APPROCHE SYSTEMIQUE APPLIQUEE A LA CARTOGRAPHIE MORPHOPEDOLOGIQUE DU PAYSAGE

M. RAUNET
IRAT/CIRAD - BP 5035 - 34032 Montpellier Cédex

RESUME

Cet article fait le point sur l'application de l'approche systémique à la perception, la compréhension et la représentation cartographique des paysages morpho-pédologiques.

Ont été examinées la pertinence et la signification des concepts de la "théorie générale des systèmes", transcrits dans le cadre concret du paysage ; comment celui-ci pouvait être envisagé comme un système spatial dynamique, ouvert sur un environnement changeant qui l'"informe", le structure, le modifie ou le maintient ? Ainsi, les "unités de milieu" sont les éléments de base du système-paysage, définies par des caractéristiques sélectionnées parmi certaines composantes, elles-mêmes retenues en fonction du contexte régional, et qui dépassent le cadre strictement pédologique. La notion dynamique d'évolution a été spécialement envisagée à partir d'exemples concrets.

INTRODUCTION

Les plantes poussent sur un support. Il est donc entièrement légitime de s'intéresser à l'objet "sol", ses contraintes et ses qualités.

Seulement, un terroir ou une région à mettre en valeur ne sont pas réductibles strictement à cet aspect. Ce sont des territoires organisés naturellement, d'où ressortent un ensemble de caractéristiques qui conditionnent leur bonne utilisation. Il y a des formes de reliefs et des matériaux variés, avec une hydrodynamique et une morphodynamique spécifiques dont il faut tenir compte, au même titre que du sol en lui-même, pour l'aménagement, la conservation de l'espace régional, et

l'introduction de systèmes de culture adaptés, compte tenu naturellement du contexte socio-culturel et économique.

Le travail du pédologue-cartographe est donc de caractériser et de différencier spatialement l'ensemble des "phénomènes" dont il faut tenir compte pour la mise en valeur d'un territoire. Or tous ces phénomènes ne sont pas indépendants les uns des autres. Il ne faut donc pas les envisager séparément, mais dans leurs *relations*. C'est l'objectif de l'approche morpho-pédologique initiée par KILIAN (1974) et TRICART (1974).

Nous voudrions préciser ici quelles doivent être les bases conceptuelles d'une telle cartographie "intégrée" du milieu physique, sachant que "intégré" est l'inverse de "juxtaposé".

Pour qu'un modèle cartographique soit le plus adéquat (ou pertinent) possible dans un contexte donné (régional, d'échelle et d'objectif), cela nécessite des choix actifs raisonnés parmi le désordre apparent de la nature, afin d'en faire ressortir "l'ordre" sous-jacent. A cet effet, une simple description du milieu ne suffit pas ; celle-ci doit s'accompagner d'une sélection des faits "pertinents", c'est-à-dire qui ont une signification bien précise dans le contexte spécifique du paysage étudié, et qu'il s'agit d'ordonner et de relier.

Pour la cartographie en effet, il est beaucoup plus économique en temps, énergie et précision du travail, de comprendre les règles d'organisation des phénomènes que d'essayer de les répertorier indépendamment ; d'autre part, c'est beaucoup plus satisfaisant pour l'esprit. On fait l'hypothèse de départ que le hasard n'existe pas dans la mise en place du paysage.

Pour une région et une échelle données, que va-t-on alors représenter, comment tracer les limites, comment structurer la légende ? Telles sont quelques questions simples (mais dont les réponses ne sont pas immédiates) que doit se poser le pédologue quand il aborde une région.

La cartographie du milieu physique n'est pas en réalité une activité "triviale" dont il suffirait de connaître *la* méthode pour l'appliquer mécaniquement. La caricature en est le quadrillage systématique et l'interpolation thématique, tout aussi systématique, avec autant d'interpolations qu'il y aurait de "thèmes".

Elle demande autant, sinon plus, une perception et une expression des *relations entre les faits* qu'une description des faits isolés, davantage un

"balayage comparatif discriminant" qu'une série d'observations ponctuelles séparées les unes des autres. Il est vrai qu'une relation peut sauter aux yeux, comme elle peut rester enfouie si on ne la soupçonne pas et si on n'observe pas là où il faut, en fonction d'hypothèses. Pour une telle perception, analyses et synthèses doivent continuellement s'imbriquer, s'alimenter et s'orienter mutuellement.

Nous montrerons, à partir d'exemples, en quoi le milieu naturel peut être considéré comme un système spatio-temporel et comment on peut définir un tel système.

Trois notions seront constamment présentes à travers tout ce que nous dirons, et qui le relativiseront : les notions de *niveau de perception* (ou "d'échelle" au sens large), de *contexte* et de *pertinence* (ou "signification"), cette dernière étant conditionnée par les deux premières.

I - RELATIVITE DE LA NOTION DE PAYSAGE

Le concept de "paysage" est intégrateur en soi. Le fait qu'il s'impose sans difficulté à l'esprit est une reconnaissance implicite qu'il n'est pas composé d'une juxtaposition de phénomènes indépendants, bien que nous en percevions une multitude, séparables individuellement.

L'observateur "actif" associe mentalement certains de ces éléments entre eux, et en fait "émerger" un paysage qu'il reconnait comme quelque chose de cohérent. La discrimination des éléments "pertinents" est relative à la qualité de l'observateur ; elle est donc subjective. Ainsi un géologue, un botaniste, un agronome, un ethnologue, percevront respectivement des paysages géologiques, végétaux, agraires ou ethniques, possédant leurs structures propres. Chacun "prélèvera" dans le milieu certaines composantes qu'il jugera significatives et en oubliera (ou n'en verra pas) d'autres. Cette structuration de l'espace sera différente pour chacun des "spécialistes" en fonction de l'échelle d'observation qu'il décidera d'adopter.

A partir de là, si l'on considère un niveau intégrateur supérieur à ces "paysages thématiques", en combinant les composantes climatiques, géologiques, géomorphologiques, hydrologiques, pédologiques et biologiques, il s'avère, par suite de l'interdépendance de ces composantes, que l'on peut encore parler de "paysage". De

nouvelles "unités" ("unités de milieu"), plus complexes dans leurs organisations internes, émergent pour structurer encore l'espace.

Suivant que l'on met davantage l'accent sur le milieu physique ou sur le milieu biologique, on parlera soit de paysage morpho-pédologique, soit de paysage écologique. Encore une fois, il est bon de redire que l'échelle d'observation influe sur la nature des éléments considérés et sur leur mode de structuration.

L'énoncé suivant possède les "mots-clés" (en italique) qu'il nous faudra expliciter dans l'approche systémique, appliquée au cas concret particulier de l'analyse morpho-pédologique du paysage :

Un territoire est un système spatio-temporel ouvert. Il possède des *limites* qui le distinguent de son *environnement*. Il est donc composé *d'éléments (unités de milieu)* en *interaction*. Ces éléments sont définis par des *caractéristiques fonctionnelles* (ou significatives) que l'on appelle leurs "propriétés". Les éléments peuvent être regroupés en "*classes-repère*". Celles-ci sont articulées entre elles selon une certaine logique que l'on nomme *structure*, organisation ou arrangement du système. La structure, fixe à un moment donné, est traversée par des flux de matière qui traduisent le *fonctionnement* du système et les *interactions* entre éléments.

En tant que système ouvert, le territoire participe à des échanges avec l'environnement extérieur par l'intermédiaire de *flux de matière et d'énergie*, qui entretiennent sa structure et son fonctionnement.

II - LES LIMITES DU TERRITOIRE

Dans la délimitation d'un système rentre toujours une certaine part d'arbitraire. Il faut choisir des limites qui facilitent les raisonnements sur les flux entrants et sortants, et qui correspondent le plus possible à des interfaces naturels au travers desquels se font les échanges.

Latéralement le territoire proprement dit est inscrit dans les limites de la région à étudier. Elles sont généralement imposées par le demandeur de l'étude.

Concernant la dimension verticale, dans le cas de l'approche morpho – pédologique, on prend généralement les interfaces "paysage – environnement" suivants :
- l'interface modelé/atmosphère,
- l'interface "bed – rock"/zone d'altération (front d'altération).

Ces deux frontières évoluent avec le temps, quand ce temps dépasse celui de l'observation : la topographie se modifie (morpho – dynamique, tectonique ...), le front d'altération descend.

Tous ce qui est situé en dehors de ces limites est appelé *environnement extérieur* du paysage. Cet environnement possède des caractéristiques extrinsèques au paysage qui peuvent changer avec le temps et qui sont en interactions différentielles avec les caractéristiques intrinsèques des unités du milieu de ce paysage, contribuant à son évolution (voir plus loin).

III – ECHANGES AVEC L'ENVIRONNEMENT EXTERIEUR

Quand on ne considère que les entrées et les sorties, le système est assimilé à une "boîte noire".

