

BULLETIN N° 103
ACADÉMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



Séance du Mardi 14 mars 2006

**Conférence du Pr. Jean PETITOT, Directeur du C.R.E.A.,
« Réduction et émergence dans les systèmes sociaux complexes »**

Prochaine séance : le Mardi 11 avril 2006 à 18h :

**Conférence de René DARS, Professeur émérite des universités,
Ancien Doyen de la Faculté des Sciences de Nice,
Président de la Section Nice-Côte d'Azur de l'AEIS
« *Voyages d'un géologue en Afrique au 20^{ème} siècle* »**

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES
MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

PRESIDENT : Michel GONDRAN
SECRETARE GENERAL : Irène HERPE-LITWIN
SECRETARE GENERAL ADJOINT : Noëlle CAGNARD
TRESORIER GENERAL : Bruno BLONDEL
CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :
SCIENCES DE LA MATIERE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUJJI.
SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNOLOGIES : Pr. François BEGON
PRESIDENT DE LA SECTION DE NICE : Doyen René DARS

PRESIDENT FONDATEUR
 DOCTEUR Lucien LEVY (†).
PRESIDENT D'HONNEUR
 Gilbert BELAUBRE
SECRETARE GENERAL D'HONNEUR
 Pr. P. LIACOPOULOS

mars 2006

N°103

TABLE DES MATIERES

P. 3 Compte-rendu de la séance du 14 mars 2006 avec la conférence par le Pr. Jean PETITOT , directeur du CREA sur le thème « *Réduction et Emergence dans les systèmes sociaux complexes* ».

P.4 Un article du Pr. PETITOT qui a inspiré sa conférence intitulé « *Modèles formels de la « main invisible » : de Hayek à la théorie des jeux évolutionnistes* »

P.19 Documents

Prochaine séance : Mardi 11 avril 2006
 MSH, salle 215 à 18h
 Conférence de René DARS,
 Professeur émérite des universités,
 Ancien Doyen de la Faculté des Sciences de Nice,
 Président de la Section Nice-Côte d'Azur de l'AEIS
 « *Voyages d'un géologue en Afrique au 20^{ème} siècle* »

**ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES
SCIENCES**

Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

Séance du
Mardi 14 mars 2006

Maison des Sciences de l'Homme, salle 215, à 18 h.

La séance est ouverte à 18 h. 00 sous la Présidence de Michel GONDRAN et en présence de nos collègues, G. BELAUBRE, B. BLONDEL, N. CAGNARD, Alain CARDON, Michel GONDRAN, I. HERPE-LITWIN, P. MARCHAIS, J. POIRIER
Etaient excusés : Françoise DUTHEIL et Gérard LEVY

Michel GONDRAN ouvre la séance en nous présentant le Pr. Jean PETITOT qui nous avait déjà accordé une conférence intitulée « *Modélisation des architectures fonctionnelles* » lors du congrès « Physique et Conscience » en décembre 2005. Directeur du CREA, Jean PETITOT ancien élève de l'Ecole Polytechnique (promotion 1965), possède également un doctorat d'Etat en Lettres et Sciences Humaines. Il est membre de plusieurs sociétés savantes telles que la *Société Mathématique de France*, *l'International Association for Semiotic Studies* et *l'International Society For Group Theory in Cognitive Science*.

Ses principaux domaines de recherche sont les *Modèles dynamiques en sciences cognitives* et *l'Epistémologie des modèles mathématiques*.

Fervent admirateur des travaux de Hayek, et de l'individualisme méthodologique en opposition aux thèses holistes, planificatrices, développées en sociologie, il nous propose une conférence sur la modélisation des comportements sociaux basée sur un modèle darwinien d'auto-organisation des comportements humains individuels intitulée:

«Réduction et Emergence dans les systèmes sociaux complexes»

Le Pr. Jean PETITOT a eu l'amabilité de nous rédiger un texte complet relatif à cette recherche que nous publions en page 4.

Après la conférence du Pr. Jean PETITOT, le débat prend fin et la séance est levée à 20 heures.

Bien amicalement à vous,

Irène HERPE-LITWIN

Modèles formels de la "main invisible" : de Hayek à la théorie des jeux évolutionnistes

par Jean Petitot

EHESS et CREA, Ecole Polytechnique
petitot@poly.polytechnique.fr

I. LA TENSION CHEZ HAYEK ENTRE MODERNITE ET CONSERVATISME.

1. Science et traditionalité chez Hayek

Dans la critique hayekienne du rationalisme politique et juridique classique hérité des Lumières, il existe une ambiguïté entre :

- (i) une étonnante clairvoyance à propos de sciences d'un nouveau type, les sciences évolutionnistes des organisations complexes et les sciences cognitives, et, dans le même temps,
- (ii) la défense — en matière de sens commun et de règles de conduite — d'un traditionalisme pré-, voire même anti-scientifique.

On a souvent souligné chez Hayek cette ambiguïté entre un avant-gardisme scientifique et un conservatisme politique et on l'a souvent dénoncée comme une sorte de péché antiprogressiste et réactionnaire qui obérerait sa défense et illustration du libéralisme.

2. Vers une science du sens commun

Dans mon intervention *Vers des Lumières hayekiennes* au Colloque de Cerisy organisé en 1999 par Alain Leroux et Robert Nadeau pour commémorer le centenaire de la naissance de Hayek, j'ai essayé d'affranchir la pensée hayekienne d'un tel handicap et de justifier rationnellement le conservatisme apparent de son libéralisme. L'idée directrice était que certains développements scientifiques récents changent complètement les données du problème et permettent de *justifier le conservatisme de (ii) au nom même des avancées scientifiques de (i)*. Les traditions et les règles du sens commun sont le résultat d'une évolution culturelle qui, comme toute évolution, peut être assimilée à un apprentissage collectif sélectionnant des stratégies qui, même si elles ne sont pas optimales, sont en tout cas extrêmement performantes et pratiquement impossibles à trouver de façon planifiée. La maîtrise de la complexité de tels processus évolutionnistes permet d'engendrer par synthèse computationnelle (simulation informatique) des évolutions culturelles virtuelles et d'enrichir expérimentalement le domaine des stratégies héritées du sens commun.

3. La possibilité contemporaine d'un dépassement rationnel du constructivisme

Le développement de ce que l'on pourrait appeler des "sciences du sens commun" est fondamental pour le libéralisme auto-organisateur car il permet de dépasser non seulement philosophiquement mais également scientifiquement certains aspects négatifs du rationalisme constructiviste classique. Hayek critiquait dans le constructivisme le fait "*que c'est uniquement ce qui est rationnellement justifiable, démontrable par l'expérimentation, observable et*

susceptible de faire l'objet d'un rapport qui peut susciter une adhésion (...) et que tout le reste doit être rejeté. Les règles traditionnelles qui ne peuvent être démontrées doivent être rejetées." (PFp. 85)¹

Mais tout change si l'on peut montrer que des règles traditionnelles sont en fait justifiables rationnellement grâce à de nouvelles sciences et démontrables par l'observation grâce à de nouvelles méthodes (synthèse computationnelle) d'expérimentation qui, d'une certaine façon, permettent d'en "démontrer" le bien fondé.

Il existe deux types très différents de connaissances : les connaissances pratiques et les connaissances scientifiques. C'est le premier type de connaissances qui intervient dans la cognition distribuée des agents à rationalité limitée et située. Mais l'un des aspects les plus intéressants des sciences contemporaines concerne précisément le développement de connaissances scientifiques sur les connaissances pratiques. Il existe désormais (serait-ce partiellement) une modélisation mathématique, une synthèse computationnelle et une méthode expérimentale pour les sciences du sens commun. On peut donc penser intégrer ces thèses dans une rationalité naturaliste élargie et unifiée dépassant leur conflit avec les sciences nomologiques classiques.

La possibilité de reprendre sur des bases scientifiques nouvelles la justification hayekienne des institutions libérales ne va toutefois pas du tout de soi épistémologiquement puisque, pour Hayek lui-même, ces institutions sont précisément la conséquence de notre ignorance des mécanismes sociaux et de notre incapacité à les expliquer. Mais il faut bien voir que l'on peut expliquer scientifiquement certaines limites de notre connaissance. Il existe déjà de nombreux exemples de situations de ce type comme, par exemple, dans de nombreux domaines physico-chimiques, l'impossibilité de prévoir l'évolution de systèmes chaotiques pourtant déterministes.

4. Hayek avec Kant

En fait, la meilleure interprétation philosophique de Hayek me paraît être une interprétation critique. En effet, chez Hayek, la critique du rationalisme constructiviste en matière de politique, de droit et de morale est très proche de la critique kantienne de la rationalité métaphysique. Elle relève d'un rationalisme critique fondé sur la thèse d'une *auto-limitation* de la raison découlant elle-même d'une *finitude* constitutive de l'entendement humain. La dénonciation du rationalisme constructiviste est celle d'un rationalisme *inconditionné* qui, au lieu de tirer son efficacité opératoire de son autolimitation même, est victime de la "présomption fatale" d'une toute puissance omnisciente.

Le constructivisme planificateur nie la complexité organisationnelle et élimine l'intelligence collective résultant de l'évolution historique. Or, à cause de l'irréductibilité de la complexité endogène des systèmes organisés, la planification et la prévision sont nocives non seulement en fait mais en droit. Dès qu'elles cessent d'être régulatrices pour devenir normatives et déterminantes, elles font chuter la complexité interne et trivialisent les dynamiques auto-organisationnelles. Elles paralysent la main invisible de Smith,

Les structures organisationnelles ne sont pas récapitulables dans une intelligence individuelle. Il est *cognitivement* impossible de posséder une connaissance complète des causes et des effets des actions; l'information nécessaire sur la société serait tellement énorme et complexe qu'elle serait inintégrable par les agents; il y faudrait une omniscience laplacienne ou un intellect "archétypique" au sens de Kant et non pas un intellect "ectypique" de décideur politique. A cause

¹ / PF ~ La présomption fatale.

de la complexité même de leurs interactions et du caractère distribué des connaissances associées, on ne peut pas aller au-delà de leur coordination cohérentes.

5. L'évolution culturelle comme apprentissage collectif

Sur le plan cognitif (individuel et social), il existe une origine évolutionniste des règles de perception et de conduite, des conventions et des normes. Ces patterns d'action sont le résultat d'une sélection culturelle — donc, répétons-le, d'un apprentissage collectif-historique — fonctionnant comme un processus concurrentiel ayant avantage les groupes les ayant adoptés. Ils permettent d'agir sans devoir à chaque fois récapituler toutes les expériences permettant d'agir. Le sens commun est lui-même un ensemble de connaissances tacites et de schèmes pratiques permettant, en schématisant l'expérience de notre environnement, en la simplifiant et en la ramenant à des situations *génériques* valables par défaut, d'y agir et d'y prévoir sans nous laisser submerger par le haut flux d'informations non pertinentes charriées par sa complexité. Pour Hayek, les normes du sens commun ne sont pas des contraintes mais possèdent une valeur cognitive. Les traditions sont des "savoirs incorporés" d'origine "phylogénétique" (au sens de l'évolution culturelle) et il est par conséquent rationnel de s'y conformer "ontogénétiquement".

