

Luc Opdecamp

# L'interdisciplinarité paysagénique

*Application à l'aluminisation des sols*



Juillet 2023

©Luc Opdecamp

# Table des matières

Avant-Propos .....	5
1. Introduction .....	6
1.1. Justification et objectifs .....	6
1.2. Le concept de paysages chez d'autres auteurs .....	7
1.3. Structure du livre .....	9
2. Éléments de paysagénie territoriale .....	12
2.1. Conception générale .....	12
2.2. Objets et dimensions .....	15
2.3. L'identification de communs ou facettes paysagéniques .....	15
2.4. Les niveaux d'organisation paysagéniques .....	17
2.4.1. Communs et holons de Ager .....	19
2.4.2. Communs et holons de Saltus .....	20
2.4.3. Communs et holons de Silva .....	21
2.4.4. Communs et holons de Urbs .....	22
2.4.5. Communs et holons de Hortus .....	22
2.4.6. Communs et holons de Aqua .....	24
2.4.7. Communs et holons de Desertum .....	24
2.5. Illustration: traits et caractères des landes de Gascogne .....	25
2.5.1. Traits et caractères du milieu naturel .....	25
- Données géographiques et géologiques .....	25
- Données géomorphologiques et pédologiques .....	27
2.5.2. Traits et caractères paysagéniques .....	28
- Évolution historique .....	28
- Données agropédologiques .....	30
- Données sociologiques et urbanistiques .....	33
2.5.3. Synthèse .....	35
2.6. Discussion .....	36
3. L'aluminisation des sols .....	37
3.1. Régimes écoclimatiques de pédogenèse .....	37
3.1.1. Régime de terre haute aride et semi-aride .....	37
3.1.2. Régime de terre basse à hydromorphie actuelle .....	37
- Terre basse à hydromorphie temporaire .....	37
- Terre basse à hydromorphie permanente .....	38
3.1.3. Régime de terre haute en climat humide ou sub-humide .....	38
3.2. Trajectoires paysagéniques d'acidification des sols .....	38
3.2.1. Respiration racinaire et microbienne .....	39
3.2.2. Nitritation de l'ammonium .....	41
- Apports d'ammonium par minéralisation de la matière organique .	41
- Apports d'ammonium par les engrais azotés .....	41
- Apports d'ammonium dans les eaux pluviales .....	42
3.2.3. Oxydation des sulfures de fer .....	42
3.2.4. Ferrolyse .....	42
3.2.5. Acidifications observées à plusieurs niveaux d'échelle .....	42
3.3. Trajectoires paysagéniques d'aluminisation des sols .....	43
3.3.1. Hydrolyse acide des minéraux primaires .....	43
3.3.2. Argiles et produits d'altération .....	44
- Développement du complexe adsorbant ou d'échange .....	45
- Pouvoir tampon contre l'acidification .....	45
- Aluminium amorphe .....	46
- Fer amorphe .....	46
3.3.3. Aluminisation physico-chimique .....	47
- Taux d'aluminisation ou indice "m" de Kamprath .....	47
- Formes polymérisées amorphes .....	48
- Aluminisation en présence de gibbsite .....	48