Ces échanges sont composés de flux latéraux et de flux verticaux à travers les limites du système, délimitées semi – arbitrairement :

1. A travers les limites latérales (frontières du territoire)

Les entrées et les sorties à composantes horizontales (profondes, hypodermiques ou superficielles) sont composées d'eau, de matières dissoutes (solutés) et colloïdales, et de matières solides. Nous verrons plus loin que les "entrées" participent à l'organisation des unités de milieu, alors que les sorties sont les "déchets" (que l'on peut assimiler à *l'entropie* des unités amont).

- **Les matières dissoutes** résultent des processus d'altération d'ordre géochimique (hydrolyse, dissolution ...), bio – géochimiques (acido – complexolyse ...) ou physico – chimiques (dégradation et appauvrissement latéral ...). Elles suivent généralement les flux hydriques, donc sortent en aval et rentrent en amont.

- **Les matières solides**, transitant le plus souvent en surface, sont issues en grande partie des processus morphodynamiques (ayant pour agents les eaux courantes ou le vent) ou bien volcaniques (retombées et transports latéraux).

  Des processus de pédogenèse sont aussi à l'origine de flux sous la surface : apports latéraux en suspension avec colmatage de milieux d'accueil sableux. En général les matières solides viennent de l'amont, mais il y a des exceptions : le front "d'accumulation remontante" de la montmorillonite, procédant d'aval vers l'amont, peut envahir progressivement le paysage. Il en est de même de la remontée progressive d'un front de colmatage argileux (non montmorillonitique) qui progresse à partir de l'aval, dans un bas-fond en particulier.

- **Les eaux** peuvent transiter à tous les niveaux du substrat, mais, surtout en surface et en sub-surface, sous forme de ruissellements, de cours d'eau ou d'écoulements hypodermiques. Les flux hydriques latéraux accompagnent ou non les flux de matières dissoutes ou solides. Au sein des nappes phréatiques, spécialement dans les épaisses altérites tropicales, il peut aussi y avoir des échanges latéraux non négligeables avec l'extérieur.

Tous ces flux latéraux ne se font pas à la même vitesse. Certains sont lents, à l'échelle de la pédogenèse (lessivage, accumulation, évacuation des produits d'hydrolyse ...), d'autres sont très rapides (quelques heures à quelques jours pour les eaux de ruissellement). Certains sont relativement continus (front d'altération hydrolytique profond au sein d'une nappe phréatique), d'autres sont discontinus (averses, ruissellement, crues, érosion, alluvionnement). Certains flux sont mesurables quantitativement ou semi-quantitativement (lysimètres, limnigraphes, cases d'érosion) et servent à établir des "bilans" à court terme (cycles hydrologique ou saisonnier par exemple). D'autres ne sont évaluables que très empiriquement ; d'autres enfin sont hors de portée de la mesure comme de l'évaluation.

Nous verrons que ces considérations sont importantes pour statuer sur "l'évolution" du paysage, et même pour caractériser les unités de milieu.

2. A travers l'interface modelé/atmosphère

Les échanges sont essentiellement d'ordre climatique et biologique (homme compris), et sont composés de flux d'énergie et de matière (que l'on peut souvent traduire de l'un à l'autre).

. Dans le domaine énergétique :

Au niveau global et macroscopique de la biosphère, deux formes fondamentales d'énergie sont responsables de tout ce qui se passe sur la terre : *l'énergie solaire* (avec ses cycles diurnes et saisonniers) et la *gravité*. Au niveau local d'un écosystème donné, les sources d'énergie dérivées qui arrivent de l'environnement semblent être les suivantes :

- l'énergie du rayonnement incident qui permet et contrôle toute l'activité de la biomasse faisant partie du système. Elle permet donc des échanges gazeux (cycles du carbone, de l'azote et de l'oxygène) et de vapeur d'eau ;
- l'énergie cinétique des pluies, qui en se dissipant au sol, permet les mouvements d'eau modelant la surface avec transferts de matériaux dans et hors du système ;
- l'énergie éolienne, qui peut contribuer aussi au façonnement du modelé ;
- l'énergie "anthropique", qui concerne l'activité humaine sous toutes ses formes, utilisant la nature dans un sens négatif ou positif relativement à sa "dégradation", à sa conservation, ou à son amélioration.

Concernant l'activité anthropique, on peut, suivant les cas, considérer qu'elle fait partie des caractéristiques intrinsèques du système ou bien qu'elle est extérieure à ce système, faisant ainsi partie de son environnement. Il sera fait état plus loin de cet aspect du problème.

. Dans le domaine des flux de matière :

Les échanges paysage/environnement concernent les précipitations, les échanges gazeux (CO_2, NH_3, O_2) et de vapeur d'eau dûs à l'activité biologique, l'évaporation directe des nappes d'eau libre, les apports et retraits dus à l'activité humaine (engrais, herbicides, exportations par les cultures, les résidus végétaux et animaux, l'irrigation, les constructions, etc...).

3. A travers le front d'altération

Les échanges de matière concernent surtout les sorties d'eau et de produits en solution issus de l'altération géochimique ou de l'infiltration à partir de la surface.

A long terme on pourrait considérer qu'il y a échange, isovolumique ou non, entre l'altérite et le bed-rock, la première "entrant", le second "sortant", à travers l'interface d'origine qui devient alors fictif si on considère comme invariante la limite inférieure du système. Il peut aussi y avoir des venues d'eau profonde à partir de la nappe de fissures alimentant les altérites.

Du point de vue énergétique, il est possible aussi de mentionner les apports d'énergie d'origine tectonique (à très long terme) et éventuellement géothermique, cette dernière pouvant être liée à une altération hydrothermale.

IV - PARTITION DU PAYSAGE EN "ELEMENTS" (OU "UNITES DE MILIEU") et "CLASSES D'UNITES"

Un système ne peut être défini, à un moment donné, à une échelle donnée et selon un "point de vue" (thématique ou intégré) donné, avant qu'on en identifie les "éléments" qui sont en interaction.

Dans le cas du paysage, les éléments constitutifs sont les "unités de milieu" (ou "unités morpho-pédologiques") contigües dans l'espace, que l'on perçoit globalement comme des entités.

Répétons, car ceci est très important, que ce découpage du paysage est une possibilité parmi d'autres ; il est conditionné par plusieurs aspects :

- *l'optique et l'objectif de l'observateur* : en morpho-pédologie, cette optique est d'intégrer et de faire ressortir les interdépendances des composantes du milieu, en les regroupant en "unités" cohérentes. Cette optique est différente de celle du thématicien (géologue, géomorphologue, ou pédologue "purs" par exemple).

- *l'échelle d'observation* : il y aura d'autant plus d'éléments au kilomètre carré que le niveau de détail sera grand. Les classes d'unités seront définies (caractéristiques ou propriétés) différemment selon l'échelle considérée.

Le découpage du territoire ne doit pas être artificiel, mais s'imposer de façon naturelle à l'issue d'une démarche spécifique, à la fois empirique, comparative et inductive. A une échelle donnée, la distinction des unités et classes d'unités repose sur la perception de différences significatives et de récurrences (répétitivité) de ces différences, dans le contexte exclusif de la région étudiée. Cette dernière condition est indispensable pour que les différences observées soient pertinentes. Nous verrons que les "caractéristiques" des unités de milieu qui permettent de définir celles-ci ne doivent être référées qu'à des relations (d'équivalence ou de différence) existantes au sein du territoire. Un élément en soi n'est définissable sans ambiguïté que dans le contexte du système étudié et par rapport aux autres éléments. En ce sens, le système doit être autoréféré.

Ainsi, dans l'étude d'un paysage, un des problèmes que doit résoudre le cartographe est l'adéquation entre la partition en unités et l'échelle. Puisque les unités ne peuvent être définies que les unes par rapport aux autres, la "vision d'ensemble" est nécessaire avant de faire le découpage. Ce découpage définitif ne peut donc être réalisé dès le départ ; il se précise ou se corrige au fur et à mesure de la prospection. C'est alors toute la démarche de terrain qui est en cause. La "mise à niveau logique" (raisonnement à la bonne échelle) nécessite une approche de nature dialectique.

V - CARACTERISTIQUES DES ELEMENTS (UNITES DE MILIEU) ET COMPOSANTES DU PAYSAGE

1. Caractéristiques des unités de milieu

Ce qui donne sa "cohérence" à une unité de milieu "émerge" de l'ensemble de ses caractéristiques en interactions (voir plus loin).

Il est fréquent que l'unité de milieu se détache naturellement dans le paysage et saute aux yeux de l'observateur (déjà "informé"

par une expérience préalable), avant qu'il en ait fait une analyse de ses caractéristiques. En fait, il est plus facile de reconnaître la résultante des interactions des composantes (caractéristiques) de l'unité que les composantes séparées. La reconnaissance globale des unités de milieu en est la démonstration ; c'est d'autre part une garantie de l'existence réelle de tels objets, et non de leur "construction" artificielle, ce qui est rassurant.

Il n'empêche que l'identification de l'unité ne suffit pas ; pour la définir, il faut aller voir au sein de ce sous-système comment il fonctionne, quelles sont ses caractéristiques-propriétés et quelles sont les éventuelles interactions qui y agissent.