II. L'EXEMPLE DES JEUX EVOLUTIONNISTES

J'aimerais maintenant prendre un exemple dans un domaine actuellement en pleine expansion, celui de la théorie des jeux évolutionnistes. Depuis les travaux fondateurs de Robert Axelrod, on a beaucoup travaillé sur certains systèmes complexes adaptatifs "sociaux" pour lesquels on sait analyser les mécanismes causaux sous-jacents. Un exemple typique en est celui du *dilemme du prisonnier itéré* (IPD). On en trouvera une excellente présentation synthétique dans le numéro spécial de *Pour la Science* sur les *Mathématiques Sociales* (juillet 1999) où Jean-Paul Delahaye (Université de Lille) résume des travaux prolongeant ceux de R. Axelrod, W. Poundstone, M. Nowak et K. Sigmund.

1. Le dilemme du prisonnier

Il y a deux joueurs *A* et *B*. Pour chaque comportement possible des joueurs, à savoir *d* = défection (trahir) et *c* = coopération, la matrice du jeu donne les gains (payoffs) des joueurs (en haut à droite de chaque case pour le joueur colonne *A*, en bas à gauche pour le joueur ligne *B*). La matrice fait intervenir 4 gains :

$T = (d, c) =$ Temptation,

$S = (c, d) =$ Sucker

$R = (c, c) =$ Reward,

$P = (d, d) =$ Punishment.

Pour que le jeu soit intéressant il faut que les gains satisfassent les conditions:

$$T > R > P > S \text{ et } (T + S)/2 < R$$

En voici un exemple typique :

	$A(c)$	$A(d)$
$B(c)$	$R = 3$	$T = 5$
	$R = 3$	$S = 0$
$B(d)$	$S = 0$	$P = 1$
	$T = 5$	$P = 1$

Comportements:
 $d =$ défection (trahir), $c =$
 coopération

Gains :
 $T = (d, c) = 5, S = (c, d) = 0$
 $R = (c, c) = 3, P = (d, d) = 1$

Conditions :
 $T = 5 > R = 3 > P = 1 > S = 0$
 $(T + S)/2 = 5/2 < R = 3$

Ce jeu très simple représente une situation où *la rationalité individuelle entre en conflit avec la rationalité collective*.

En effet

- (i) Si le joueur colonne A joue c , alors le joueur ligne B gagne R s'il joue c et T s'il joue d . Comme $T = 5 > R = 3$, B a donc intérêt à jouer d .
- (ii) Si le joueur colonne A joue d , alors le joueur ligne B gagne S s'il joue c et P s'il joue d . Comme $P = 1 > S = 0$, B a donc intérêt à jouer d .
- (iii) Si B est rationnel, il jouera donc d quel que soit le comportement de A . On dit que la stratégie d domine strictement la stratégie c : d fait mieux que c quel que soit le comportement de l'autre joueur.
- (iv) Il en va de même pour A par symétrie.
- (v) Le résultat du jeu est donc $(d, d) =$ (lose, lose), non coopération qui conduit au mauvais gain collectif ($P = 1, P = 1$).
- (vi) Or clairement, la coopération (c, c) — (win, win) conduisant au gain collectif ($R = 3, R = 3$) aurait été une stratégie bien supérieure.

Avec une telle matrice de gain, la double stratégie (d, d) est le seul *équilibre de Nash* du jeu. Le. la double stratégie telle que chaque joueur fait moins bien s'il change de stratégie de façon unilatérale.

On peut généraliser cet exemple de multiples façons, par exemple en introduisant des asymétries, des inégalités larges, un comportement neutre (refus de jouer), des joueurs multiples, des probabilités, etc. Mais le phénomène que nous venons de décrire se révèle *robuste* pour les parties à un seul coup. Comment expliquer alors à partir de ce constat initial la façon dont la coopération peut être sélectionnée évolutivement.

Remarque. La condition $(T + S)/2 < R$ a pour fonction de rendre le quadrilatère des gains associés à $(c, d) - (c, c) - (d, c) - (d, d) - (c, d)$ convexe. Cela est important pour les stratégies mixtes où le joueur colonne A joue c avec la probabilité p et le joueur ligne B joue c avec la probabilité q . L'espérance de gain de B

$$(1-p)qT + pqR + (1-p)(1-q)P + p(1-q)S$$

est alors interne au quadrilatère.

2. Le dilemme du prisonnier itéré (IPD)

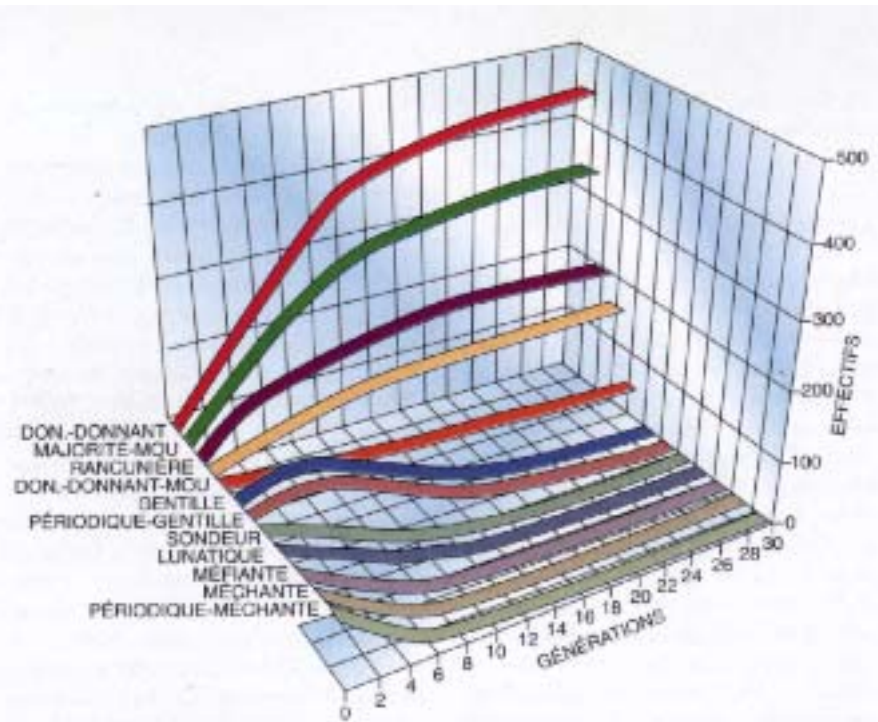
La situation change du tout au tout lorsque l'on *itère* le jeu car la défection peut alors être sanctionnée et la coopération récompensée. On peut dans ce cas introduire de véritables *stratégies*. On suppose le nombre de coups indéterminé pour éviter la *backward induction* (la possibilité de définir une stratégie en remontant à partir des résultats voulus au dernier coup) qui redonne le comportement (d, d) et on teste des stratégies du genre (cf. l'article de J-P. Delahaye) : G = "gentille" = toujours c , M = "méchante" = toujours d ; TFT = "donnant-donnant" (tit for tat) = d'abord c puis jouer ce que l'autre a joué à la partie précédente; R = "rancunière" = c mais toujours d dès que l'autre a trahi une fois, etc. On confronte ces stratégies sur un grand nombre de parties (par exemple 1000) et on étudie leurs scores. La notion d'équilibre de Nash (EN) doit être renforcée car la stratégie (Id, Id) qui itère l'EN (d, d) des parties à un coup reste un EN. Mais comme beaucoup de stratégies donnent le même résultat que Id en jouant contre Id , il y a trop d'EN. D'où le concept plus contraint de "subgame perfect equilibrium" qui est un EN pour tout sous-jeu.

On constate que pour un pool de stratégies simples il y a une supériorité très nette de la stratégie TFT qui ne gagne pas toujours mais est toujours très bien placée (voir figure ci-dessous). De façon générale, les simulations montrent qu'il y a supériorité des stratégies coopératives ("nice"), vite réactives aux trahisons ("retaliatory"), pardonnant rapidement ("forgiving", non rancunières) et simples ("clear", sans ruse).

Si l'on introduit des stratégies imparfaites avec des erreurs il faut des stratégies un peu plus coopératives. C'est le cas du GTFT (G = "generous") étudié par Nowak et Sigmund. Molander a montré que en réponse à d la meilleure réponse est c avec la probabilité

$$\text{Min} \left[1 - \frac{T - R}{R - S}, \frac{R - P}{T - P} \right]$$

$$(R - S, T - P)$$



Compétitions entre stratégies (d'après J.P. Delahaye) . Population de 1200 agents. 12 stratégies représentées par 100 agents chacun. A la stabilisation il n'y a plus que des stratégies coopératives et TFT domine. (Majorité – mou= jouer ce qu'a joué la majorité et si 50% -50% jouer c ; méfiante = TFT avec d initial).

3. Les jeux évolutionnistes

La théorie des jeux évolutionnistes consiste à considérer des *populations* polymorphes d'individus utilisant différentes stratégies et à définir les nouvelles générations à partir des scores obtenus dans une confrontation généralisée. Les stratégies avec bons scores augmentent leurs représentants alors que celles avec mauvais scores disparaissent progressivement. C'est une théorie plus réaliste que les théories classiques de la rationalité individuelle. Elle permet de comprendre par quelles *dynamiques* les agents peuvent atteindre des équilibres.

Soient $\{s_i\}$ les stratégies et $\{p_i\}$ leur probabilité (i.e. la proportion de la population les jouant). On peut supposer que la taille N de la population reste constante. Dans le cas où il n'y a que les 2 stratégies c (avec probabilité = p) et d (avec probabilité = $1-p$), on calcule facilement les espérances de gains ou utilités $U_c(p)$ et $U_d(p)$ de chaque stratégie comme fonction du paramètre p . Rappelons que $T = (d, c)$, $S = (c, d)$, $R = (c, c)$, $P = (d, d)$. Si un agent joue c , la probabilité est p qu'il joue avec un agent c et il gagne alors $(c, c) = R$, tandis que la probabilité est $1-p$ qu'il joue avec un agent d et il gagne alors $(c, d) = S$. Si en revanche l'agent joue d , la probabilité est p qu'il joue avec un agent c et il gagne alors $(d, c) = T$, tandis que la probabilité est $1-p$ qu'il joue avec un agent d et il gagne alors $(d, d) = P$. On obtient ainsi :

$$U_c(p) = pR + (1-p)S$$

$$U_d(p) = pT + (1-p)P$$

Le gain moyen de la population est par conséquent donné par la formule :

$$U(p) = pU_c(p) + (1-p)U_d(p) = p^2R + p(l-p)S - f(1-p)pT + (1-p)^2P$$

soit

$$U(p) = p^2R + p(l-p)(S + D - f(1-p)^2R)$$

Quant à l'évolution des probabilités p , elle est donnée par des *dynamiques de réplication*

$$P' = p(U_c(p) - U(p))$$

4. La stratégie du "tit for tat" : du sens commun aux modèles

Dans ces modèles, les agents sont considérés comme des "phénotypes" exprimant des stratégies "génotypes" et leurs stratégies "micro" influent sur la dynamique "macro" de leur population. Les simulations (synthèse computationnelle) de cette dynamique fournissent des résultats extrêmement intéressants. Pour des stratégies simples comme ci-dessus Axelrod a montré :

(i) Il y a élimination des stratégies anti-coopératives et la coopération s'installe et se stabilise.

(ii) C'est la stratégie *TFT* qui domine, mais dans les cas où il peut exister des mutants elle est *fragile* car les mutants "gentils" I_c ont le même comportement que *TFT* dans un environnement *TFT* et peuvent donc se substituer progressivement au *TFT*; mais alors des mutants "méchants" I_d peuvent facilement les déstabiliser et envahir le système.

