinctifs pour chaque type lithologique et avec les épaisseurs et les épaisseurs cumulées des bancs (tableaux 5, 7).

Dans la figure 2, nous présentons sous forme graphique conventionnelle des coupes verticales simulées obtenues avec les données des tableaux 2 et 3 relatifs aux formations molassiques de Suisse romande. Malgré la faible épaisseur des coupes simulées, 34 mètres, on note cependant la présence de cyclothèmes. D'autres séquences simulées semblables à celles présentées peuvent être calculées. Elles présentent différentes réalisations de coupes verticales unidimensionnelles d'une formation possédant un style de sédimentation et de diagenèse qui ne varie pas beaucoup.

Lorsque le style de sédimentation à l'intérieur d'une formation change graduellement, on peut toujours utiliser les lois de distribution des épaisseurs et les matrices de transition à condition de faire varier d'une façon continue les paramètres et les probabilités. La voie est ainsi ouverte vers l'étude des variations verticales et latérales des lois de distribution et des matrices de probabilité (KRUMBEIN, 1968).

Nous nous bornons à présenter dans ce qui suit deux exemples de simulation verticale, obtenus à partir de matrices de transition fictives avec des probabilités qui varient linéairement entre un minimum et un maximum. Nous ne faisons pas varier les paramètres des distributions des épaisseurs puisque nous avons montré (FAVINI, 1970) qu'en général les paramètres ne diffèrent pas d'une façon significative à l'intérieur d'une formation donnée.

Les matrices de probabilité initiale et finale pour la simulation d'une coupe comprenant 100 bancs sont présentées dans le tableau 4. Nous utilisons pour commodité les types lithologiques et les lois de distribution du Chattien.

La signification de ces deux matrices est la suivante: au début du dépôt, chaque type lithologique possède 50% de probabilité d'être suivi par un grès contre seulement 10% de probabilité au sommet du dépôt; la probabilité d'obtenir une couche marneuse varie de 30% au début à 65% de probabilité à la fin. Une explication analogue peut être fournie pour les autres types lithologiques.

Lors de la simulation, à chaque banc déposé correspond une variation de la matrice des probabilités de transition avec les accroissements suivants pour les types lithologiques successifs: grès $-4^0/_{00}$, grès marneux $-0,5^0/_{00}$, marne $3,5^0/_{00}$, argile $0,5^0/_{00}$, calcaire lacustre $0,5^0/_{00}$.