Une caractéristique peut être seulement qualitative (couleur d'un sol, présence ou absence de gravillons ...) ; elle peut aussi être quantitative ou semi-quantitative (fourchette de valeurs de pourcentage de gravillons, classe de pente, durée d'engorgement ...). A l'échelle humaine, une caractéristique peut être statique (type de modelé, type de sol ...) ou bien dynamique, (forme et intensité de la morphodynamique, régime hydrologique ..., activité humaine si on décide d'en faire une caractéristique intrinsèque du système ...). Comme caractéristiques dynamiques, on considèrera uniquement certains flux et processus (avec leurs effets) : ceux qui marquent fortement le cachet de l'unité en question, ceux qui sont aisés à identifier, ceux encore qui sont rapides à l'échelle de l'observateur (et de l'utilisateur futur de la carte), et enfin ceux qui sont récurrents en fonction d'événements saisonniers. C'est le cas des processus visibles d'érosion, d'alluvionnement et de circulation des eaux (en surface et en profondeur).

Chaque unité d'une classe d'unités de milieu (par exemple *la* butte cuirassée située à tel endroit précis et appartenant à la classe-repère "buttes cuirassées") aura des caractéristiques propres qui sont ses coordonnées spatiales, ses formes extérieures et ses dimensions. Ces caractéristiques spatiales apparaîtront directement sur la carte, dont c'est un des rôles. Les autres "dimensions" de l'unité seront bien sûr communes à toutes les unités appartenant à la même classe-repère ; elles ne seront pas représentées directement sur la carte, mais figureront dans sa légende.

2. Caractéristiques des composantes du paysage

Chaque caractéristique d'une unité de milieu sera choisie au sein d'une "composante" qui, pour le descripteur, pourra être un thème disciplinaire.

Par exemple, les composantes du paysage étudié pourront être :
- la lithologie du substratum,
- les formations superficielles,
- le sol,
- le modelé,
- le régime hydrologique,
- la morphodynamique.

Le nombre et la nature de ces composantes seront spécifiques à la région étudiée. Seules les composantes "utiles", c'est-à-dire significatives et explicatives par leurs modalités, seront retenues. On ne parlera pas de composante climatique si le climat est homogène partout. On ne parlera pas de lithologie et de modelé au sein d'un flat alluvial, puisqu'ils ne sont pas explicatifs des différenciations qu'on peut y observer ; par contre, les composantes "formations superficielles", "sol" et "régime hydrologique" seront, dans ce cas, tout à fait pertinentes.

Une fois les composantes déterminées, les caractéristiques de chaque classe-repère d'unité seront choisies parmi les diverses "modalités" (semi-quantifiées ou non).

Par exemple, si la composante "modelé" est pertinente, les classe-repères d'unités de milieu pourront être caractérisées, vis-à-vis de cette composante, par les modalités suivantes :
- plateau cuirassé (bowal),
- talus de bowal,
- glacis de piémont des collines de roches vertes,
- glacis d'ennoyage,
- croupes surbaissées,
- glacis-versant,
- collines de "roches vertes",
- bas-fond élémentaire,
- bas-fond incisé,
- plaine alluviale, etc...

Naturellement deux classes d'unités de milieu pourront avoir le même modelé. Ce qui compte pour les différencier, c'est que ce modelé soit associé à des sols ou des régimes hydriques différents, et qu'en fin de compte il en résulte des interactions spécifiques d'où émergeont des unités non identiques.

Dans le cas que nous venons de considérer, c'est-à-dire le modelé, les modalités sont des caractéristiques qualitatives. Elles sont cependant comparables entre elles, si on se réfère à leurs positions topographiques. On peut alors les hiérarchiser selon un certain ordre (de l'amont vers l'aval, des positions hautes vers les positions basses ...). On dit alors que ces caractéristiques possèdent des *relations d'ordre* ; ce sera un des critères de définition de la structure du système (voir plus loin). De même, elles possèdent une certaine hiérarchie spatiale : un certain nombre d'entre elles sont reliées par des "lois de répartition". Ce seront les relations topologiques, qui constitueront le deuxième critère de définition de la structure. Ces deux types de relations se retrouveront plus ou moins pour chaque "palette" des autres composantes pertinentes.

En fin de compte, c'est chaque unité de milieu ainsi définie par ses caractéristiques qui pourra être mise *en relation* avec les autres.

Jusqu'à présent, le rôle du temps n'a pas été pris en compte puisque nous raisonnions sur l'état actuel du système. Or la dimension temporelle intervient dès que l'on considère la *genèse* et *l'évolution* du paysage. Il est clair en effet qu'avec le temps les éléments (unités de milieu) se modifient. Il peut y avoir transfert d'éléments d'une classe-repère dans une autre, ou bien disparition de certaines de ces unités de milieu et apparition de nouvelles, le tout s'accompagnant évidemment d'une structure changeante. Des phénomènes d'hystérésis, d'inertie et de résistance différentielle vis-à-vis des fluctuations de l'environnement, font que certaines caractéristiques peuvent subsister, à l'état de reliques, longtemps après que les conditions extérieures aient changé. C'est le cas par exemple des héritages paléo-climatiques ou d'anciens niveaux de bases (sols rouges résiduels, buttes cuirassées, terrasses anciennes ...) ou bien encore d'activité termitique périmée ("*stone line*"...).

De ce fait, les caractéristiques d'une unité de milieu à un moment donné peuvent avoir une histoire. De nouvelles se surimposent ou utilisent continuellement les anciennes. Qu'elles soient héritées, actuelles ou "intermédiaires", toutes, même si elles ne sont pas en équilibre avec leur environnement actuel, possèdent leur pertinence explicative vis-à-vis de l'unité de milieu à laquelle elles appartiennent ; elles participent toutes à la structure actuelle du paysage.

Une caractéristique d'unité de milieu peut donc posséder une double signification :

- elle a un sens vis-à-vis de la définition de l'unité de milieu, et donc de la structure actuelle (synchronique) du paysage ;
- en tant que "trace", elle a un sens vis-à-vis de la genèse et de l'histoire de la région, si on sait identifier sa nature "héritée" et reconstituer les conditions de son environnement passé. Comme lors d'une enquête policière, un indice isolé apporte peu d'informations, mais plusieurs indices, d'ordres différents, correctement articulés, apportent en quelque sorte des "preuves".

VI - INTERACTIONS ENTRE CARACTERISTIQUES AU SEIN DES UNITES DE MILIEU

La plupart du temps les caractéristiques des unités de milieu ne sont pas indépendantes ; par leurs "interactions", elles s'expliquent les unes par les autres. Autrement dit, les "unités de milieu" constituent elles-mêmes des systèmes dont les caractéristiques sont les éléments.

Il y a interactions, ou mieux interdépendances, ou encore "causalités mutuelles" entre les caractéristiques d'une unité de milieu lorsque l'une des caractéristiques ne peut exister sans les autres.

Si l'on se réfère à l'état actuel, le terme "d'interdépendance" est en fait plus satisfaisant que celui "d'interaction". Ce dernier terme semble en effet supposer explicitement l'intervention d'une dynamique de flux (énergie ou matière). Or ce n'est le cas que si on se réfère aux processus de genèse des diverses caractéristiques, les uns permettant, favorisant ou interdisant certains autres. Dans

ce cas on peut vraiment parler d'interactions, c'est – à – dire d'antagonismes ou de synergies entre processus dynamiques ayant permis d'aboutir à l'état actuel. Comme il est toujours difficile d'apprécier dans quel état de stabilité ou d'évolution est l'unité,donc s'il y a effectivement des interactions actuelles de processus, il vaut mieux parler d'interdépendances des caractéristiques.

A quoi sont dues ces interdépendances ? Elles sont les conséquences des "grandes lois" qui régissent la genèse du milieu physique à l'échelle du paysage et que l'on peut appeler les "lois naturalistes" ; avec référence aux processus de tous ordres que l'on trouve dans les *cursus* et que l'on apprend lors des expériences de terrain, en matière de géologie, géomorphologie, pédologie, hydrologie, etc..., c'est à dire relatifs aux grandes composantes dont certaines modalités sont en fait les caractéristiques de l'unité de milieu.

Prenons par exemple le cas d'une unité de milieu en région soudanienne (fig. 1), définie par les 5 caractéristiques suivantes (tableau 1).