(iii) Pour une stratégie, la réactivité aux trahisons est une condition pour être collectivement stable, c'est-à-dire ne pas pouvoir être déstabilisée par un mutant.

(iv) Si l'on introduit des stratégies complexes, alors il peut se produire énormément de phénomènes subtils différents dès qu'il existe au moins trois stratégies en interaction. Par exemple une stratégie non coopérative peut en utiliser une autre pour éliminer les stratégies coopératives et l'éliminer ensuite à son tour. Ou encore le désordre permet à des stratégies non coopératives de survivre et même de gagner, etc.

(v) La maîtrise computationnelle de ces situations permet alors de montrer qu'il existe d'autres stratégies que *TFT* qui sont maximales performantes dans ces contextes élargis. Autrement dit, on peut raffiner le *TFT* sélectionné par le sens commun.

Bref on constate "expérimentalement" (au sens de la synthèse computationnelle) une extrême complexité des dynamiques possibles.

Nous rencontrons ici un exemple typique de *modèle du sens commun* :

(i) Les simulations confirment un sens commun politique, social, pédagogique qui constitue un savoir incorporé et permet d'agir de façon efficace sans avoir à répéter indéfiniment les mêmes expériences décevantes.

(ii) Mais dans le même temps elles permettent de dépasser le sens commun, non pas en lui donnant tort, mais en sélectionnant des règles en quelque sorte d'"hyper" sens commun dans le cadre *expérimental* (au sens de la synthèse computationnelle) d'évolutions culturelles *virtuelles*.

Les jeux évolutionnistes sont intéressants dans la mesure où ils remplacent une intelligence rationnelle individuelle surhumaine (irréalisable) par l'intelligence collective (réalisable) d'une population d'agents en interaction dont la rationalité et les ressources cognitives sont limitées. L'optimisation n'est plus individuelle mais collective et peut être obtenue *sans hypothèse de rationalité individuelle forte*. Elle relève d'un sens commun "artificiel" mimant le sens commun "naturel".

5. Les généralisations de Sigmund et Novak

Un certain nombre d'auteurs ont étudié des facteurs qui favorisent la coopération dans l'IPD lorsque l'on change l'espace des stratégies, les processus d'interaction et les processus d'adaptation (i.e. les changements de stratégie des agents par apprentissage). En particulier, l'introduction de relations "topologiques" de "voisinage" entre agents autorise pour chaque agent un apprentissage imitant le voisin qui a fait le meilleur score. L'évolution des stratégies par algorithmes génétiques a également des effets très importants.

On peut ainsi modéliser de très nombreux systèmes. Considérons par exemple des stratégies simples(i,p,q) où :

i = probabilité initiale de coopération,

p = probabilité de coopération au coup suivant si l'autre coopère,

q = probabilité de coopération au coup suivant si l'autre trahit.

On a trivialement $I_c = (1,1,1)$, $I_d = (0,0,0)$, $TFT = (1,1,0)$, $c_p = (p,p,p)$ (toujours c avec la probabilité p). On a aussi $GTFT = (1,1, \text{Min} [1 - \frac{T-R}{R-S}, \frac{R-P}{T-P}])$

Sigmund et Nowak ont montré que les I_d peuvent gagner au début. Mais les TFT résistent. Une fois que les "gentils" (suckers) le ont été décimés, les exploiters ne peuvent plus les exploiter et les stratégies coopératives de type TFT s'imposent. Après avoir permis l'émergence de la coopération, elles sont elles-mêmes dépassées par des GTFT. Mais la stratégie GTFT est fragile et permet le retour des I_d . Une stratégie qui résiste bien à I_d est la stratégie "pavlovienne" de Kraines : c après R ou T, d après P ou S.

6. Les IPD spatialisés de Nowak et May

Pour les IPD *spatiaux* il existe une "topologie" telle que chaque agent possède certains voisins avec qui il interagit. Pour un voisinage à 4 voisins *renouvelés* à chaque période et pour un processus d'évolution consistant à imiter le voisin ayant fait le meilleur score, Axelrod obtient les résultats suivants: pour des probabilités (i,p, q) initiales de (0.5, 0.5, 0.5) distribuées aléatoirement, ceux qui coopèrent presque toujours (les "gentils", les "suckers" J) sont éliminés par ceux qui trahissent presque toujours (les "méchants", les "meanies" M) dont la stratégie se propage.

Dans un tel système, l'émergence de la coopération est impossible. En revanche si les voisins sont fixes (au lieu de changer à chaque période), alors les stratégies défectives ne peuvent plus envahir le système. C'est au contraire la stratégie *TFT* qui domine et se généralise car si 2 agents *TFT* apparaissent par mutation et se rencontrent, ils font aussitôt école et leur stratégie se propage jusqu'à envahir le système. Par exemple, dans un tel système un S avec trois voisins *TFT* et un voisin M issu d'une mutation est éliminé par le M qui gagne. Mais ensuite *les M* doivent interagir entre eux avec uniquement des voisins *TFT*. Comme ce sont alors les *TFT* qui gagnent, les *M* se convertissent à *TFT*. Autrement dit, les fluctuations *M* sont *récessives*. C'est la base des propriétés de *stabilité*, dans ce contexte, des stratégies évolutionnairement stables comme *TFT* qui ne peuvent pas être déstabilisées par des envahisseurs mutants.

Nowak et May ont en particulier étudié les systèmes définis sur un réseau carré à 8 voisins par la matrice:

	$A(c)$	$A(d)$
(c)	$R = 1$	$T = b$
(d)	$S = 0$	$P = 0$

comportements
 d = défection, c = coopération

Gains:

$T = (d, c)$ = Temptation,

$S = (c, d)$ = Sucker,

$R = (c, c)$ = Reward,

$P = (d, d)$ = Punishment

Conditions:

$T = b > R = 1 > P = 0 = S = 0$

avec par exemple une configuration aléatoire initiale de 50% de c et de 50% de d . b est le paramètre du système. On compare les scores (la somme des gains du site et de ses 8 voisins) et le site adopte la stratégie du site de son voisinage (lui + ses 8 voisins) qui a obtenu le meilleur résultat. On trouve :

(i) pour $b < 1.8$, c domine;

(ii) pour $b > 2$, d domine;

(i) pour $b \in B_c = [1.8, 2]$ (intervalle critique), Zhen Cao et Rudolph Hwa ont montré qu'il y a une transition *critique* $c \rightarrow d$, avec des clusters multi-échelle emboîtés de c et de d .

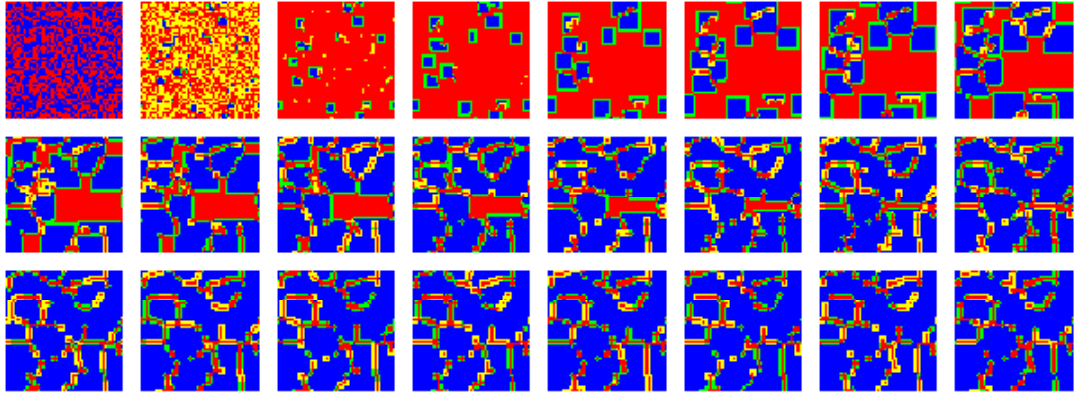
Voici un exemple de ce phénomène obtenu avec une implémentation *Mathematica*TM due à Richard Gaylord et Kazume Nishidate. Le code couleur des stratégies est :

c puis $c - c =$ bleu; d puis $d = d - d =$ rouge;

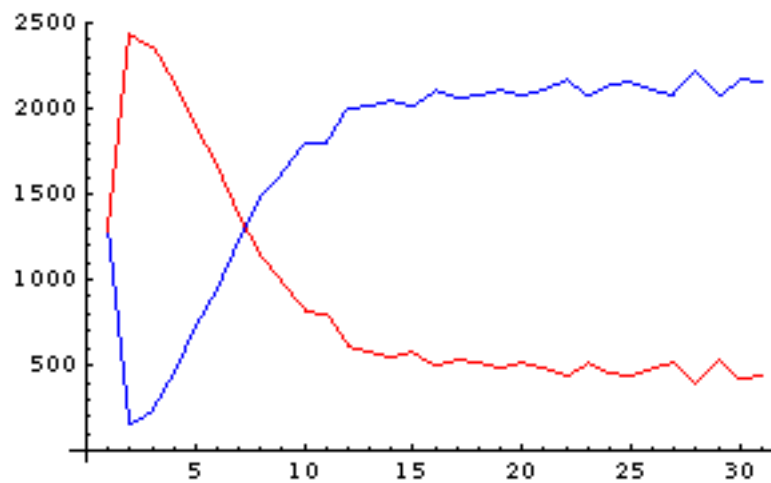
c puis $d = c - d =$ jaune; d puis $c = d - c =$ vert.²

Pour $b = 1.5$ et une configuration initiale "InitConfig" 50%-50%, on voit que $c - c$ domine assez vite, mais uniquement à travers un processus d'extension de noyaux ayant résisté à une phase initiale catastrophique d'élimination. La domination laisse d'ailleurs subsister des lignes de fracture $d - d$ sur lesquelles les comportements oscillent.

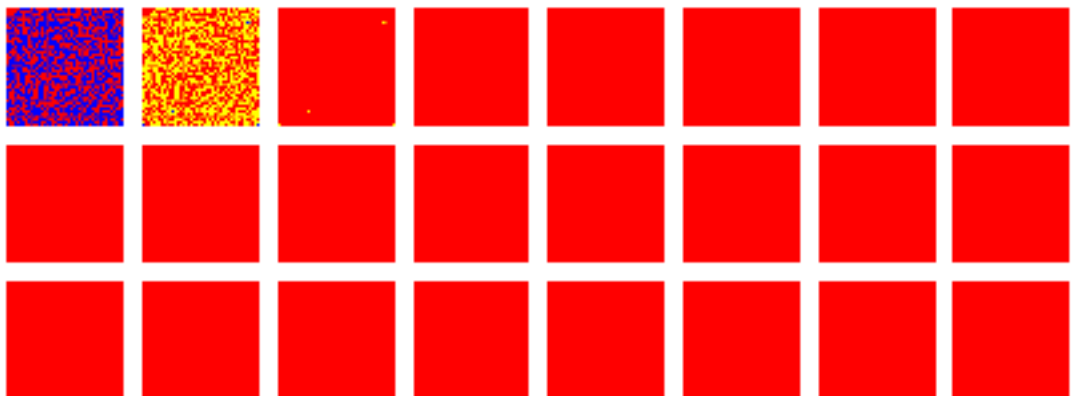
² Il ne faut pas confondre les notations de type (c,d) disant que deux joueurs différents jouent respectivement c et d et les notations de type c-d disant que le même joueur joue d'abord c puis d.