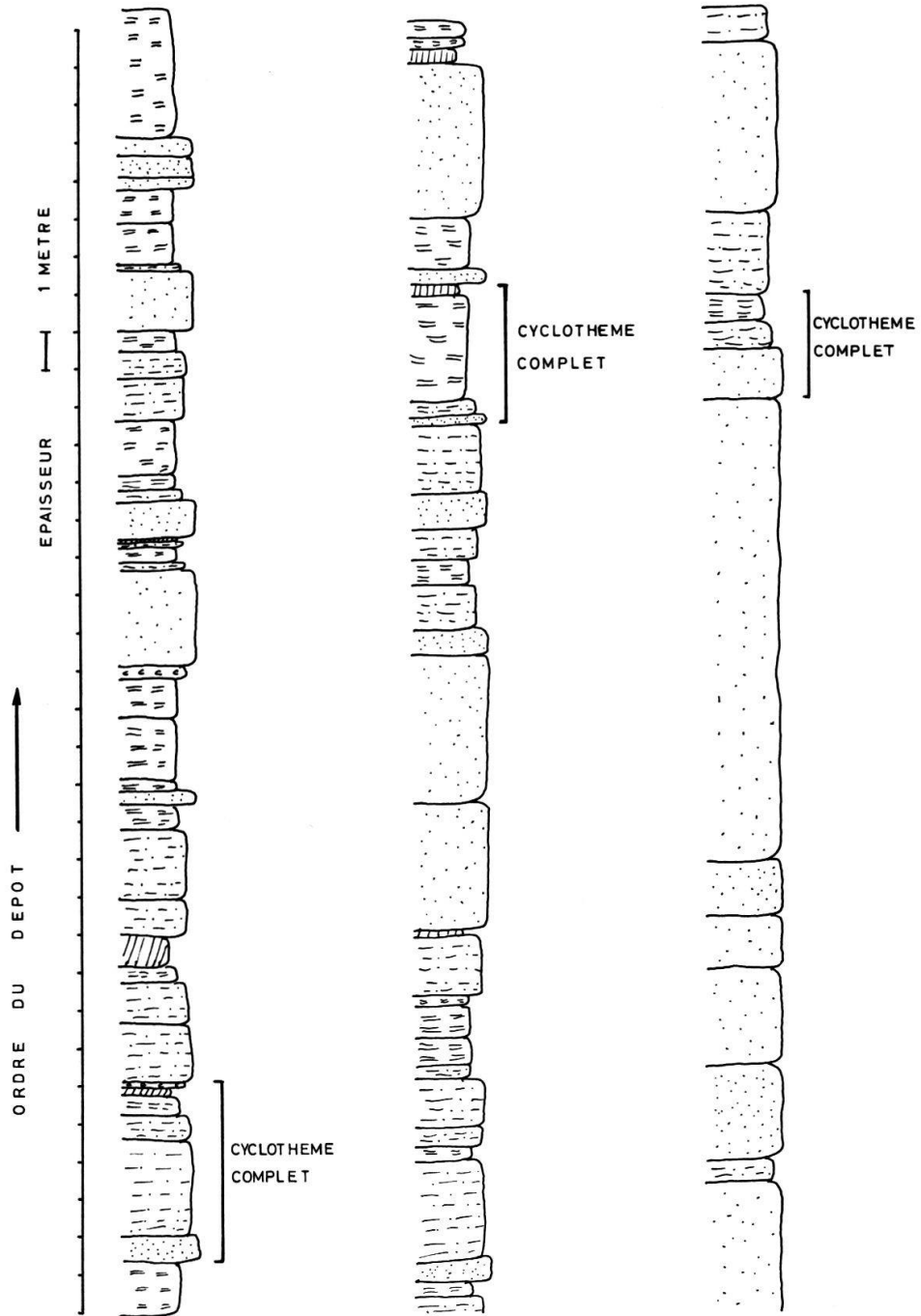
SIMULATION DE SEQUENCES STRATIGRAPHIQUES

FORMATIONS MOLASSIQUES DE SUISSE ROMANDE

CHATTIEN

AQUITANIEN

BURDIGALIEN



L E G E N D E

- | | | |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> CALCAIRE LACUSTRE ARGILE MARNE GRES MARNEUX GRES | <ul style="list-style-type: none"> ARGILE MARNE GRES MARNEUX GRES | <ul style="list-style-type: none"> MARNE GRES ARGILEUX GRES |
|---|---|---|

Fig. 2. Coupes molassiques simulées (distributions lognormales des épaisseurs, FAVINI, 1970).

Tableau 4: Matrices initiale et finale de probabilité

de/à	G	G-M	M	A	CL
G	0,50	0,10	0,30	0,05	0,05
G-M	0,50	0,10	0,30	0,05	0,05
M	0,50	0,10	0,30	0,05	0,05
A	0,50	0,10	0,30	0,05	0,05
CL	0,50	0,10	0,30	0,05	0,05

de/à	G	G-M	M	A	CL
G	0,10	0,05	0,65	0,10	0,10
GM	0,10	0,05	0,65	0,10	0,10
M	0,10	0,05	0,65	0,10	0,10
A	0,10	0,05	0,65	0,10	0,10
CL	0,10	0,05	0,65	0,10	0,10

Le tableau 5 présente le sommet et la base, tels que fournis par l'ordinateur, d'une séquence stratigraphique de 100 bancs simulée avec la matrice initiale du tableau 4 possédant les accroissements décrits dans le paragraphe précédent.