Tableau 1 : *Composantes et caractéristiques d'une unité de milieu en zone soudanienne*

Composantes	Caractéristiques de l'unité (interdépendantes)
Lithologie	Schistes "birrimiens" à passées d'amphibolites ("roches vertes")
Modelé	Glacis de piémont de collines de "roches vertes"
Sol	Sols vertiques à pavage de quartz
Régime hydrologique	Engorgement temporaire et ruissellement intense
Morphodynamique	Erosion en nappe et en ravineaux

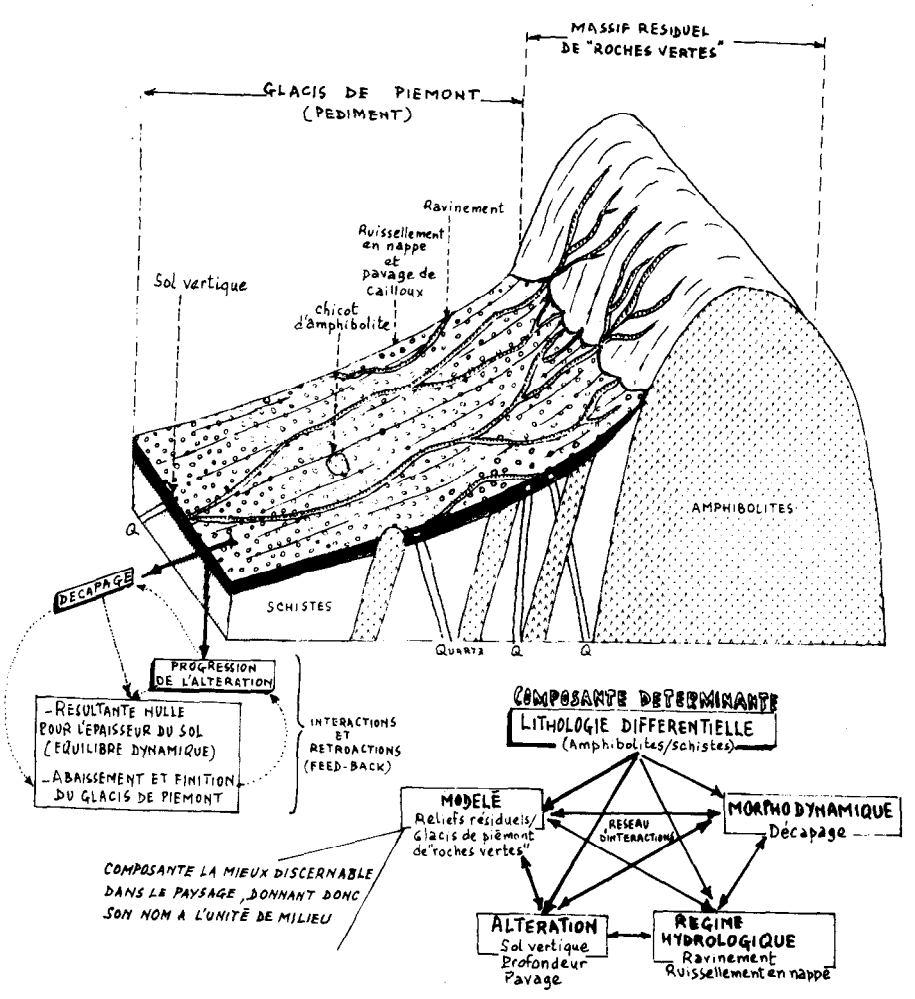


Figure 1 : *Interactions entre composantes et caractéristiques du milieu : Spécification et cohérence de l'unité de milieu "glacis de piémont de roches vertes" à l'échelle du 1/50 000 dans le système géologique birrimien en région soudanienne.*

Les lois naturalistes qui sont susceptibles d'intervenir (il ne s'agit pas en effet d'un hasard, mais de lois, puisque toutes les unités de milieu d'une même classe ont les mêmes caractéristiques) sont de plusieurs ordres :

- "lois" géologiques : dans le contexte des régions soudaniennes où se trouve l'unité en question, les racines des chaînes "birrimiennes" arasées (orogenèse précambrienne) montrent une association, en couches redressées, de roches métamorphiques d'origine volcanique : les schistes à filons de quartz et les amphibolites ("roches vertes" birrimiennes).

- "lois" géomorphologiques : l'arasement du socle birrimien, consécutif aux multiples cycles altération/déblaiement, a mis progressivement en relief les gros bancs d'amphibolite, sous forme d'alignements collinaires. Les schistes, plus rapidement altérables, ont donc été déblayés plus vite. L'évolution géomorphologique "normale" de ces deux ensembles lithologiques conduit à la création de "reliefs résiduels" rocheux et au façonnement en piémont d'une surface régulière bien tendue (appelée surface "fonctionnelle"), qui devient concave et se redresse en amont pour se raccorder aux "roches vertes". Il s'agit d'un glacis de piémont modelé régulièrement par l'énergie cinétique du ruissellement en nappe qui se dissipe progressivement vers l'aval.

  Le déblaiement des altérites sur schistes a progressé de l'aval vers l'amont jusqu'à ce que le front d'érosion butte contre le noyau dur d'amphibolite. A ce stade, le processus a été bloqué, et il s'est créé une surface d'équilibre concave appelée "pédiment" ou glacis de piémont. Il ne pouvait en être autrement par contre, l'inverse n'est pas vrai : un pédiment peut se façonner sur d'autres couples lithologiques, à condition que ce soit une roche dure et une roche plus tendre ; c'est cette association qui est significative). On peut appeler cela une *"loi" d'interaction* entre une structure géologique initiale et des processus de déblaiement et de façonnement différentiels, "orientés" par cette structure. Il y a "interaction" : géologie lithologie/géomorphologie (modelés).

- "lois" pédologiques : la "Science des Sols" nous dit que d'une part sur un tel substrat avec un tel amont (roches basiques) et

d'autre part sous les conditions climatiques existantes (caractéristiques constantes pour tout le système), il ne peut se former que des sols vertiques. On a là encore ce qu'on peut appeler une loi. Il y a "interactions" : géologie/ géomorpho-logie/pédologie.

- "lois" hydrologiques : sur un tel niveau d'argiles gonflantes, le sol vertique est nécessairement engorgé en saison des pluies et ce régime hydrique "renforce" encore la pédogenèse vertique. Les pluies ne peuvent plus s'infiltrer, elles ruissellent donc de façon intense et généralisée.

  Il y a cette fois "interactions" : géologie/géomorphologie/ pédologie/hydrologie.

- "lois" de la morphodynamique : sur un glacis de piémont à pente sensible, avec un ruissellement intense, il y a forcément au plan local concentration des ruissellements. Le sol, très argileux et sans nappe phréatique, de par sa nature vertique et sa très faible porosité, est favorable à une incision linéaire avec parois verticales, donc à la formation de petits ravins ... Entre les ravineaux, la vitesse de la lame d'eau ruissellante entraîne une pellicule boueuse : il y a érosion en nappe.

Cette érosion a deux conséquences : en éliminant la terre fine, elle concentre en surface des cailloux de quartz (issus des nombreux filons) ; il se forme un pavage qui rentre dans les caractéristiques du sol. D'autre part la troncature progressive du sol concourt au façonnement du glacis. On a ainsi bouclé la boucle. Le front d'altération descend en même temps que le décapage progresse. L'épaisseur du sol vertique correspond alors à un *équilibre dynamique* : le départ en surface est compensé par un gain en profondeur. La surface s'abaisse par érosion "naturelle", le glacis de piémont continue à se façonner, tout en maintenant une couverture pédologique. Mais l'équilibre dynamique peut être rompu si l'homme intervient : à la limite, on arrivera au stade *bad lands* sur schistes.

Finalement, en ajoutant l'hydrodynamique, on obtient ainsi l'ensemble des "interactions" entre composantes, qui permet de spécifier l'unité de milieu.

VII - RELATIONS ENTRE UNITES DE MILIEU : STRUCTURE DU PAYSAGE

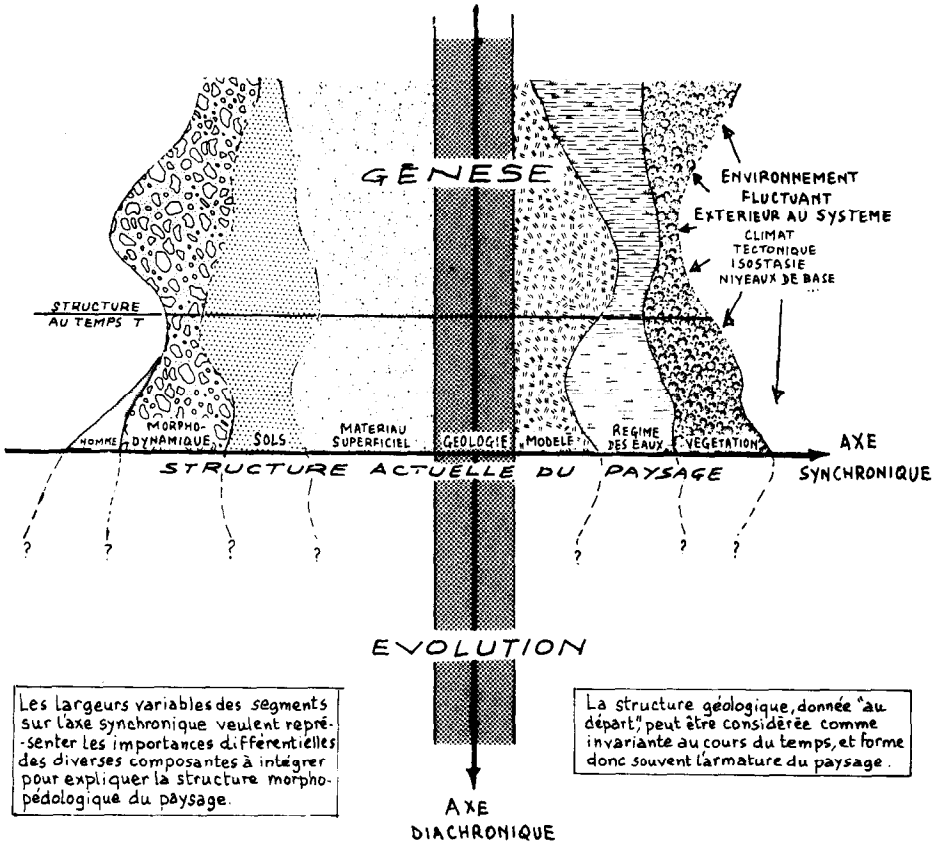
La structure d'un système est la manière dont ses éléments sont "arrangés". C'est donc une notion *statique*, à un moment donné, à l'opposé des notions d'interactions, de flux, de processus, d'évolution ..., qui sont les aspects *dynamiques* du système et qui "traversent" le cadre structural. Celui-ci peut donc se représenter, à un moment donné, selon un axe horizontal dit "synchronique". L'évolution du système s'imagine sur un axe vertical dit "diachronique" (fig. 2). Une structure n'est pas fixe, mais elle est perceptible et identifiable pour chaque "tranche" de temps. Elle est susceptible de transformations liées à l'évolution du système et, par là même, de chaque classe d'unités en relation, d'une part avec son fonctionnement interne propre, d'autre part avec les fluctuations de son environnement.