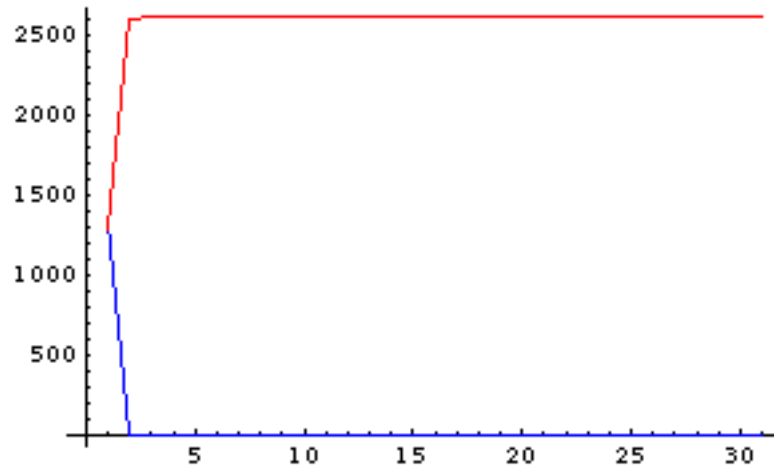
Si l'on représente l'évolution au cours du temps des sous-populations $c-c$ et $d-d$ on voit très nettement ces phénomènes de décimation initiale suivi d'une reconquête et d'oscillation.



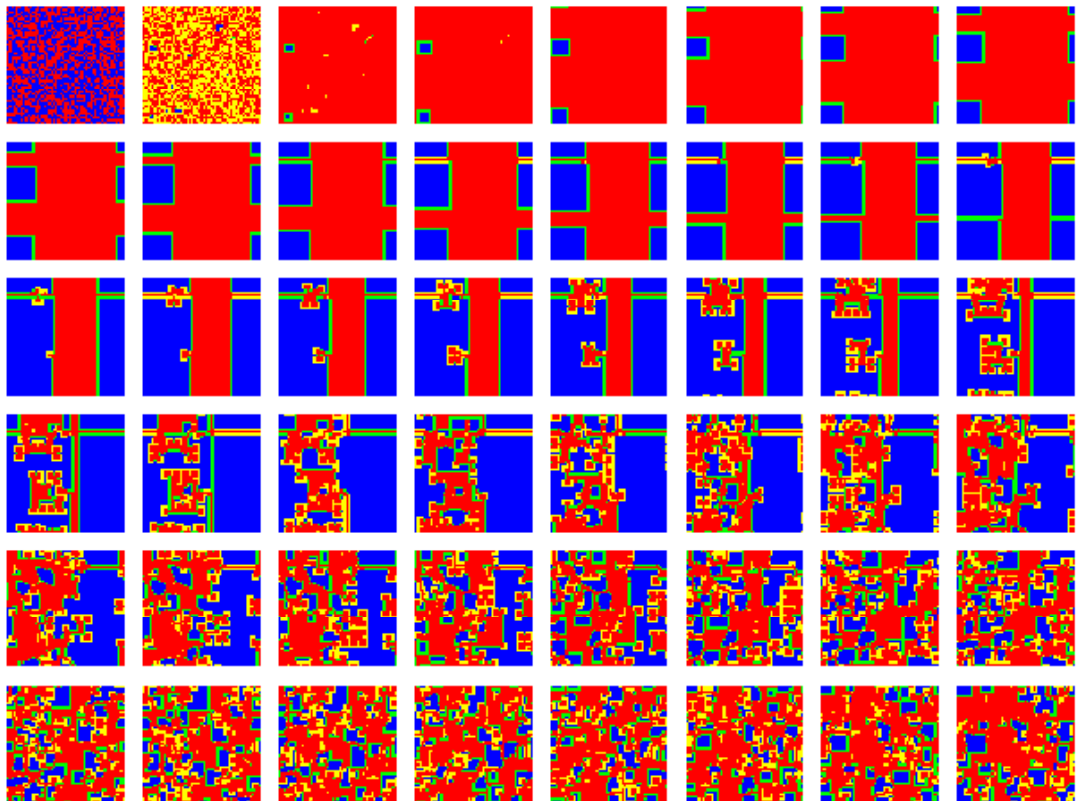
Pour $b = 2.1$ et une InitConfig 50%-50%, on voit que d domine encore plus vite et cette fois directement sans partage.



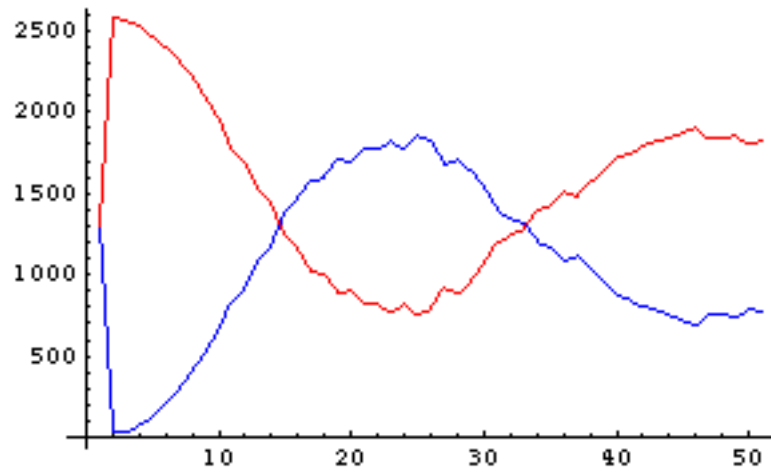
Cela se voit très bien sur les courbes d'évolution:



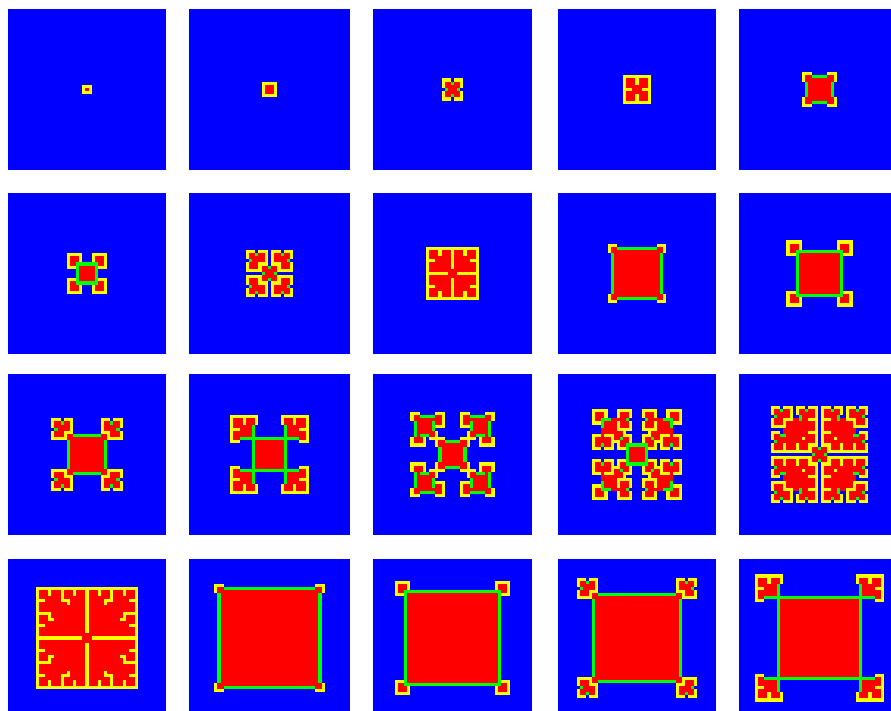
Voici un troisième exemple pour une valeur du paramètre $b = 1.85$ appartenant à l'intervalle critique et une InitConfig 50%-50%, On voit que $d-d$ commence par dominer, puis que $c-c$ commence à reconquérir du terrain à partir de noyaux ayant résisté à la décimation initiale, mais que contrairement à ce qui se passait pour l'exemple $b = 1.5$, se constituent ensuite des clusters multi-échelle de c et de d .



Cette dynamique se lit très bien sur les courbes d'évolution où les courbes $c-c$ et $d-d$ subissent, en plus de leurs petites oscillations, des oscillations de grande échelle qui les font se croiser et recroiser.



La configuration initiale joue évidemment un grand rôle dans l'évolution du système. Voici un exemple for $b = 1.85$ et une InitConfig réduite à *un seul d-d initial* dans une population purement *c-c*. On voit que, faute de réactivité, cet état prolifère et envahit progressivement le système.



David Chavalarias a considérablement étendu ce paradigme des jeux spatialisés de Nowak et May en enrichissant le type de règles susceptible de diffuser par mimétisme.

7. La confirmation par les algorithmes génétiques

On peut approfondir encore les choses en introduisant des algorithmes génétiques. Dans un processus d'apprentissage il y a toujours 4 composantes :

- (i) le domaine d'apprentissage,
- (ii) le training set (ensemble d'exemples associant des inputs à des outputs),

- (iii) le système d'apprentissage lui-même,
- (iv) les tests de la capacité qu'a le système d'effectuer correctement des généralisations et des inductions à partir des exemples et d'appliquer les règles apprises à de nouvelles données.

La programmation génétique est un ensemble d'algorithmes d'apprentissage formalisant l'évolution naturelle darwinienne. L'évolution y est conçue comme un apprentissage sur le long terme issu de l'expérience collective d'un grand nombre de générations dans une population. Ses conditions de possibilité sont :

- (i) la reproduction des individus dans la population,
- (ii) une source de variabilité par mutation,
- (iii) l'hérédité,
- (iv) la compétition pour l'appropriation de ressources finies et la sélection.

Dans la programmation génétique

- (i) on considère des populations d'individus supports "phénotypiques" de programmes "génotypes",
- (ii) on fait opérer sur les structures formelles constitutives des programmes des opérateurs génétiques de cross over (on échange deux sous-programmes de programmes "parents"), de mutation (on remplace un fragment de programme par un autre) et de reproduction (on copie l'individu et on le rajoute à la population), et enfin
- (iii) on simule l'évolution d'une population au moyen d'une sélection qui est fondée sur une fonction de fitness avec les données, fitness qui sélectionne les programmes destinés à être améliorés.

Des travaux comme ceux de Dupuy et Torre (1999) montrent que l'usage des algorithmes génétiques confirment l'excellence opératoire du tit for tat.

Conclusion

Nous avons vu sur des exemples simples de jeux évolutionnistes comment et pourquoi une règle bien connue du sens commun comme la stratégie du tit for tat dans les situations de coopération/défection se révélait être particulièrement opératoire, et comment le fait que cette effectivité avait pu entraîner sa sélection par l'évolution culturelle était lui-même modélisable.

A partir de l'accumulation de nombreux exemples de ce genre on peut défendre la thèse qu'il existe désormais (serait-ce partiellement) une synthèse computationnelle et une méthode expérimentale pour des "sciences hayekiennes" qui seraient des sciences des normes du sens commun. En y mettant le prix — comme on le fait pour l'astrophysique, les programmes spatiaux, la météorologie ou le séquençage du génome — on pourrait donc commencer à simuler les thèses hayekiennes, par exemple sur la justice sociale, et voir si les modèles lui donnent véritablement raison .