Tableau 5: Sommet et base d'une coupe simulée

No du banc	Epaisseur (m)	Epaisseur cumulée (m)	Coupe (voir légende)
1	0.172	0.172	=====
2	0.162	0.334	*****
3	0.084	0.418	*_*_*_*_*_*_*_*_*_*
4	0.427	0.845	*_*_*_*_*_*_*_*_*_*
5	0.250	1.094	=====
6	1.286	2.380	*****
7	0.951	3.331	*****
8	0.255	3.586	=====
9	0.666	4.252	*_*_*_*_*_*_*_*_*_*
10	0.113	4.365	=====
11	0.748	5.113	*****
12	0.252	5.365	=====
13	0.304	5.669	=====
14	0.036	5.705	=====
15	3.919	9.624	*****
86	0.237	31.134	=====
87	0.244	31.378	*****
88	0.422	31.800	*****
89	4.209	36.009	*****
90	0.338	36.347	*****
91	0.699	37.046	*****
92	0.514	37.560	*_*_*_*_*_*_*_*_*_*
93	0.682	38.241	*****
94	0.356	38.597	*****
95	0.146	38.743	*****
96	0.214	38.957	=====
97	0.106	39.063	*****

98	1.191	40.254	LLLLLLLLL
99	1.009	41.263	LLLLLLLLL
100	0.193	41.457	-----

Légende: ***** grès
 *_*_*_*_*_*_*_* grès marneux
 ===== marne
 ----- argile
 LLLLLLLLL calcaire lacustre

Comme il fallait peut-être s'y attendre, il y a une prédominance de grès à la base de la coupe simulée et une abondance de marnes au sommet. Mais dans d'autres simulations obtenues avec les mêmes matrices de probabilité et d'accroissement de probabilité, il n'existe pas de termes lithologiques prépondérants ni au sommet ni à la base. Ceci correspond assez bien avec la réalité molassique puisque le plus souvent il est impossible de corréliser lithologiquement deux affleurements même voisins, à cause du changement latéral des types pétrologiques. On voit donc que la matrice de transition reflète mieux le style de sédimentation que les coupes stratigraphiques singulières puisqu'elle contient sous forme condensée toutes les coupes verticales appartenant à une région donnée. Par contre la difficulté majeure consiste à établir des estimateurs valables des probabilités et des variations des probabilités de transition.

Un deuxième exemple de simulation est obtenu avec les matrices initiale et finale présentées dans le tableau 6.

Tableau 6: Matrices initiale et finale de probabilité

de/à	G	G-M	M	A	CL
G	0,70	0,20	0,10	0,00	0,00
G-M	0,00	0,70	0,20	0,10	0,00
M	0,00	0,00	0,70	0,20	0,10
A	0,10	0,00	0,00	0,70	0,20
CL	0,20	0,10	0,00	0,00	0,70

de/à	G	G-M	M	A	CL
G	0,05	0,40	0,30	0,20	0,05
G-M	0,05	0,05	0,40	0,30	0,20
M	0,20	0,05	0,05	0,40	0,30
A	0,30	0,20	0,05	0,05	0,40
CL	0,40	0,30	0,20	0,05	0,05

A la base du dépôt, chaque type lithologique possède 70% de probabilité d'être suivi par un banc de même type, 20% de probabilité d'être suivi par le type lithologique qui lui succède dans l'ordre du cyclothème et 10% de probabilité d'être suivi par la deuxième unité lithologique successive.

Au sommet du dépôt, la probabilité pour qu'un type lithologique soit suivi du même type tombe à 5%; par contre les probabilités qu'il soit suivi par les types qui lui succèdent dans le cyclothème sont respectivement de 40%, 30%, 20% et 5%.

Dans le tableau 7 sont reportés le sommet et la base de la coupe simulée qui contient 100 bancs. La légende est la même que pour le tableau 5.