Une structure se constate et émerge à l'issue d'une "analyse structurale" ; en revanche, elle s'explique par la considération de la genèse du paysage.

Dans le cadre du paysage, système spatial par excellence, ce qui compte avant tout c'est la perception et la représentation de la structure. C'est l'objectif primordial de la cartographie morpho-pédologique.

A notre échelle temporelle, on peut considérer que les unités de milieu présentent suffisamment de caractéristiques fixes, notamment leurs positions dans l'espace les unes par rapport aux autres (voisinages et imbrications mutuelles), leurs formes et leurs dimensions.

Les unités de milieu, qui remplissent la totalité de l'espace du système (contiguïté des éléments), sont reliées selon une structure spatiale dite *topologique*. Cela signifie qu'elles ne sont pas réparties au hasard entre elles, mais suivent des "lois de répartition" (toposéquences, hydro-séquences ...). Ces relations doivent ressortir sur la carte morpho-pédologique. Les formes des limites d'unités en font partie.



Les largeurs variables des segments sur l'axe synchronique veulent représenter les importances différentielles des diverses composantes à intégrer pour expliquer la structure morphopédologique du paysage.

La structure géologique, donnée "au départ", peut être considérée comme invariante au cours du temps, et forme donc souvent l'armature du paysage.

Figure 2 : *Schéma évolution/structure : composantes et déformations de la structure morphopédologique au cours du temps*

En dehors de ces relations dans l'espace, les classes d'unités de milieu présentent aussi des *relations structurelles d'ordre*, qui peuvent exprimer des "hiérarchies" entre les modalités d'une même composante. Ces hiérarchies sont basées sur des "échelles de valeur" des composantes qui peuvent se classer semi – quanti –

tativement (parfois quantitativement). Par exemple, pour certaines classes d'unité, la composante "régime hydrique" peut présenter une hiérarchie des durées d'engorgement. Il faut donc, pour que des relations d'ordre puissent s'établir entre les classes d'unités (ou certaines classes d'unités), qu'il entre dans leurs définitions des prédicats qualitatifs communs, par exemple "imprégnation ferrugineuse" (⟶plinthite meuble, carapace, cuirasse), "engorge-ment" (⟶ profondeur, durée ...), "profondeur d'une carapace", "gravillons" (⟶plus ou moins soudés), "compacité" (⟶faible à forte) etc ... Ceux-ci constituent alors les points fixes des comparaisons susceptibles d'un classement par "gammes de valeur". Vis-à-vis de ces composantes, on peut alors ordonner entre elles certaines classes d'unités. Ces relations d'ordre apparaîtront dans la légende de la carte qui, elle, ne sera consacrée qu'à la structure spatiale.

Dans quelques cas particuliers, à très grande échelle en général, des classes d'unités ne sont définies que par les modalités au sein d'une seule composante et ne se différencient donc entre elles que par les "valeurs" classables de cette unique composante : "teneur en argile" par exemple dans des alluvions non différen-tiables autrement, ou dans les "sols dior" du Sénégal, ou bien dans les "terres de Barre". On retrouve alors le cas de la cartographie thématique.

VIII - L'EVOLUTION DU PAYSAGE - IMPORTANCE DU TEMPS

Le paysage, comme tout système ouvert soumis aux fluctuations de l'environnement, évolue. Il est en continuelle transformation. S'il était isolé de l'extérieur, il évoluerait vers un état d'équilibre thermodynamique irréversible, totalement désordonné et sans structure. Ce sont les échanges avec l'extérieur qui entretiennent sa "vie", son fonctionnement, son organisation, sa complexité et sa diversité.

A notre échelle, qui correspond à une fine tranche temporelle vis-à-vis des temps géologiques et même du quaternaire, on peut considérer que le système est "figé". Ses éléments et sa structure sont définis, caractérisés et représentés dans une optique synchronique. Dans ce cas, les unités de milieu ne changent pas

de place et de nature ; elles ne se déforment pas non plus. Quant aux relations structurelles, elles ne se modifient pas sensiblement.

En réalité, entre deux instants suffisamment éloignés, les unités de milieu du paysage ne sont pas les mêmes en nature, en topologie, en nombre : le modelé, les sols, les matériaux superficiels, les régimes des eaux, les processus morphodynamiques se transforment et se réajustent en liaison avec les changements de conditions extérieures (climat, niveaux de base lointains, isostasie, tectonique ...). Les interactions ne sont plus les mêmes, donc également les unités de milieu et leurs arrangements.

1. Exemples d'évolution du paysage

Avant d'en venir aux exemples concrets, remarquons que le paysage possède en général deux invariants : la litho-structure géologique du substratum et la pesanteur. La géologie peut souvent être considéré comme "point-fixe" intrinsèque au système, alors que la gravité est une constante spatio-temporelle.

En l'absence d'ajustements isostasiques ou de mouvements tectoniques, la tendance du paysage, quelles que soient les fluctuations climatiques, est d'atteindre son plus bas niveau d'énergie potentielle, qui se traduit par un aplanissement général des reliefs.

Un modelé se rapproche d'autant plus vite de cet état que l'action de la gravité est préparée par l'affaiblissement de la cohérence des matériaux (c'est-à-dire leur altération) et aidée par l'énergie cinétique des pluies se dissipant en énergie mécanique, moteur des processus d'érosion (de tous ordres) qui réduisent les dénivellations. On se rapproche de cette situation dans certaines régions intertropicales humides à socle stable (Afrique Centrale, Amazonie ...).

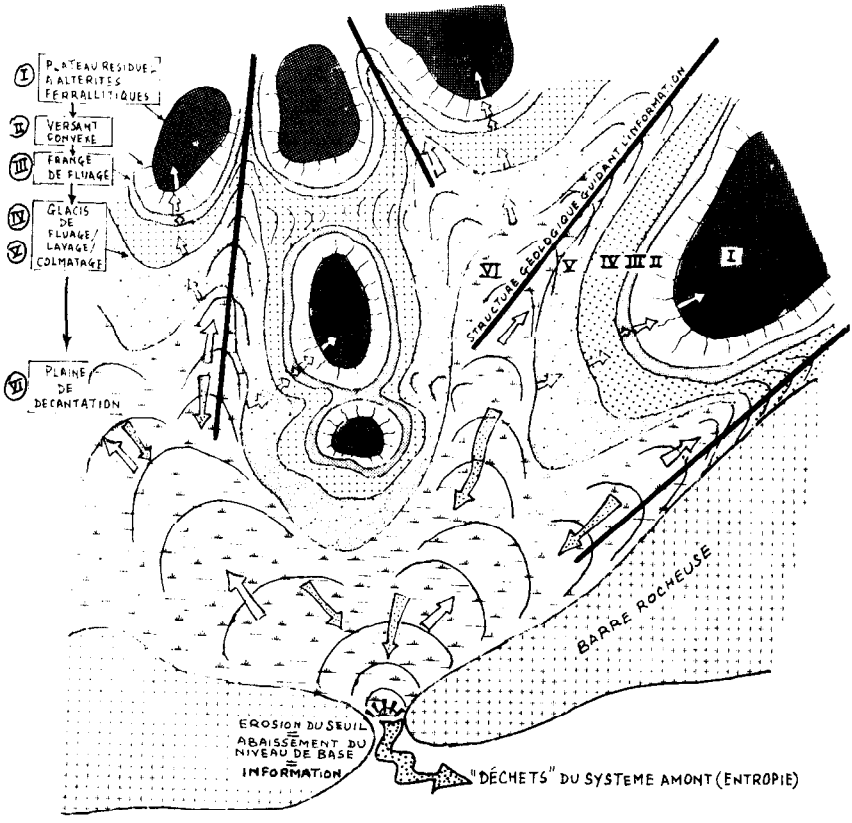
De la même façon, on pourrait parler de la tendance à une diminution de l'énergie chimique du fait de l'altération du substratum, sous un climat et un modelé donnés supposés invariants.