Cela permettrait d'intégrer ces thèses dans une rationalité naturaliste élargie et unifiée dépassant leur conflit avec les sciences nomologiques classiques. De même que pour un physicien actuel il n'y a plus aucune exception ontologique des systèmes chaotiques imprédictibles (par exemple turbulents) par

rapport aux systèmes mécaniques classiques comme les systèmes keplériens, mais "seulement" des différences entre des systèmes dynamiques complètement intégrables et des systèmes dynamiques non linéaires présentant de fortes propriétés d'instabilité et de sensibilité aux conditions initiales; de même que pour un biologiste actuel il n'y a plus d'exception ontologique du vivant mais "seulement" un saut dans la complexité de mécanismes macromoléculaires; de même que pour un cognitiviste actuel il n'y a déjà pratiquement plus d'exception ontologique de la conscience mais "seulement" des propriétés naturelles d'un certain type de certains systèmes de traitement de l'information; de même, si nous suivons le chemin des "sciences hayekiennes" de la main invisible et du sens commun, il n'y aura bientôt plus d'exception ontologique de l'humain (du symbolique et du social) mais "seulement" un autre saut dans la complexité des mécanismes informationnels et organisationnels.

bibliographie

- Axelrod R., Cohen M., Riolo, R., "The Emergence of Social Organization in the Prisoner's Dilemma: How Context Preservation and other Factors Promote Cooperation", *Santa Fe Institute Working Paper*, 99-01-002 (1998).
- Binmore, K., *Playing Fair*, Cambridge, MIT Press, 1994.
- Cao, Z., Hwa, R., "Phase transition in evolutionary games", *Intern. Jour. of Modern Physics A*, 14, 10, (1999), 1551-1559.
- Delahaye J-P., Mathieu P., "Des surprises dans le monde de la coopération", *Les Mathématiques sociales, Pour la Science*, 58-66, 1999.
- Dupuy J-P., *Le sacrifice et l'envie*, Paris, Calmann-Lévy, 1992.
- Dupuy J-P., "Rationalité et irrationalité des choix individuels", *Les Mathématiques sociales, Pour la Science*, 68-73, 1999.
- Dupuy, C., Torre, A., "The morphogenesis of spatialized cooperation relations", *European Journal of Economic and Social Systems*, 13, 1, (1999), 59-70.
- Hayek, F., *The Sensory Order: An inquiry into the Foundations of Theoretical Psychology*, Chicago: U. of Chicago Press, 1952.
- Hayek, F., *Law, Legislation and Liberty*, London: Routledge & Kegan Paul, 1982.
- Hayek, F., *The Fatal Conceit*, London-New York, Routledge, 1988.
- Hofbauer J., Sigmund K., *The Theory of Evolution and Dynamical Systems*, Cambridge UP, 1988.
- Kirman A., "La pensée évolutionniste dans la théorie économique néoclassique", *Philosophiques*, XXV, 2, (1998), 219-237.
- Laurent, A., *L'individualisme méthodologique*, Que sais-je ? n° 2906, Paris, PUF, 1994.
- Livet P., "Jeux évolutionnaires et paradoxe de l'induction rétrograde", *Philosophiques*, XXV, 2, (1998), 181-201.
- Nadeau, R., "L'évolutionnisme économique de Friedrich Hayek", *Philosophiques*, XXV, 2, (1998), 257-279.
- Nemo, P., *La société de droit selon F.A. Hayek*, Paris, PUF, 1988.
- Nemo, P., *Histoire des idées politiques aux Temps modernes et contemporains*, Paris, PUF, 2002.
- Petitot, J., "Vers des Lumières hayekiennes : de la critique du rationalisme constructiviste à un nouveau rationalisme critique", Colloque de Cerisy *Friedrich Hayek et la philosophie économique* (A. Leroux et R. Nadeau eds), *Philosophie économique*, 2, (2000), 9-46.
- Poundstone, W., *Prisoners Dilemma*, Oxford UP, 1993.
- Samuelson, L., *Evolutionary Games and Equilibrium Selection*, Cambridge, MIT Press, 1997.
- Weibull, J., *Evolutionary Game Theory*, Cambridge, MIT Press, 1996.

Documents

Le Pr. René DARS, géologue, ancien Doyen de la faculté de Nice, qui a été témoin et acteur de l'évolution considérable de la géologie au 20^{ème} siècle relate dans sa conférence la part qu'il a prise à cette évolution à l'occasion de ses travaux menés un peu partout en Afrique pendant 50 ans.

En complément de cette conférence, nous avons choisi de vous donner ci-après deux textes extraits de son ouvrage, « Que-sais-je » n° 525 « *La Géologie* » publié en 1992, qui illustrent la vision des géologues et leur apport dans l'histoire de la Terre et de l'apparition de la vie :

p.20 : « Le temps des géologues »

p. 28: « L'origine et l'histoire de la vie sur terre »

EXTRAIT DU QUE-SAIS-JE n° 525 « LA GEOLOGIE »
par le Pr. René DARS
2^{ème} PARTIE
LA GEOLOGIE SCIENCE HISTORIQUE

Chapitre V
LE TEMPS DES GÉOLOGUES

I. - Le temps des hommes

A l'échelle d'une vie d'homme, l'unité de temps est la seconde (durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 123). Les physiciens nous disent que cette définition n'est pas tout à fait parfaite.

II. - Le temps des géologues

La seconde - et, éventuellement ses sous-multiples - est utilisée par les géologues pour les manifestations actuelles de l'activité du globe, comme les tremblements de terre (*cf.* chap, I) et les éruptions volcaniques. Par exemple, le volcan Saint Helens, situé au nord-ouest des Etats-Unis d'Amérique, dans l'Etat de Washington, est entré en éruption le 18 mai 1980, à 17 h 32. Une série de photographies bien repérées a permis de préciser qu'en quelques minutes une avalanche de boue et de débris avait dévalé les pentes à une vitesse dépassant 200 km à l'heure en détruisant tout sur son passage. Mais, pour repérer les principaux événements de l'histoire de la Terre depuis son .origine (4600000000 d'années), la seconde, ni même l'année ne suffisent pas car elles sont trop petites. Ce n'est que pour l'aventure de notre espèce, née il y a environ 2 000 000 d'années - et spécialement depuis le début du Néolithique (*cf.* chap. VI) -- que l'on peut manier commodément l'année.

I. - L'échelle relative des temps géologiques

Pendant longtemps, l'échelle des temps de la géologie a été une échelle relative basée sur trois principes fondamentaux appliqués au cours de l'examen de la succession des couches de terrain ou strates:

- *le principe de superposition* : une couche de terrain est plus jeune que celle qu'elle recouvre et moins jeune que celle qui la recouvre ;
- *le principe de continuité* : une couche de terrain qui se suit en continuité a partout le même âge ;
- *le principe d'identité paléontologique* : des couches de terrain qui contiennent les mêmes Fossiles ont le même âge.

Les deux premiers principes permettent de faire des corrélations locales ou à courtes distances entre des affleurements de sédiments déposés dans un même environnement dont l'extension dépasse rarement une centaine de kilomètres. Ils ne sont pas applicables à l'échelle d'un continent ni, *a fortiori*, d'un continent à l'autre. En revanche, le principe d'identité paléontologique permet des corrélations à toutes les échelles, y compris celle du globe. C'est sans doute à Smith, au début du XIX^{ème} siècle, que l'on doit l'idée de caractériser une strate par l'assemblage des fossiles qu'elle contient. Cet assemblage peut même se rencontrer dans des roches de nature différente mais formées à la même époque. Plus tard, l'observation que les formes des fossiles se modifiaient avec le temps, qu'elles évoluaient, a permis d'établir qu'à chaque époque correspondait une association de fossiles bien spécifique, dont les variations éventuelles, dues à la géographie, étaient comprises et expliquées. C'est grâce à ces principes que la première carte géologique a été dessinée par Smith, dès 1815.

Depuis cette époque, le travail patient des stratigraphes, souvent géologues amateurs (dans le sens de « qui aime »), avait conduit à l'établissement, pour le globe tout entier, d'une échelle de temps relative complète, de la fin du Précambrien jusqu'aux temps actuels : des terrains les plus anciens aux plus récents ; mais on ne savait rien sur les durées respectives des coupures opérées dans le temps et qui définissaient ce que nous appelons les *étages*, les *séries*, les *systèmes*, les *périodes*, voire les *ères*,

La découverte de la radioactivité naturelle par Abel Niepce de Saint-Victor (1858), puis sa redécouverte par Becquerel en 1896 et l'idée de l'utilisation de la désintégration atomique comme chronomètre géologique, due à Lord Rutherford en 1908, ont changé cette situation et, maintenant, nous avons introduit les nombres dans notre échelle relative.

IV. - L'échelle radiométrique des temps géologiques

Si tout le monde a entendu parler de la méthode dite au carbone 14, il faut savoir qu'elle ne peut s'appliquer qu'à des objets particuliers (renfermant du carbone) et ne saurait donner des âges supérieurs à 40000 ans environ. Pour déterminer l'âge des roches ou pour dater certains événements qui ont affecté les roches, les géochronologistes font appel à la désintégration d'autres éléments.

1. Le principe. - Le principe de base de la méthode est relativement simple. Un élément radioactif, instable, tel ^{235}U , se désintègre spontanément par modification de son noyau en un élément plus stable. On dit encore : un isotope père radioactif se désintègre en donnant naissance à un isotope fils non radioactif, dit radiogénique. On a établi que la quantité d'isotope père qui disparaît ou encore que la quantité d'isotope fils qui naît ne dépend que du temps. Le processus est indépendant de tout autre facteur physique tel que température, pression ou milieu environnant. On a pu établir la loi qui relie père, fils et temps. De ce fait, en mesurant la quantité d'isotope père qui subsiste actuellement et la quantité d'isotope fils créé, on peut calculer l'intervalle de temps qui les sépare du début du phénomène, du début du fonctionnement de cette horloge géologique.

Le temps nécessaire pour que la moitié d'une quantité d'un isotope père se désintègre est la période. Plus la période est grande, plus l'élément radioactif est apte à mesurer des âges élevés. C'est pourquoi le rubidium 87, qui, en se désintégrant donne du strontium 87 et possède une période de 48,8 milliards d'années, est un de nos meilleurs chronomètres.

Mais il existe d'autres couples de grande utilité :

- uranium 238 - plomb 206 de période $4,5 \cdot 10^9$ ans ;
- potassium 40 - argon 40 de période $1,25 \cdot 10^9$ ans avec ses dérivés : argon 39 - argon 40 classique et, depuis peu, argon 39 - argon 40 avec utilisation de la sonde laser ;
- le dernier couple, le plus difficile à maîtriser et donc le plus récent qui ait été mis au point, est samarium 147 - néodyme 143. Sa période, $106 \cdot 10^9$ ans, explique qu'il soit le dernier-né de nos techniques de mesure du temps - mais aussi qu'il ait permis des progrès remarquables dans la connaissance de l'Archéen. La transformation d'un isotope radioactif en un isotope radiogénique s'accompagne d'émissions de rayons divers, de captures d'électrons ou de fissions spontanées. Le principe est simple, certes, mais les applications ont nécessité beaucoup d'efforts : les isotopes utiles sont en faibles quantités dans les minéraux des roches et leur mesure précise n'a été possible que grâce à l'arsenal des techniques de pointe de la physique et de la chimie nucléaires. L'outil essentiel a été le spectre-mètre de masse dont les perfectionnements ont été constants.