- Aluminisation en absence de gibbsite .....	50
- Interactions de l'aluminisation avec le phosphore .....	50
- Interactions de l'aluminisation avec la matière organique du sol ...	52
- Interactions de l'aluminisation dans les sols sulfatés acides .....	53
3.4. Récapitulation et discussion .....	54
4. Phytobiologie de l'aluminisation .....	56
4.1. Inductions physiologiques de l'aluminisation .....	56
4.1.1. Paroi cellulaire .....	56
4.1.2. Membrane plasmique .....	56
4.1.3. Cytosquelette racinaire .....	57
4.1.4. ADN du noyau .....	57
4.1.5. Discussion .....	57
4.2. Résistance et tolérance à l'aluminisation .....	58
4.2.1. Résistance par exclusion de l'aluminium .....	58
4.2.2. Résistance par augmentation du pH dans la rhizosphère .....	59
4.2.3. Tolérance par accumulation de l'aluminium .....	59
4.2.4. Tolérance par activation de voie métaboliques particulières .....	59
4.2.5. Discussion .....	60
4.3. Sensibilité de la croissance à l'aluminisation .....	60
4.3.1. Sensibilités des espèces en vases de végétation .....	60
4.3.2. Sensibilités des espèces en solutions de culture .....	63
4.3.3. Discussion .....	66
5. Dynamiques écologiques de l'aluminisation .....	67
5.1. Niveaux d'espace-temps écologiques .....	67
5.1.1. Changement d'échelle spatio-temporelle .....	67
5.1.2. Niche et biotope .....	67
5.1.3. Temporalités ante-préhistoriques de l'écosphère .....	69
5.2. Hasards et nécessités de l'évolution .....	71
5.2.1. Le couple darwinien hasard/sélection .....	71
5.2.2. Dynamique spatiale de l'évolution .....	72
5.2.3. Évolution de la biodiversité avec l'aluminisation .....	73
5.3. Progression et rétrogression des écosystèmes .....	76
5.4. Synthèse et conclusions .....	77
6. Traits et caractères paysagéniques d'aluminisation .....	79
6.1. Historique global des facettes paysagéniques .....	79
6.1.1. Colonisation humaine préhistorique au pléistocène .....	79
6.1.2. Progression de Ager, Hortus et Saltus depuis l'holocène .....	79
6.1.3. Historique de Silva depuis l'holocène .....	81
6.1.4. Conversions de Silva en milieux tropicaux humides .....	81
- Afrique .....	81
- Amérique .....	82
- Asie .....	82
6.1.5. Conversions de Silva en région européenne .....	84
6.1.6. Avènement et codéveloppement historique de Urbs et Hortus .....	85
- Des premiers villages aux premières villes .....	85
- Évolution de Urbs durant l'holocène .....	86
- Des caractères de la ville antique à la ville industrielle en Europe .	87
6.1.7. Discussion .....	89
- Dynamique des FP à l'ère quaternaire .....	89
- Controverses sur le concept d'Anthropocène .....	90
6.2. Focalisation agropédologique locale .....	91
6.2.1. Traits de HP de Silva en abattis-brûlis .....	92
- Situations et cadres géomorphologiques .....	92
- Une rotation longue et régénératrice de la forêt .....	93
- Effets temporaires du brûlis forestier sur le taux d'aluminisation des HP .....	94
- Effets du brûlis forestier sur les rendements agricoles .....	96

- Effets du brûlis forestier sur les adventices .....	96
- Agroforêts .....	97
6.2.2. Traits de HP de Silva en plantations d'eucalyptus au Mexique .....	98
6.2.3. Traits de HP de Saltus .....	99
- HP de Saltus d'altitude au Burundi .....	100
- HP de Saltus en basses Pyrénées françaises .....	101
6.2.4. Traits de HP de conversion de Silva en Ager .....	102
- HP de conversion en Ager rizicole de mangroves estuariennes en Guinée .....	102
- HP de conversion de Silva en Ager fourrager en Amazonie .....	103
6.2.5. Traits comparatifs de HP d'Ager pour le manioc et la patate douce ..	103
- Comparatif des rendements en fonction du taux d'aluminisation à Porto Rico .....	103
- Comparatif des rendements en fonction du taux d'aluminisation au Burundi .....	104
6.2.6. Traits de HP d'Ager en cultures pérennes .....	105
6.2.7. Discussion .....	106
7. Synthèse conclusive .....	108
7.1. Modèle interdisciplinaire .....	108
7.2. L'aluminisation et ses interactions systémiques avec le vivant .....	109
7.2.1. Le processus .....	109
7.2.2. Phytobiologie .....	109
7.2.3. Écologie .....	109
7.2.4. Évolution globale des FP .....	110
7.2.5. Interactions avec les HP agropédologiques .....	110
7.3. Considérations finales .....	11
8. Glossaire .....	112
9. Références citées .....	118

## Avant-Propos

Une partie des données publiées dans la littérature citée dans ce livre a été acquise dans le cadre de la "Coopération technique belge" avec l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU). Cet institut a hérité lors de l'indépendance du Burundi, en 1962, des infrastructures et structures de l'Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo belge (INEAC), parmi lesquelles figure la station expérimentale de Gisozi (ou Kisozi) en haute altitude (2.200 m). L'INEAC était en charge de la recherche agronomique pour le Congo et le Ruanda-Urundi.