1er exemple : Madagascar (fig. 3 et fig. 4)

En région tropicale humide, comme à Madagascar (RAUNET, 1984 et 1985) ce stade ultime d'altération géochimique serait le manteau d'altération ferrallitisé dont l'épaisseur souvent considérable (50 mètres) ne pourrait cependant pas descendre en dessous du niveau de base aval qui évacue les produits d'hydrolyse par l'intermédiaire des nappes phréatiques imbibant les altérites ; le plancher ne pouvant pas être, topographiquement, en dessous des exutoires. Naturellement l'approfondissement du front d'altération hydrolytique suit la baisse des niveaux de base. Mais les altérites ne peuvent pas toutefois s'approfondir au-delà d'un seuil d'effondrement de l'édifice dont le poids devient trop important, vis-à-vis de sa faible cohésion (d'autant plus qu'il est imprégné par une nappe).

A un moment donné, il y a fluage régressif des altérites noyées et évacuation de celles-ci sous forme de lames boueuses transitant dans les bas-fonds qui, symétriquement, s'élargissent (parfois jusqu'au stade de véritable "surface d'aplanissement").

Dans un tel exemple, on voit qu'il y a concurrence ou synergie (interaction) entre plusieurs processus : géochimique, morpho-dynamique et hydrologique. L'altération transforme la roche, y crée son propre aquifère (drainé par les niveaux de base), qui active encore plus l'altération du fait de l'évacuation rapide des produits d'hydrolyse. Quand la nappe et l'altération se rapprochent de la cote du niveau de base local (bas-fonds par exemple), les sorties de solutés ralentissent, ce qui modifie les équilibres chimiques et inhibe la descente du front d'altération. On atteint un état stationnaire. Il y a donc des phénomènes typiques de *rétroactions*, d'abord positive (accélération de l'altération), puis négative (arrêt de l'altération). L'information "concentration en solutés de la nappe" (induite par le processus d'altération même) rétroagit sur la vitesse de ce processus d'altération, pour l'accélérer d'abord, et pour la stabiliser par la suite.



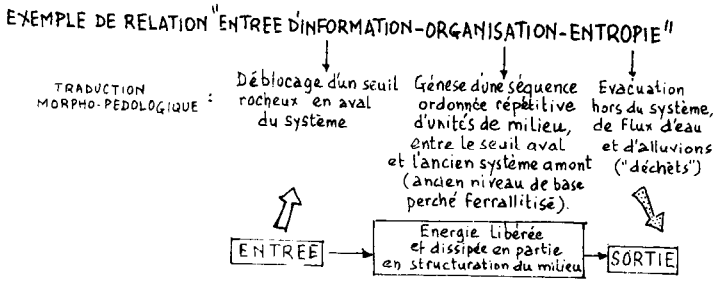


Figure 3 : *Modelé cybernétique d'évolution d'un paysage tropical humide (Madagascar)*

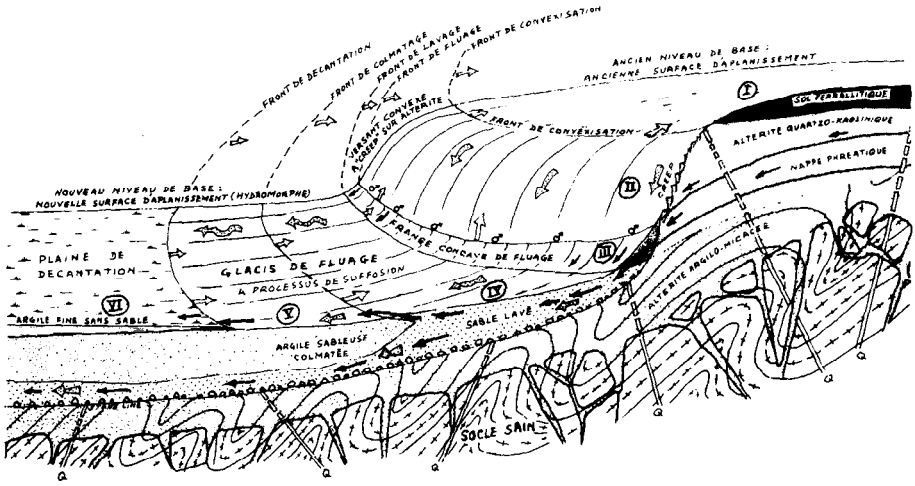
Lorsque le niveau de base extérieur baisse (tectonique, déblocage de seuil ...), le niveau de base phréatique descend, réactivant le drainage des nappes, donc l'altération ; à un moment donné, la couverture pédologique, du fait de son poids et de l'activité mobilisatrice de la nappe circulante à sa base, s'effondre et "flue" (lentement et imperceptiblement) de façon régressive, de l'aval vers l'amont, pour former un nouveau niveau de base local. Celui-ci, suivant l'ampleur de la dynamique de lent fluage (latérale ou généralisée) peut être un nouveau bas-fond emboîté dans l'ancien, ou bien une véritable *surface d'aplanissement*, rabotant les "racines" des altérations situées au coeur des collines préexistantes. On a ainsi "transformation" de collines ou de plateaux (ancienne surface) fortement ferrallitisés, en nouvelle surface d'aplanissement hydromorphe fonctionnelle. C'est un exemple d'évolution du paysage conditionnée par une simple baisse lointaine de niveau de base. L'information "baisse du niveau de base" (ou "augmentation de l'énergie potentielle") demande un certain délai de transmission pour arriver et provoquer une action sur le paysage considéré. Ce décalage spatio-temporel fait que le paysage a une réponse plus ou moins retardée à une sollicitation extérieure, en particulier en fonction de son éloignement. L'information est transmise par un "signal" qui est ici le "front de fluage régressif" dont l'onde (fig. 3), rayonnant en éventail, atteint d'abord les zones aval du paysage avant de remonter vers l'intérieur. Comme pour les signaux électromagnétiques de la "théorie de l'information", le "front de fluage" (ou d'érosion dans le cas de la morphodynamique de surface) trouve, au fur et à mesure qu'il remonte, des obstacles ("bruits") sur son trajet (barres rocheuses, différences de comportement des altérites sur roches différentes ...) ; ceux-ci lui font perdre alors de l'énergie en l'amortissant et l'altérant, le canalisent dans certaines directions ou encore le bloquent tout à fait ; dans ce dernier cas, si en amont l'information n'est pas arrivée, le niveau de base reste fonctionnel et n'est pas de ce fait emboîté par le nouveau.

En poursuivant l'étude de cet exemple, il faut s'intéresser maintenant à ce qui se passe dans la plaine (ou bas-fond) qui constitue en aval le nouveau niveau de base "fonctionnel" (niveau de base non seulement pour les eaux de surface mais également pour les nappes, RAUNET, 1985b).

Au fur et à mesure du recul du "front de fluage", les altérites s'étalent et sont évacuées en aval par des chenaux préférentiels qui parcourent les glacis de fluage. Les nappes d'altérites affleurent à la base des versants convexes, suivant une légère concavité. Elles favorisent ainsi le glissement des altérites des versants qui, de ce fait, reculent. En contrebas, les nappes s'étalent et lavent dans sa partie supérieure la couche de matériaux issus du fluage antérieur. Il se crée donc, en amont du glacis, une couche lavée blanche de sable résiduel. Les argiles évacuées par lavage transitent vers l'aval avec les flux phréatiques hypodermiques et viennent colmater cette même couche sableuse lavée bien antérieurement. L'aval du glacis/plaine est donc argilo-sableux à porosité entièrement colmatée. Il en découle que les eaux phréatiques chargées en constituants argileux qui étaient sub-affleurantes sur les zones lavées, ne pouvant plus traverser la zone colmatée, se disjoignent en deux nappes : d'une part une nappe de surface qui dépose un peu plus en aval ses argiles issues du lavage de l'amont sous forme d'alluvions fines sans sables, d'autre part une nappe profonde s'écoulant sous le niveau colmaté argilo-sableux (1 m d'épaisseur) et qui "lave" cette fois le matériau sous-jacent qui devient à son tour totalement sableux, avant de se colmater en aval et donc de renforcer l'épaisseur de ce matériau.

En définitive, dans ce système, il existe 5 fronts dynamiques sub-parallèles remontant d'aval vers l'amont et délimitant 6 unités de milieu (fig. 4) :

- *le front de décantation* : limite alluvions fines/argile sableuse de colmatage ;
- *le front de "colmatage"* : limite argile sableuse colmatée/sable lavé ;
- *le front de "lavage"* : limite sable lavé/petit glacis concave de fluage argileux ;
- *le front de "fluage"* : limite glacis de fluage/versant convexe à "*creep*" ;
- *le front de convexisation de la surface supérieure* : limite plateau/versant convexe ("demi-orange").



RELATIONS FONCTIONNELLES ET SPATIALES ENTRE UNITÉS DE MILIEU EN TRANSFORMATION.
INTERACTIONS DES PROCESSUS GEOCHIMIQUES, HYDROLOGIQUES, PHYSICO-CHIMIQUES ET MORPHODYNAMIQUES.