C'est à l'occasion des grands programmes de recherche sur la Lune des années 70 qu'ont été atteintes les précisions du dix-millième au cent-millième qui ont permis, par exemple, la mise au point de la méthode samarium-néodyme, laquelle a valu à C.-J. Allègre le prix Crafoord, en 1986.

2. Sur quelques méthodes de datation radiométrique (fig. 30).

Trois des quatre isotopes du plomb sont radioactifs, ils sont l'aboutissement de la désintégration de ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th et sont à l'origine de la *méthode U- Th-Pb* et de sa dérivée, la *méthode Pb-Pb*. C'est grâce à elles que Patterson a, dès 1956, daté des météorites et, partant, fixé à cinq milliards d'années l'âge maximal de la Terre. Les mesures ultérieures ont précisé ces données et on s'accorde pour considérer que la Terre, comme les météorites, sont nées dans l'intervalle 4,5 à 4,6 milliards d'années.

Méthode	Réaction globale	Période** (ans)
Samarium-Néodym	$^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd} + \alpha$	106. 109
Rubidium-Strontium	$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr} + 4\beta$	$48,8 \cdot 10^9$
Thorium- Plomb	$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + 6^4\text{He}$	$14,01 \cdot 10^9$
Uranium-Plomb	$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8^4\text{He}$	$4,468 \cdot 10^9$
	$^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb} + 7^4\text{He}$	$0,704 \cdot 10^9$
Potassium- Argon	$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar} + \gamma$	$1,25 \cdot 10^9$
Carbone 14	$^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + \beta$	$5,568 \cdot 10^3$

* La période est le temps nécessaire pour que la quantité d'un élément radioactif diminue de moitié

Fig. 30. - Principales méthodes de datation radiométrique

Cette méthode a permis de dater à 3,8 Ma des roches du Groenland et du Canada, considérées jusqu'à il y a peu comme les plus vieilles roches du globe.

Un perfectionnement récent résulte de l'utilisation d'une microsonde ionique. Grâce à cet outil, il est possible d'analyser des fragments très ténus (de l'ordre de 2ng) en différents endroits d'un même échantillon de minerai. On a pu ainsi observer que les zonations de certains cristaux de zircon s'étaient formées à des moments différents et, donc, que l'histoire de la roche analysée était plus complexe que ne le faisaient penser les premières analyses et datations des roches totales. De grands progrès sont à attendre de cette nouvelle technique qui a permis de dater de $3\,962 \pm 3$ Ma des zircons d'une formation canadienne, les gneiss d'Acasta (Canada) qui sont, actuellement, les roches les plus anciennes du globe.

La *méthode samarium-néodyme*, en plus de ses qualités de traceur, rend de grands services dans la géochronologie des roches très anciennes. Elle a permis de confirmer les âges de la formation des gneiss d'Acasta.

Le *couple rubidium-strontium* est très souvent utilisé pour la datation des granités mais a donné également des âges de brèches lunaires.

La *méthode potassium-argon* a fourni l'échelle radiométrique des inversions du champ magnétique terrestre à l'origine de l'échelle géomagnétique (*cf. ci-après*) qui remonte jusqu'à 200 Ma. Mais des progrès techniques récents permettent de prévoir son utilisation jusqu'aux âges les plus reculés. Grâce à une sonde à laser continu, à puissance variable (entre 4 et 15 W), Derek York a obtenu, par la méthode $^{40}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$, 121 âges sur une section de minéral de 1 mm^2 . Il a pu dresser une carte de répartition de ces âges permettant la discussion des résultats.

C'est ainsi qu'a été démontrée l'existence, au sein de ponces volcaniques du Massif central, d'éléments plus anciens arrachés à la croûte hercynienne (- 330 Ma) par le magma, au moment de sa montée vers la surface, il y a 580 000 ans.

V. - L'échelle paléomagnétique des temps

Nous avons vu qu'une des démonstrations de la tectonique des plaques est due à l'existence d'inversions du sens du champ magnétique terrestre (*cf. chap. I*). La mise en évidence, à la fin des années 50, par des magnétomètres embarqués, des zones d'anomalies magnétiques réparties en bandes plus ou moins régulières, parallèlement à l'axe des dorsales et de manière symétrique, a conduit à l'idée fondamentale que le fond des océans, basaltique, naissait dans les dorsales et se déroulait ensuite de part et d'autre, en direction de fosses de subduction d'où il repartait vers la profondeur.

Les âges des différentes bandes (numérotées) ont été mesurés soit par les méthodes radiométriques (essentiellement $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ar}$) sur les laves du plancher océanique, soit par les méthodes biostratigraphiques (les fossiles) pour les sédiments surincombants aux laves.

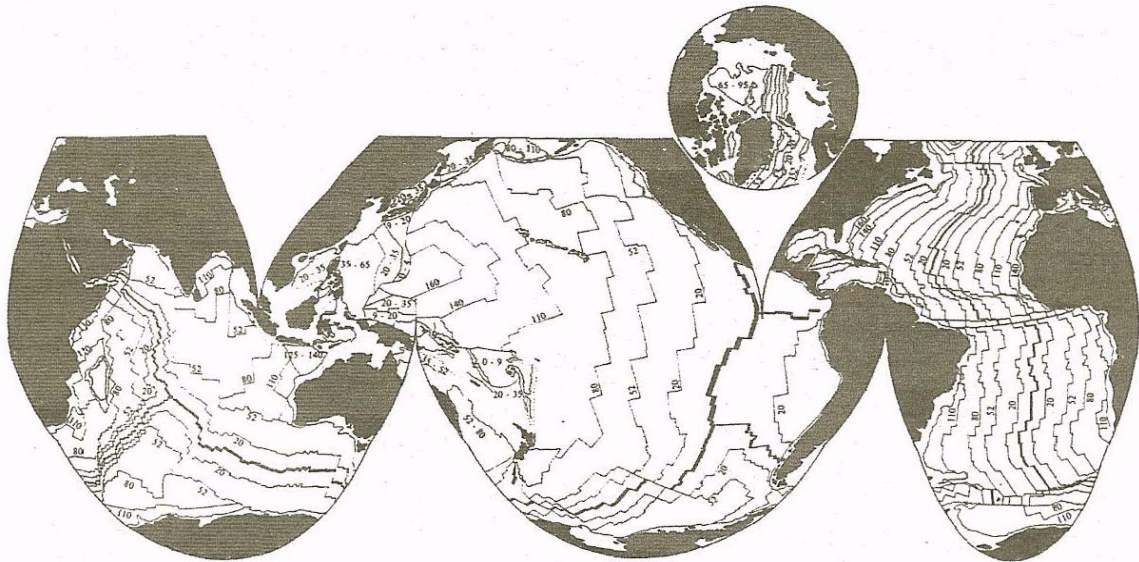


Fig. 31. - Carte des âges (en Ma) du fond des océans (d'après Sclater, Parsons et Jaupart, 1981, in Caron *et al*, 1989)

Ces datations ont confirmé que les anomalies étaient d'autant plus anciennes qu'elles étaient plus éloignées de la dorsale. C'est ainsi que l'on a découvert qu'aucun océan n'était plus vieux que 165 Ma (Jurassique moyen).

On dispose actuellement d'une carte des âges des fonds océaniques due à Sclater, Parsons et Jaupart (fig.31) qui permet de déterminer l'âge moyen du fond océanique pratiquement en tout point.

De plus, en considérant la largeur d'une bande créée pendant une période donnée, il est possible de calculer la vitesse de déplacement de la lithosphère océanique et, en doublant ce nombre, d'apprécier la vitesse moyenne d'écartement des deux plaques contiguës. On distingue ainsi des dorsales lentes dont la vitesse d'expansion est de l'ordre de 2 cm par an (océan Atlantique) et des dorsales rapides (16 cm par an) dans le Pacifique Sud, au large du Pérou.

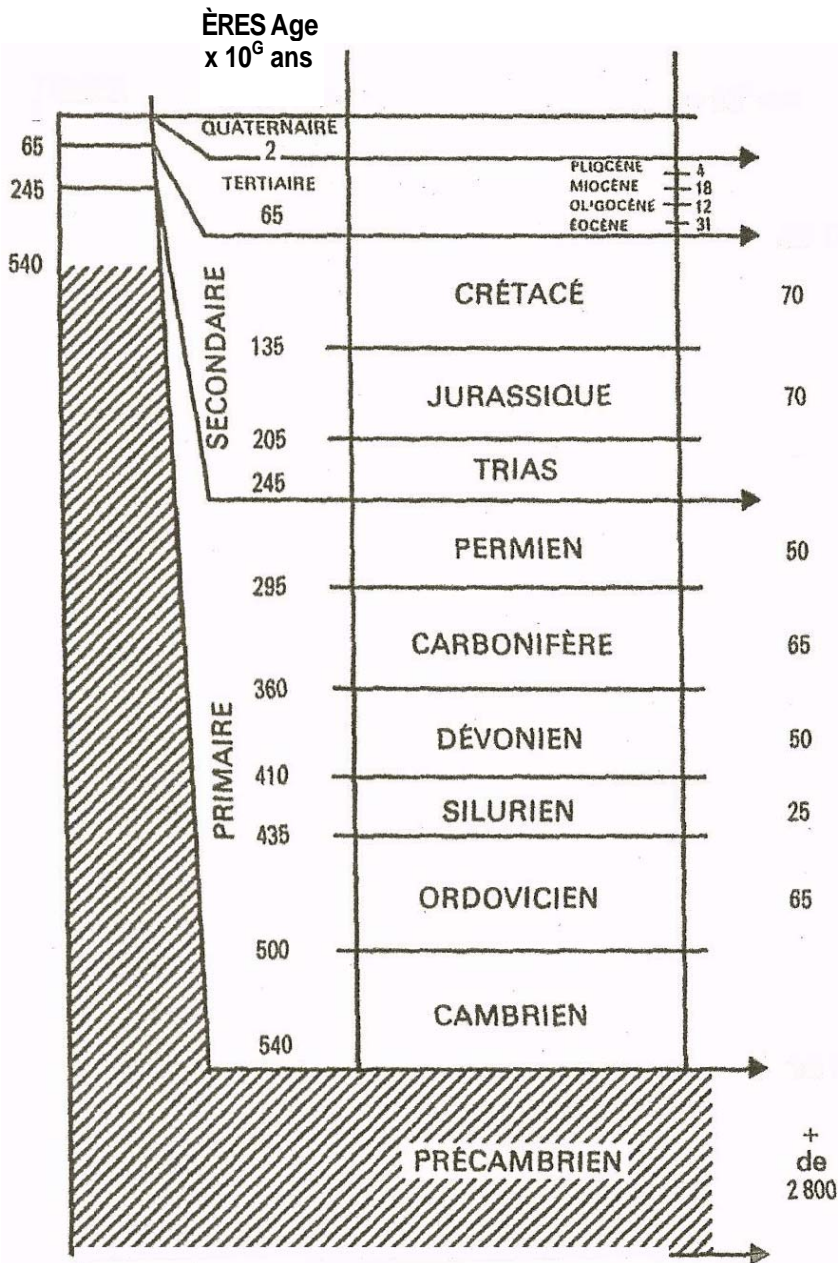
VI. - Les autres méthodes géochronologiques

D'application plus limitée, d'autres méthodes, parfois plus précises, ne peuvent qu'être évoquées :

- la méthode des varves ;
- la sclérochronologie (comptage des stries de croissance des êtres vivants) ;
- les traces de fission ;
- la thermoluminescence.