Dans les années 1980, le siège central de l'ISABU est situé à Bujumbura et il comporte, outre des bureaux administratifs et magasins de logistique, le "Laboratoire de Chimie agricole", indispensable appui à l'ensemble des chercheurs de l'Institut. La direction scientifique et technique de ce laboratoire est alors assumée par mon confrère Jacques Gourdin. C'est de cette époque que datent les nombreux résultats analytiques des sols produits dans ce laboratoire. Ce dernier s'est forgé très vite une réputation de sérieux et de fiabilité dépassant les frontières du pays. Il faut signaler d'ailleurs qu'il avait calqué et testé ses méthodes d'analyses de sol par une relation soutenue avec feu le professeur Raymond Frankart, en charge du "Centre d'étude des sols tropicaux" du "Département des sciences du sol" de la "Faculté des sciences agronomiques" de l'Université catholique de Louvain à Louvain-la-Neuve (Belgique).

Parmi les méthodes de routine qui étaient ainsi adoptées figuraient d'office l'extraction au chlorure de potassium (KCl 1M) et la titration de l'aluminium échangeable du sol dès lors que le pH (H<sub>2</sub>O) de l'échantillon était inférieur à 5,8. C'est ainsi que le processus d'aluminisation des sols a très vite été diagnostiqué au Burundi et qu'il a pu faire l'objet de travaux approfondis de recherche en agropédologie. Ce sont ces travaux qui ont d'abord inspiré la rédaction de ce livre.

# 1. Introduction

## 1.1. Justification et objectifs

Depuis quelques décennies, l'on assiste à de profonds bouleversements dans la recherche scientifique. Plusieurs objets deviennent désormais thermodynamiquement "ouverts", alors qu'ils étaient auparavant "fermés" voire "isolés". Face aux nombreux composants qui les animent, la méthode scientifique se modifie et passe du réductionnisme des Lumières à une approche systémique.

La notion de holisme devient également primordiale car l'objet-système doit tenir compte de ses multiples composants associés. Ces derniers doivent être étudiés à plusieurs niveaux d'échelle selon l'environnement auxquels ils sont soumis. Le niveau de base du holisme est celui du concept de "holon" qui en désigne un bloc insécable, une sorte d'unité de construction du système.

La notion d'équilibre perd également tout son sens car ces systèmes sont dotés d'une dynamique complexe qui leur donnent une évolution imprévisible. Il s'agit non plus de prévoir son évolution mais de concevoir une adaptation aussi fiable que possible, à partir des connaissances systémiques déjà acquises.

La démarche scientifique pour les objets complexes, organisés sur différents niveaux et à nombreuses interactions internes et externes est typiquement pluridisciplinaire. L'idéal serait même qu'elle devienne interdisciplinaire ou transdisciplinaire suivant un modèle holistique, où chaque discipline exposerait ces propres holons pour accomplir une fusion et adopter un holon unifié de référence.

Quelques exemples de systèmes complexes dynamiques peuvent ainsi être cités : le climat global terrestre, la biodiversité et bien sûr l'écosystème écologique. Cette ouverture est doublée d'un intérêt de plus en plus marqué par les citoyens et les nombreuses parties impliquées. Ces nouveaux objets sont donc aussi socialement ouverts à la société. Il en résulte des controverses inévitables entre les nombreuses disciplines intéressées et entre les parties prenantes.

Le "paysage" est un objet de ce type. Il relève de plusieurs sciences tant naturelles qu'humaines. Il intègre même des conceptions esthétiques ou artistiques pour les éléments bâtis (sens commun du "beau", architectes, sculptures, etc.) et le pittoresque de certains aménagements (pratiques vernaculaires, paysagistes, etc.).

En plus de proposer un modèle interdisciplinaire, l'objectif est aussi de redéfinir comment les territoires sont répartis. De la parcelle forestière, d'élevage ou de culture jusqu'aux communes, villes, provinces et pays, des limites sont fixées très largement par l'administration. Il s'agit des parcelles cadastrales, des plans de secteurs, des héritages féodaux, des conflits et des guerres, etc. C'est typiquement une démarche descendante ("top-down"), du pouvoir politique vers les citoyens. Cela aboutit en général à des divisions de l'espace qui séparent les intérêts et pratiques des parties prenantes.

Il existe aussi des frontières ascendantes ("bottom-up") au niveau des villages, villes, forêt et campagne dont le tracé se conjuguent avec le naturel du milieu ainsi qu'avec l'évolution des us et coutumes des habitants. Elles réunissent les diverses catégories d'occupants dans un sorte d'humanisme paysager.