FLUX DE MATIÈRE NON DISSOUTE, VERS L'AVAL, AVEC PROCESSUS DE TRANSFORMATION (MODELE DU "TAPIS ROULANT"):
- "Creep" des altérites sur le versant convexe.
- Couche de fluage (en cours de lavage) en transit. Colmatée et stabilisée ultérieurement.
- Evacuation de colloïdes argileux dans la nappe phréatique (soutirage → finition de l'aplanissement)
- Placage d'une stone-line quartzeuse.
- Décantation argileuse fine

FLUX D'EAU LIBRE (NAPPES PHREATIQUES), DESTABILISATEURS ET MOBILISATEURS DE MATERIAUX

RECUL VERS L'AMONT DES FRONTS DYNAMIQUES, SUB-PARALLELES ET COORDONNÉS.
REMONTEE DE L'INFORMATION "EROSION D'UN SEUIL ROCHEUX EN AVAL DU PAYSAGE", DECLENCHANTE DE PROCESSUS EN INTERACTIONS QUI GENERENT DE NOUVELLES UNITÉS DE MILIEU.

Figure 4 : *Exemple de structuration et d'évolution du paysage morpho-pédologique en région tropicale humide (Lac Alaotra - Madagascar)*

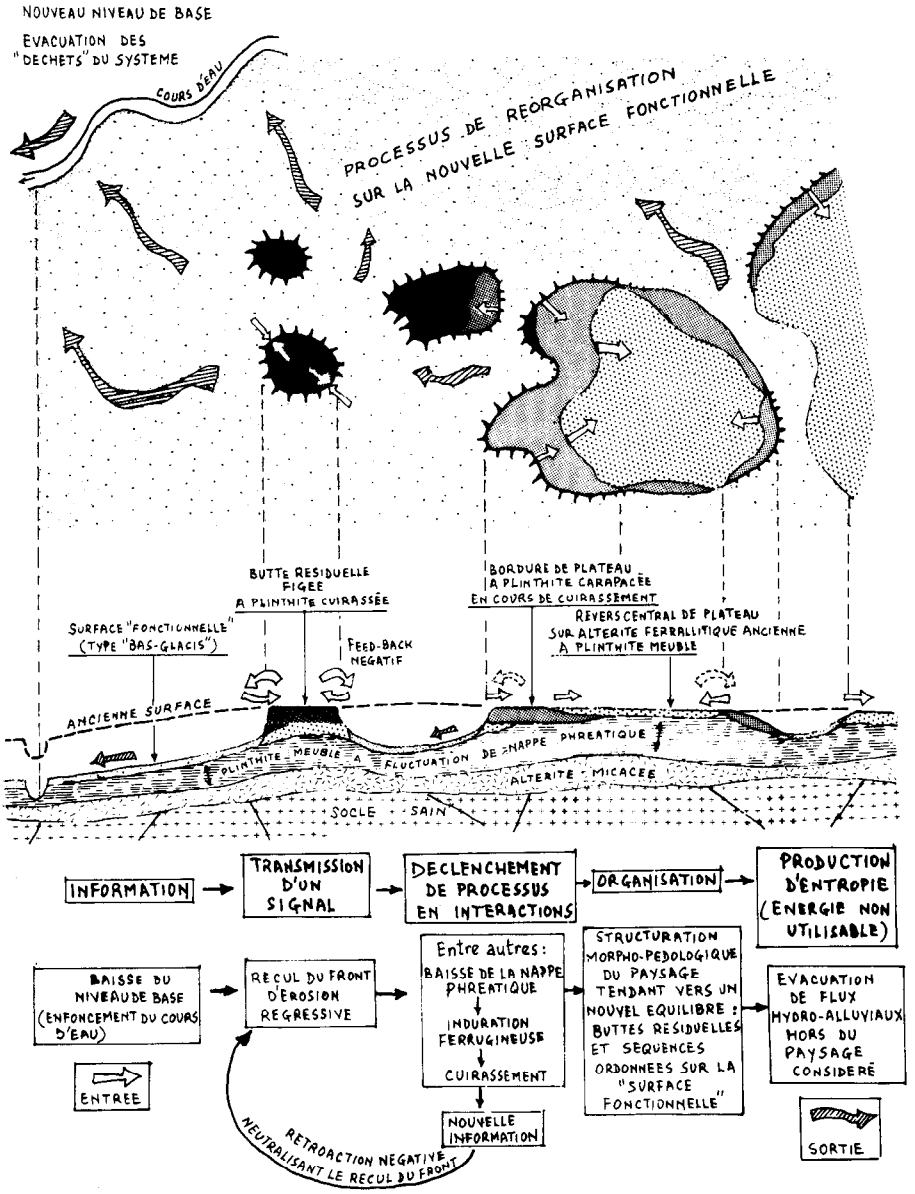


Figure 5 : *Exemple d'évolution d'un système soudanien. Interactions et rétroactions de processus impliqués dans la genèse des buttes cuirassées*

vu, en retour (*feed – back*) joue un rôle sur la poursuite de cette altération. Cette nappe induite subit d'amples fluctuations qui sont à l'origine de la redistribution et de la ségrégation des hydroxydes de fer qui finissent par imprégner fortement les altérites kaoliniques supérieures, les transformant en "plinthite" (zone tachetée à canalicules). Un léger changement climatique (assèchement ou régime pluviométrique plus contrasté) s'accompagnant d'une baisse du niveau de base se traduira sur le milieu (avec décalages spatio – temporels) par un déblaiement remontant de la surface d'origine et l'emboîtement en contrebas d'une nouvelle surface "fonctionnelle" sous la surface "ancienne". En ce qui concerne les nappes phréatiques, cela va se traduire par leur baisse régulière, malgré les fluctuations annuelles qui vont continuer à concentrer le fer pour épaissir encore davantage la plinthite.

Une autre conséquence est que la partie supérieure de cette plinthite, au fur et à mesure de la descente de la nappe, sera à l'abri de ses fluctuations. Les hydroxydes évolueront en sesquioxydes de plus en plus durs, transformant la plinthite meuble d'origine en carapace alvéolaire, puis en cuirasse qui armera de plus en plus la surface ancienne. Sous la cuirasse se maintiendra une plinthite encore meuble au dessus de l'altération hydrolytique noyée par la nappe, en cours de kaolinisation. Ce matériau friable est susceptible de déblaiements aisés. Or, il faut voir que ces processus sont en interactions spatio – temporelles évolutives. Ils se commandent, s'amplifient ou se freinent les uns les autres.

L'information, qui est ici le changement climatique ou la modification du niveau de base, va circuler comme un signal remontant, correspondant à l'onde du front d'érosion, en contrebas et en amont duquel le milieu répondra par de multiples transformations consécutives au déclenchement de nombreux processus. La baisse de la nappe est rapide au début du recul du front d'érosion, sa pente hydraulique est assez forte ; la plinthite n'a pas encore eu le temps de s'épaissir et de s'indurer fortement ; le déblaiement de la première surface se fait aisément. Avec le temps, donc avec l'éloignement du front par rapport à son site d'origine, et ainsi au fur et à mesure de sa pénétration à l'intérieur de la

surface "ancienne", les processus d'induration en amont s'intensifient.

Autrement dit, plus le front recule, plus il atteint des altérites où la nappe fluctue depuis plus longtemps, donc à plinthite d'autant plus fortement imprégnée en fer et, par conséquent, plus le rabattement de la nappe induit par le front, en amont de celui-ci, se répercutera par un fort cuirassement de cette plinthite. Il y a un moment où, par rétroaction négative, l'énergie de recul du front ne pourra plus vaincre la résistance de l'épais chapeau cuirassé que ce recul du front a lui même induit. La dynamique s'arrêtera : subsisteront alors des buttes cuirassées figées dans le paysage, dont le processus de démantèlement est provisoirement stoppé.

La butte peut être considérée comme "stable" du point de vue morphodynamique. Sa topographie représente un héritage du niveau de base antérieur à la perturbation de l'environnement. En revanche, sa cuirasse, qui s'est formée pendant les processus de réajustement, est donc postérieure ; on peut considérer qu'elle est contemporaine de l'environnement actuel et qu'elle n'est donc pas un "héritage".

Ainsi, une unité de milieu est, la plupart du temps, une combinaison de caractéristiques dont certaines sont anciennes, d'autres récentes et d'autres encore issues de l'environnement actuel. Il y a des héritages que les processus fonctionnels actuels peuvent "traverser".

2. Différents types d'évolution

Un paysage morpho-pédologique, ou une unité de milieu particulière, peuvent être plus ou moins en équilibre avec leur environnement. Comme tout système ouvert, le paysage a deux modes d'existence possible : le maintien ou le changement. Le maintien dans son ensemble est rare, car les unités de milieu ne sont généralement pas au même stade (certaines changent, d'autres se maintiennent). Ainsi le milieu peut être :

- en équilibre dynamique (stabilité),
- en déséquilibre potentiel ("pénéstabilité"),
- en déséquilibre manifeste (instabilité).