VII - L'échelle numérique des temps géologiques

Depuis une dizaine d'années, la communauté internationale a réalisé d'importants travaux pour mettre au point une *échelle de référence* combinant l'échelle relative des stratigraphes et celles, plus récentes, qui fournissent des nombres. Elle porte le nom d'*échelle numérique* qui a été préféré à celui d'échelle absolue - laquelle n'avait en fait rien d'absolu - les valeurs obtenues dépendant de conventions susceptibles de varier en fonction des connaissances nouvelles. L'échelle numérique s'efforce de déterminer avec le plus de précision possible les limites entre les étages, séries, systèmes, etc. en utilisant, après discussion, les résultats fournis par les diverses techniques que nous venons d'évoquer.



**ÉCHELLE
DU
TEMPS**
2

DURÉE
x 10⁶ ans

**31 Décembre à
20 h 11 min 20 s
25 Décembre**

Fig. 32 . – Echelle numérique des temps géologiques (d'après Dercourt et Paquet, 1983)

**40
12 Décembre**

En ce qui concerne les temps phanérozoïques (depuis le Primaire), le marqueur cardinal est paléontologique. Pour les temps précambriens, il a été décidé de substituer au marqueur fossile le marqueur numérique. Les formations archéennes ont été subdivisées en deux unités : l'Archéen (de 3

40

15 Novembre

950 à 2 500 Ma) et le Protérozoïque (de 2 500 à 540 Ma). L'absence ou la rareté des repères stratigraphiques n'ont pas permis de diviser l'Archéen. Dans le Protérozoïque, il a été proposé des systèmes qui permettent d'espérer une harmonisation des travaux en évitant l'utilisation de noms régionaux. Les temps phanérozoïques ont été divisés en plus d'une centaine d'étages ayant duré entre

1^{er} Janvier

↑—4 600 Age approximatif de la croûte terrestre

3 et 8 Ma. Seules une dizaine de limites sont encore en discussion. La figure présente l'échelle numérique des temps actuellement utilisée (Odin, 1990) : elle connaîtra certainement des modifications mais on peut penser qu'elles seront limitées.

Sur la partie droite du tableau sont indiqués les principaux repères de l'histoire de la Terre - y compris l'apparition de l'homme - quand on en projette la durée sur une année calendaire.

Remarque : Les principes de mesure du temps géologique se sont révélés aptes à déterminer les âges significatifs de l'histoire de la Lune et permettront peut-être, demain, de dater ceux des autres planètes du système solaire.

Chapitre VI

L'ORIGINE ET L'HISTOIRE DE LA VIE SUR LA TERRE

I. - La vie et son évolution

La vie est l'une des caractéristiques de la Terre. Notre planète est assurément la seule du système solaire à supporter des êtres vivants.

De nombreux auteurs ont essayé de donner des définitions de ce qu'on appelle *le vivant*. Avec Jacques Monod, on peut considérer comme vivant un organisme qui possède les trois caractéristiques suivantes :

- *la téléonomie* : un être vivant (ou une partie d'un être vivant) est doué ou semble doué d'un projet. Par exemple, l'œil est fait pour fixer les images ;
- *la morphogenèse autonome* : la forme - et donc la structure - d'un être vivant dépend surtout de l'agencement précis et rigoureux de ses composants autonomes, même microscopiques ou moléculaires;
- *la reproduction invariante* : un être vivant se reproduit identique à lui-même ou, à tout le moins, avec peu de variation.

Ces trois caractéristiques sont nécessaires mais aucune n'est suffisante seule (un appareil photographique fixe aussi les images ; les atomes sont rigoureusement agencés dans les structures des cristaux). Ce n'est que si un organisme possède les trois propriétés qu'il est *un vivant*.

Si l'on a l'impression, en regardant quelques générations d'une espèce vivante, que les individus se sont reproduits d'une manière invariante, il n'en va pas de même quand on considère des générations plus espacées. Des différences deviennent évidentes qui sont liées au phénomène d'évolution inséparable de la vie. Les plus anciennes formes de vie étaient certainement des cellules isolées, semblables à certaines bactéries actuelles ou à des algues unicellulaires. A partir de ces cellules primordiales se sont formées peu à peu les multiples formes actuelles.

1. Les conditions de la vie. - Deux conditions, qui sont réunies sur la Terre, paraissent nécessaires et ont peut-être été suffisantes à l'apparition de la vie :

A) *La présence d'eau liquide.* - C'est à une distance du Soleil comprise entre 0,95 et, au plus, 1,5 UA³ que l'eau peut exister à l'état liquide. La Terre satisfait à cette condition. Vénus est trop près du Soleil et, par l'effet de serre de ses nuages de gaz carbonique, a une température moyenne au sol de 465°C. Mars a certainement connu l'eau liquide mais, peut-être à cause de sa petite taille, s'est-elle refroidie rapidement (température moyenne actuelle : - 50 °C) et, si l'eau y existe encore, elle est piégée dans le sol et le sous-sol sous forme de glace.

Il est nécessaire que l'eau puisse persister à l'état liquide suffisamment longtemps pour que la vie naisse et se développe en évoluant. Ce ne semble avoir été le cas ni pour Vénus ni pour Mars, En revanche, il paraît probable que la Terre connaît, depuis son origine, de l'eau liquide ; mais le mécanisme responsable est mal compris et, donc, fait l'objet de nombreuses hypothèses.

B) *L'existence d'un champ magnétique.* - En plus des propriétés évoquées dans le chapitre I, il faut noter que le champ magnétique terrestre, qui enserre la Terre comme une coquille, lui assure une

³ UA : unité astronomique. Environ 1,5, 10⁸ m, distance approximative de la Terre au Soleil

protection contre les particules de haute énergie projetées par le Soleil, en les capturant dans les deux ceintures de Van Allen, Mars n'a qu'un champ très faible, et Vénus en est dépourvue.

2. L'origine de la vie sur la Terre. - Depuis une trentaine d'années, à la suite de Miller et Urey, des expériences tendant à fabriquer ces substances de la vie se sont succédé. Effectivement, ont été obtenues, dans des conditions abiotiques (c'est-à-dire dénuées de vie), des macromolécules, protéines ou acides nucléiques, à partir de constituants élémentaires (carbone, hydrogène, oxygène et azote). Ces expériences étaient menées dans une atmosphère et un milieu liquide supposés identiques à ceux de la Terre à son origine. Implicitement était admise l'hypothèse, qui remonte peut-être à Darwin, que la vie était née dans une petite mare tiède, *la soupe* d'Oparin et Haldane. Or, ceci n'est rien moins que sûr. On a de sérieuses raisons de penser que l'atmosphère, primitive mais seconde, issue du dégazage du manteau n'était pas aussi réductrice que l'ont supposé Urey et Miller. L'idée de la soupe a été également attaquée.

Au cours de la dernière décennie, les recherches conjuguées de géologues, de géochimistes et d'astrophysiciens ont abouti à l'idée fondamentale que les premiers constituants organiques terrestres sont hérités de molécules organiques synthétisées au moment de la formation du système solaire. Ces constituants organiques ont pu être présents dès l'origine dans les roches de la croûte terrestre, ou bien ils ont pu être apportés par les météorites, surtout carbonées, qui ont bombardé la Terre pendant le premier milliard d'années. Toujours est-il que, suivant ces travaux, les premiers constituants organiques ne se seraient pas assemblés de manière aléatoire dans les océans primitifs. Actuellement, il ne paraît pas possible d'affirmer que la vie est apparue par sélection naturelle à partir de corps chimiques prébiotiques, mais on ne peut pas prouver le contraire. La découverte du groupe des Archéobactéries (*cf.* p. 90) est peut-être une piste qui permettrait de remonter à des êtres plus simples que les bactéries archéennes.

3. Les premières traces de vie sur la Terre : les fossiles du Précambrien.

A) *L'Archéen (des origines à -2,5 Ga).* - Il ne faut pas confondre les traces de vie avec les restes de matière organique. Les plus vieux sédiments connus, au Groenland, en Afrique du Sud et en Australie, renferment des restes de matière organique qui peuvent témoigner d'une activité vitale entre -3,4 et -3,8 Ga. Les fossiles les plus anciens sont d'anciennes bactéries, ils ont été découverts en Afrique du Sud et en Australie. Les plus simples appartiennent à l'espèce *Eobacterium isolatum*, qui vivait il y a 3,4 Ga. Ces formes archéennes sont des cellules de petite taille, pronucléées, c'est-à-dire qui n'ont pas de vrai noyau et qui dépassent rarement 15 µm de long.

B) *La vie au Protérozoïque.* - Au cours de cette période se développent des constructions calcaires dues à l'activité de cyanobactéries. Ces structures sédimentaires (les Stromatolites) témoignant d'une activité biologique sont encore actuelles, mais leur importance a décliné depuis le début de l'ère primaire. Les plus anciennes datent de 2,8 Ga mais c'est surtout depuis 2,3 Ga et jusqu'au Cambrien que les Stromatolites se développent en même temps que les minerais de fer rubanés.

4. La théorie de l'évolution. - Il y a 3,4 Ga, la Terre était vraisemblablement peuplée d'êtres unicellulaires, tels *Eobacterium*. Actuellement, tous les êtres vivants, si différents soient-ils, sont constitués de cellules ayant en commun des structures et un code génétique. Certes, les gènes des bactéries sont du type compact et leur ADN code uniquement des protéines, alors que les gènes des organismes plus complexes sont morcelés avec des portions codantes séparées par des zones apparemment inactives ; mais leur mode d'action est fort comparable.

La seule explication scientifique valable de cette similitude s'appuie sur l'idée d'évolution. A partir d'un être ancestral, déjà pourvu des attributs qui vont devenir communs à tout le monde vivant, tous les types d'organismes se sont formés, les uns à partir des autres,

A partir des bactéries premières se sont constitués des organismes encore unicellulaires mais pourvus de chlorophylle. Ensuite sont nées les formes pluricellulaires comme les méduses, les mollusques, les insectes, les vertébrés et, enfin, l'homme. Au long des temps géologiques sont apparus des êtres de plus en plus complexes. Cette idée, à l'origine de la théorie de l'évolution, doit beaucoup à la

paléontologie, c'est-à-dire à l'étude des fossiles, des restes d'animaux ou de végétaux conservés dans des roches. En effet, alors que l'observation du monde vivant actuel donne plutôt l'idée d'une fixité, les découvertes des paléontologistes montrent qu'à l'échelle géologique la biosphère a connu de très nombreux et importants changements d'organisation qui témoignent d'une évolution historique et irréversible du monde organique.

II. - La théorie de l'évolution et la tectonique des plaques

Un des arguments importants de Wegener en faveur de la dérive des continents était la ressemblance entre des fossiles de même âge, d'eau douce ou saumâtre, collectés en Amérique du Sud et en bordure de la côte africaine. La tectonique des plaques, bien évidemment, confirme l'argument wégénérien. Quand un continent se fragmente en plusieurs morceaux, chacun des domaines formés s'isole géographiquement et génétiquement des autres. Les groupes animaux et végétaux ainsi séparés peuvent évoluer de manière différente : de nouvelles espèces peuvent se créer. En revanche, quand deux plaques se rapprochent, peu avant la collision il y a mélange de faunes et de flores. La compétition entre les diverses populations conduira à des sélections et donc, parfois, à des disparitions d'espèces.