Tableau 7: Sommet et base d'une coupe simulée

No du banc	Epaisseur (m)	Epaisseur cumulée (m)	Coupe (voir légende)
1	0.087	0.087	=====
2	0.434	0.521	*_*_*_*_*_*_*_*_*_*
3	0.496	1.017	*****
4	0.790	1.807	-----
5	0.188	1.996	=====
6	0.258	2.254	*_*_*_*_*_*_*_*_*_*
7	0.449	2.703	*****
8	1.638	4.341	-----
9	0.085	4.425	=====
10	0.180	4.606	*_*_*_*_*_*_*_*_*_*
11	0.247	4.853	LLLLLLLL
12	0.329	5.182	-----
13	0.245	5.427	=====
14	0.065	5.492	*_*_*_*_*_*_*_*_*_*
15	0.764	6.256	*****
86	0.035	55.724	=====
87	0.099	55.823	*_*_*_*_*_*_*_*_*_*
88	0.466	56.289	*_*_*_*_*_*_*_*_*_*
89	0.105	56.394	*_*_*_*_*_*_*_*_*_*
90	1.575	57.969	*****
91	0.585	58.555	*****
92	2.198	60.752	*****
93	0.642	61.394	*****
94	0.355	61.749	*****
95	1.673	63.422	-----
96	0.461	63.883	-----
97	2.217	66.100	-----
98	0.557	66.657	-----
99	0.196	66.852	-----
100	0.301	67.153	*_*_*_*_*_*_*_*_*_*

Cette coupe fictive présente, en accord avec les matrices de transition, une succession de bancs du même type lithologique à la base et une succession de bancs dans l'ordre du cyclothème au sommet.

D'après ce qui précède, nous voyons la possibilité de faire de l'expérimentation numérique en sédimentologie molassique en calculant des coupes fictives qui doivent par la suite être comparées aux données d'observation afin d'établir l'efficacité des modèles proposés.

Discussion et conclusion

Les très simples exemples de simulation que nous avons présentés se situent dans la ligne actuelle de la recherche sédimentologique théorique et pratique. Nous avons uti-

lisé les descriptions surtout qualitatives des affleurements publiés par différents auteurs, en faisant l'hypothèse que les coupes choisies étaient prises au hasard. Tel n'est souvent pas le cas. Même si parfois les sédimentologues font intuitivement une bonne statistique, notamment au moment de l'échantillonnage, les critères qu'ils emploient restent souvent qualitatifs et subjectifs. Nous avons essayé de réduire au minimum l'influence subjective des différents auteurs dans les publications desquels nous avons puisé nos informations géologiques, en augmentant le nombre des publications consultées et en diminuant le nombre des classes lithologiques. Nous obtenons ainsi des informations et des résultats statistiques que nous considérons comme significatifs pour les formations molassiques de Suisse romande.

Les tendances modernes dans la sédimentologie appliquée à la recherche pétrolière et minière sont de faire recours aux mesures des propriétés géométriques, physiques et chimiques des sédiments, obtenues par échantillonnage statistique et de traiter ces valeurs numériques par des méthodes statistiques adéquates. La simulation stochastique devient alors une des méthodes employées à l'heure actuelle pour la connaissance et l'utilisation pour des besoins économiques des bassins sédimentaires.

Remerciements

La présente étude a été subventionnée en partie par le Conseil National de Recherches du Canada. Le temps de calcul sur ordinateur IBM 360/50 a été fourni par le Centre de Traitement de l'Information et le Département de Géologie de l'Université Laval à Québec, Canada.

Bibliographie

- BONHAM-CARTER, HARBAUGH, 1970: «Computer Simulation in Geology» Wiley Interscience.
- FAVINI, G. 1970: «Stratonomie des Formations molassiques de Suisse romande», Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat., Vol. 70, No 33, pp. 383-394.
- KOCH, LINK, 1971: «Statistical Analysis of Geological Data», Vol. 1, 2. John Wiley, ed.
- KRUMBEIN, W. C., 1967: «FORTRAN IV Computer programs for Markov Chain Experiments in Geology.» Computer Contributions 13, Kansas Geological Survey.
- KRUMBEIN, W. C., 1968: «FORTRAN IV Computer Program for simulation of Transgression and Regression with continuous-time Markov models» Computer Contributions 26, Kansas Geological Survey.
- VISTELIUS, A. B., 1967: «Studies in Mathematical Geology» Consultants Bureau, Plenum Press Corp., New York.