L'équilibre "dynamique"

Il correspond au maintien dans le temps de la forme, de la cohérence et de la structure du milieu. Pour qu'une telle stabilité soit atteinte, il faut que l'environnement "informe" le milieu depuis suffisamment longtemps sans perturbation significative, de façon à ce que les interactions (rapports de forces entre flux de l'extérieur et processus internes) aient trouvé "l'équilibre". A ce moment là, les flux de matière et d'énergie arrivant dans le milieu assurent simplement le fonctionnement interne nécessaire au maintien de la structure. Cette régulation repose sur un "système" de rétroactions négatives qui évitent "l'emballement" du système, c'est-à-dire sa tendance à la destruction plus ou moins rapide et la convergence vers un autre état de stabilité.

Un exemple de paysage stable en équilibre avec son environnement, est le système "collines en demi-oranges/bas-fonds" en région intertropicale humide sur socle stable. Nous avons vu précédemment (Madagascar) en quoi consistait cet équilibre, de quelles interactions et rétroactions il était tributaire.

Naturellement la notion de stabilité est relative à *l'échelle de temps* considérée. A notre échelle, on considérera qu'un milieu est stable si on n'y repère pas de processus de changement à court terme, directement perceptibles, tels que les processus hydrodynamiques et morphodynamiques. Pour nous, une unité dont le sol continue de s'approfondir ou de se lessiver peut être considéré comme stable, alors qu'à l'échelle du quaternaire elle n'a pas atteint son équilibre, le sol s'épaississant et s'acidifiant lentement sans que les processus soient en réalité perceptibles.

La notion de stabilité est également relative à *l'espace*. Une unité de milieu peut être "grignotée" en périphérie par des processus remontants ou centripètes (front d'érosion par exemple), alors que sa partie centrale possède une stabilité "en sursis" pendant un certain temps. On n'est même pas sûr que le front d'érosion détruira un jour l'ensemble de l'unité. Il y aura peut-être des processus de rétroaction négative qui

s'opposeront au recul du front, comme nous l'avons vu précédemment.

En fait, en dehors de cas évidents (remblaiement deltaïque, *bad-lands* ...), il est toujours difficile d'apprécier, au delà de notre échelle temporelle, la stabilité ou l'instabilité d'une unité de milieu :

- Est-ce qu'un sol s'approfondit ?
- Une formation végétale est-elle climacique ou en régression ?
- Une nappe phréatique, au-delà de ses fluctuations visibles, est-elle en phase de descente ?
- Une terrasse alluviale est-elle déjà une terrasse "ancienne" ou est-elle encore susceptible d'être alimentée ?
- Un talus de bowal est-il figé (rétroactions négatives) ou continue-t-il de reculer ?
- La profondeur d'une discontinuité "planique" est-elle fixe pour un milieu donné ?
- Se forme-t-elle *"per descensum"* ou *"sui generis"* ?

Nous avons vu que même en cas d'érosion en nappe, il pouvait y avoir un équilibre dynamique "stabilité d'un système ouvert" si le décapage est, globalement dans l'unité de milieu, compensé par l'approfondissement du front d'altération.

Le déséquilibre

Un milieu stable, agressé par l'environnement et dont la cohérence interne est insuffisante pour y résister, évoluera vers un autre état stable, en passant par des processus de réajustement. La même idée peut être exprimée en disant que les interactions milieu/environnement l'emportent sur les interactions internes du milieu dont la "capacité homéostasique" est dépassée. Un milieu ayant une très faible capacité homéostasique est très fragile. Un petit changement extérieur le modifiera. On dit souvent que dans ce cas, il est "pénéstable".

Par exemple, une colline ferrallitique forestière à bon stock organique est pénéstable. Le défrichement et la mise en culture la "dégraderont" très vite par minéralisation accélérée

de la matière organique, acidification rapide, érosion. Un vertisol résiste mieux et se dégrade moins vite.

Comme la notion de stabilité, celle de déséquilibre est relative au temps. On est sûr de l'instabilité d'un milieu lorsque ses "stocks" (au sens large) et son organisation interne se modifient irréversiblement à un rythme repérable par l'homme.

Un milieu stable ne modifie pas ses "réserves", malgré les flux d'entrée et de sortie. Ainsi un sol ferrallitique déforesté et cultivé (en cours de "dégradation"), perd sans contreparties matière organique, éléments minéraux et matière minérale solide ; sa structure devient massive. Pour essayer de contrecarrer cette dégradation, il faut injecter des "intrants" (fertilisants, amendements calcaires et organiques, plantes fixatrices d'azote, engrais verts ...) et éventuellement une nouvelle structure par gestion adéquate de l'espace (système de cultures, bandes anti-érosives, agroforesterie ...).

Un exemple, à Madagascar, de couples de milieux fortement instables à notre échelle temporelle est constitué par le système associant collines d'altérites éventrées en *lavaka* (ravins géants en spatules)/épandages de *baibohos* (alluvions micacées). Ce système dérive du couple stable à notre échelle (mais en évolution à un pas de temps plus long) associant : "collines en demi-orange"/plaine de "fluage". Au lac Alaotra, les deux systèmes coexistent : le premier dans les zones à rejet tectonique très récent, le second dans les zones non tectonisées. Cet exemple est très intéressant, car il nous montre, presque côte à côte, deux types d'évolution à partir d'états initiaux identiques :

. **l'une lente** : il s'agit d'une instabilité "douce" de genèse continue des modelés, des matériaux et des sols par des processus interactifs géochimiques, hydrologiques et hydro-dynamiques, imperceptibles directement. La perturbation de l'environnement, à l'origine de cette évolution est *l'usure progressive* du seuil rocheux en aval.

. **l'autre très rapide** : il s'agit d'une instabilité "brutale", catastrophique, discontinue. En amont, les collines pourries jusqu'au coeur s'éventrent brusquement et se vident à

chaque évènement d'une quantité énorme d'altérites. Symétriquement, en aval les produits s'étalent en se triant granulométriquement. La dissipation brutale de l'énergie potentielle du milieu amont sert d'énergie mécanique pour organiser tout aussi brusquement le milieu aval. Dans les deux cas l'eau sert d'agent mobilisateur des matériaux. Ici la perturbation de l'environnement à laquelle le paysage répond est un mouvement tectonique soudain et de relative faible durée.

Ces deux types d'évolution, l'un très lent, l'autre très rapide, sont un peu les extrêmes que l'on rencontre dans les paysages naturels. Dans la plupart des cas, les possibilités d'appréhension des processus par l'observateur se situent entre ces deux extrêmes.

CONCLUSION

Nous avons tenté de justifier pourquoi et comment on peut appréhender le paysage morphopédologique comme un système spatio-temporel ouvert soumis à des échanges permanents avec "l'extérieur", lui-même fluctuant. Les éléments du système sont les "unités de milieu", regroupées en classes-repères définies par des "caractéristiques" qui sont des modalités spécifiques des composantes pertinentes du paysage considéré, interdépendantes et toujours associées de la même façon.

Les unités de milieu sont en relations spatiales, leur arrangement définissant la "structure" du paysage. Quant à la genèse, aux transformations et à l'évolution du paysage, elles sont assurées par le fonctionnement du système qui est traversé par de multiples flux de matière et d'énergie, en provenance de l'environnement extérieur (climat, niveaux de base, tectonique, homme ...).

Les unités de paysage sont le siège de nombreux processus en interactions et rétroactions assurant, soit leur maintien, soit leur changement. Ces changements sont des réponses, souvent décalées par rapport à l'espace et au temps, aux variations externes du système, qui l'alimentent en matière, énergie et informations.

Certains concepts issus de la théorie de l'information (SHANNON et WEAVER, 1949) et de la théorie de la cybernétique (initiée par WIENER

en 1948 et ASHBY en 1958) étroitement associés à l'approche systémique, semblent pouvoir s'appliquer avec profit à la compréhension de la dynamique du paysage.

BIBLIOGRAPHIE

ASHBY (W.R.), 1958 – General systems theory as a new discipline. General systems yearbook, 3.

KILIAN (J.), 1974 – Etude du milieu physique en vue de son aménage-ment – Conceptions de travail – Méthodes cartographiques. *L'Agron. Trop.*, vol 29(2-3) : 141-153.

RAUNET (M.), 1984 – Le milieu physique de la région du lac Alaotra (Madagascar). Système et structure. Doc. IRAT, 226 p. + 2 cartes 1/50 000.

RAUNET (M.), 1985 – Les bas-fonds en Afrique et à Madagascar – géomorphologie – géochimie – pédologie – hydrologie. *Z. Géomorph.* NF. Supp. Bd., 52 : 25-62.

RAUNET (M.), 1985 – Bas-fonds et riziculture en Afrique. Approche structurale comparative. *L'Agron. Trop.*, 40(3) : 181-201.

SHANNON (C.) & WEAVER (W.), 1949 – A mathematical theory of communication. 11e ed., 1967. Urbana, Illinois, University of Illinois Press, 125 p.

TRICART (J.), 1974 – De la géomorphologie à l'étude écographique intégrée. *L'Agron. Trop.*, 29(2-3) : 122-132.

WIENER (N.), 1948 – Cybernetics. Hermann, Paris.