III. - Les grandes crises dans l'histoire de la vie

Contrairement à ce que pourrait laisser supposer la répartition des fossiles au long de l'échelle des temps et les marques - peu contredites - de l'évolution du plus simple au plus complexe, l'expansion de la vie sur le globe ne s'est pas déroulée d'une manière continue. Il y a eu des alternances de phases de radiation pendant lesquelles les espèces se multipliaient rapidement et de phases d'extinctions massives - voire de disparitions - que l'on dénomme crises.

Sept crises d'importance inégale, plus ou moins complètement étudiées, ont été dénombrées depuis le début, du Cambrien.

A la fin du Cambrien, à la fin de l'Ordovicien, au Dévonien, la vie a été en crise à la surface du globe. Mais ces trois phases d'extinction n'ont fait que ralentir les grandes radiations. A la fin du Permien (- 245 Ma) on compte 500 familles d'animaux marins.

La fin de l'ère primaire est caractérisée par la plus grande extinction de tous les temps. Plus de 200 familles disparaissent totalement au Permien, soit 70 à 80 % des espèces (fusulines, trilobites, etc.) D'autres sont quasi anéanties (brachiopodes, nautilus, etc.). Les invertébrés marins ont failli subir un holocauste. Sur terre, les reptiles mammaliens survivent péniblement. En revanche, la faune finipaléozoïque a mieux résisté, sans doute à cause du système de reproduction végétative. Il semble bien que cette crise - qui s'étale sur 10 Ma - soit la conséquence de la formation de la Pangée. La soudure des plaques a entraîné la réduction des marges continentales. Sur le supercontinent régnait un climat très aride, la grande glaciation qui avait commencé au Carbonifère ayant sans doute également contribué à la lente dégradation des conditions du milieu.

A partir du Trias et jusqu'à nos jours, c'est un grand développement - une grande radiation - qui caractérise l'histoire de la vie. Quatre crises ont ralenti cette expansion : à la fin du Trias (- 205 Ma), à la fin du Crétacé (-65 Ma), à la limite Eocène-Oligocène (- 34 Ma) et il y a 8000 ans. Mais elles n'ont pas eu l'importance des précédentes, même si l'extinction des dinosaures a frappé les imaginations.

1. La crise de la limite Crétacé-Tertiaire . - A la fin de l'ère secondaire, disparaissent totalement :
 en milieu marin : ammonites, bélemnites, inocérames, rudistes;
 en milieu continental : dinosaures et reptiles volants.

Les oursins, les bryozoaires, les brachiopodes, les reptiles marins et le plancton sont sérieusement atteints.

De nombreuses hypothèses (au moins 60 !) ont été avancées pour tenter d'expliquer cette crise biologique qui, par ailleurs, n'a pas affecté certains groupes de poissons, ni les crocodiles, les tortues, les lézards, les serpents, les oiseaux, les mammifères et le nanoplancton. Les deux principales hypothèses qui

font l'objet des recherches actuelles sont la collision de la Terre avec un objet extraterrestre (Alvarez *et al.*, 1980) et une crise volcanique responsable, en particulier, des immenses épanchements de laves du Deccan en Inde (Courtilot *et al.*, 1986).

Dans l'état actuel des recherches, il n'est pas possible d'opter pour l'une ou pour l'autre cause. Un auteur pense même que les deux auraient pu se combiner.

2. Les dernières crises biologiques.

- A la limite Eocène-Oligocène (autour de - 35 Ma) on observe le renouvellement complet des faunes de mammifères. Les ongulés remplacent les grands herbivores. La séparation de l'Australie et de l'Antarctique, l'installation d'une circulation péri-cambrienne des eaux marines profondes de l'hémisphère Sud ainsi que la fermeture de la Téthys, sont invoqués pour expliquer la baisse de température moyenne que l'on mesure, à la limite Eocène-Oligocène, grâce aux isotopes de l'oxygène.

Après la dernière glaciation, vers - 8 000 avant J.-C., disparaissent les mammoths à la fin de la période Matuyana de polarité magnétique inverse, mais aussi 250 genres de mammifères et plus de 10 000 espèces.

3. Conclusion. L'étude nécessaire des crises biologiques.

Il faut reconnaître qu'on sait peu de choses sur la plupart des crises qui ont jalonné l'histoire de la vie sur le globe. Apparemment, chacun des événements catastrophiques que nous avons évoqués a ses caractéristiques. Peut-on, cependant, mettre en évidence ce qu'elles ont de commun et qui est invariant? Pour cela, il faudrait améliorer la finesse des mesures chronologiques, étudier les événements sur toute la surface du globe. Peut-être peut-on envisager de modéliser à partir d'hypothèses de causes internes mais aussi externes, voir cosmiques.

La connaissance de la nature et des causes des grandes crises permettrait de mieux comprendre le fonctionnement du système Terre. On peut cependant, dès maintenant, souligner le rôle de tampon joué par la biosphère. Sans aller jusqu'à la mythologie, l'hypothèse de Lovelock et Margulis, on peut souhaiter que l'espèce qui domine en ce moment la scène mondiale ne devienne pas le facteur principal de sa disparition.

L'étude des fossiles animaux et végétaux a joué et joue un rôle essentiel dans l'étude de la Terre. Si l'hypothèse de la première naissance dans l'eau, à température modérée, a encore de nombreux partisans, la découverte d'Archaeobactéries, vivant à des températures voisines de 100°C, relance le débat. La théorie de l'évolution- que d'aucuns disent en crise - elle est attaquée de tous bords (créationnistes, certains biologistes moléculaires) - continue à fournir, au long des découvertes nouvelles, une explication logique à révolution de la biosphère.

La paléontologie est le complément indispensable aux apports de la biologie génétique ; elle introduit le temps dans les conceptions de ceux qui cherchent à comprendre le comment des phénomènes de variation des êtres vivants. On peut donc supposer que les recherches paléontologiques vont se développer dans les années qui viennent. En plus de la poursuite de la recherche sur les grandes crises biologiques, nous pouvons évoquer quelques-unes des orientations prévisibles.

1. La recherche des fossiles ,à corps mou - Dans la grande majorité des gisements fossilifères, ce sont les restes des parties dures (coquilles, carapaces, squelette, dents...) des êtres; vivants qui sont conservés et que l'on étudie. Bien plus rares sont les gisements où sont fossilisées les parties molles des animaux (peau, muscles, organes internes) ou les êtres à corps mous (méduses, vers, etc.). Or, ces parties manquantes sont essentielles pour comprendre l'organisation des êtres dont seuls les éléments durs ont été retrouvés. Dans certains cas la découverte de fossiles « mous » témoigne de l'existence d'êtres vivants jusqu'alors inconnus. Au cours de ces dernières années, les découvertes se sont multipliées. Elles montrent que la conservation exceptionnelle de l'être vivant tout entier est parfois due à l'installation rapide *post mortem* d'un voile bactérien à la surface du sédiment. Constitué essentiellement de cyanobactéries, aérobies et anaérobies, ce voile bactérien a permis la conservation exceptionnelle des fossiles du gisement de Cerin (Ain) : en particulier, les différentes pièces des squelettes sont restées attachées les unes aux autres. Dans le grès à Voltzia du Trias des Vosges, des méduses sont intégralement conservées (ombrelle,

tentacules et cellules urticantes sont parfaitement reconnaissables). Le voile microbien très vite installé a permis une minéralisation précoce de la matière organique.

Si l'être vivant est rapidement isolé de l'atmosphère ou de l'eau peu après sa mort, il peut aussi être rapidement fossilisé : les mammouths de Sibérie, pris dans les glaces il y a quelques dizaines de milliers d'années, ont été retrouvés intacts, leur dernier repas dans l'estomac compris. C'est aussi le cas des insectes de l'ambre du Crétacé du Liban et de l'Oligocène de la Baltique et de Haïti. L'ambre dérive d'une résine fossile qui s'écoulait le long des conifères. L'exceptionnelle conservation des fossiles du gisement jurassique d'Holzmaden (Würtemberg) et du gisement tertiaire (-50 Ma) de Messel (Hesse) s'explique sans doute également par la protection et la minéralisation rapides dues à des bactéries sulfato-réductrices.

2. La recherche des bactéries fossiles. - Pendant les deux premiers milliards d'années de son histoire, la Terre a été habitée uniquement par des organismes bactériens. Mais, bien évidemment, la difficulté de détection des traces fossiles et d'expérimentation sur les formes actuelles explique que le rôle fondamental des bactéries dans l'histoire de la planète ait été longtemps minimisé, voire ignoré.

En fait, les bactéries et leur évolution ont, pour certains comme Lynn Margulis, une telle signification que la division fondamentale de la biosphère ne réside pas entre les animaux et les plantes mais entre les procaryotes (organismes composés de cellules sans noyau, telles les bactéries) et les eucaryotes (toutes les autres formes vivantes). D'autant que la découverte par Carl Woese de bactéries d'un nouveau type, les Archaeobactéries, conduit à modifier profondément l'arbre évolutif jusqu'alors admis.

Les Archaeobactéries sont divisées en trois groupes principaux :

- les méthanogènes, anaérobies, produisent du méthane, vivent au fond des océans comme dans le rumen et les intestins des animaux ;
- les halophiles extrêmes, anaérobies, vivent dans des eaux très riches en sel ;
- les thermoacidophiles vivent dans des sources sulfureuses à des températures voisines de 100°C et à des pH proches de 1,

Dans ces trois groupes, le spectre de la molécule d'ARN ribosomal est identique. Il diffère de celui des cellules à noyau mais également de celui des autres bactéries. C. Woese propose de voir l'origine des eubactéries, des archaeobactéries et des eucaryotes à partir d'un ancêtre universel commun, Les eucaryotes auraient évolué vers les cellules animales et végétales à la suite d'une symbiose avec les procaryotes. C'est la thèse soutenue également par E. Boureau et par Lynn Margulis. Pour celle dernière, les mitochondries sont, dans le corps humain, les descendantes des bactéries qui nageaient dans les mers primitives et respiraient de l'oxygène, L'alliance symbiotique est telle que 10 % du poids sec du corps humain sont composés de bactéries indispensables à sa survie.

Mais une question se pose d'ores et déjà : pour certains, les Archaeobactéries ne sont peut-être pas les plus anciennes et il faudrait imaginer que les premières cellules étaient eucaryotes et que les formes pronucléées résultent de leur adaptation à des conditions de vie extrêmes.

IV. - Les applications de la paléontologie

Parallèlement aux recherches que nous venons d'évoquer, il faut rappeler que la paléontologie a permis de mettre au point l'échelle relative des temps (cf. chap. IV) qui, jusqu'à l'utilisation des méthodes de datation radiométrique, a été l'auxiliaire indispensable - et toujours utile - des recherches sur le terrain. La prospection pétrolière - par ailleurs - a provoqué et permis le développement de la micropaléontologie appliquée. Et nous avons vu quels tests les paléontologistes proposent aux géologues pour l'examen des modèles paléogéographiques.

La paléontologie, science du temps et science biologique, permet dorénavant, grâce aux méthodes statistiques et à l'informatique, une approche quantitative des grands problèmes écologiques.