L'évolution paysagère est donc partiellement naturelle par la pratique d'un empirisme séculaire tant au niveau des aménagements et techniques d'exploitation que des plus-values économiques et sociologiques générées. Mais elle est aussi marquée par des sortes de cellules socio-politiques distribuées à plusieurs niveaux d'échelle, forgées selon des intérêts artificiels émanant des classes du pouvoir politique.

La population locale d'abord, puis la science, comme la géographie physique et humaine, la sociologie, les sciences appliquées, comme l'ingénierie civile et agronomique, mais aussi les architectes et paysagistes, se sont investis dans l'exploitation naturelle et culturelle des territoires et dans la définition de leurs frontières. On commence ainsi à expliquer et comprendre leur disparité et les mosaïques qui les composent. Nous en sommes au point

d'entrevoir une véritable "paysagénie" basées sur les caractères et les traits de l'objet "paysage", par un faisceau étendu de disciplines.

Ce terme de paysagénie introduit donc un néologisme. Il y associe à la fois celui de "génie" et de "gène", ce qui fait alors référence aux facultés de l'espèce et des populations humaines en matière technique, scientifique et artistique. Le paysage devient ainsi le résultat d'un design socio-culturel du territoire local, façonné selon la complexité et l'interaction de ses holons naturels et culturels.

En associant le paysage et le génie humain, la paysagénie en fait un système complexe toujours en mouvement. Les transformations se font tant par les variations naturelles (climatiques, géomorphologiques, écologiques) ou culturelles (économiques, sociales, écologiques). Il devient ainsi un système évolutif selon les nombreux processus qui l'animent et les divers acteurs et parties prenantes qui y œuvrent et y interagissent. En termes généraux, la paysagénie se définirait alors comme l'expression territoriale du génie humain, dans son art d'agencer les ressources naturelles locales avec ses besoins économiques et culturels.

Une application de la démarche interdisciplinaire est effectuée pour le processus d'aluminisation des sols. Ce dernier s'adresse à leur acidification et à ses effets phytobiologiques, écologiques et agronomiques. Une importante discussion en est dès lors proposée. L'aluminisation est une évolution pédogénétique normale qui peut être ralentie par des amendements minéraux au ou contraire fortement accéléré par des opérations de drainage dans les sols sulfatés acides potentiels. Naturellement, il se déroule en continu selon une dynamique plutôt lente, pouvant atteindre des milliers d'années. Il peut devenir contraignant pour les systèmes forestiers, de culture ou d'élevage, et par là même à l'implantation et au développement des villages, et des villes. C'est donc un processus pédogénétique hautement représentatif. Il peut se dérouler en sourdine et reste méconnu dans la différenciation spatio-temporelle de la paysagénie.

## *1.2. Le concept de paysage chez d'autres auteurs*

De nombreux auteurs explicitent ou éclairent l'une ou plusieurs des perspectives du paysage. Pour BERQUE (1987), le "paysage" est perçu d'abord comme science des milieux ou mésologie, c'est-à-dire celle de la relation qu'entretient une société avec l'espace et la nature. C'est en fait une conception très proche de la paysagénie. Cet auteur développe une épistémologie constructiviste de la mésologie à savoir une interaction intime entre le sujet et l'objet, entre la culture et la nature. Les paysages, les territoires, les habitats, monuments, aménités et nuisances, etc., sont des faits mésologiques. Ces faits obéissent à un ordre c'est-à-dire à une motivation, à un enchaînement de motifs spatio-temporels. Et dans ce processus de motivation, BERQUE (op. cit.) estime qu'il est bien difficile de distinguer ce qui est code ou matrice (forme formante) de ce qui est pratique ou empreinte (forme formelle).

La paysagénie va proposer dans cet ouvrage un modèle basé sur des processus de différenciation des codes ou matrices en ouvrant la porte à toutes une série d'experts, à commencer par les acteurs locaux eux-même. De plus, le modèle sera inspiré de la biologie évolutive en comparant le passé et le présent avec les nouvelles opportunités qui peuvent s'offrir ou s'imposer. Dans ce modèle évolutif, les concepts métaphoriques de génotype/génome (forme formante) et phénotype/phénomène (forme formelle) seront utilisés comme en génétique.

Pour ROGER (1997, p.138 et suivantes), un paysage n'est jamais naturel mais toujours culturel. Il distingue le "pays" des géographes et des naturalistes du "paysage" des peintres et des paysagistes. Il confère ainsi à cette distinction un *statut épistémologique éminent* selon CHOUQUER (2002). Ce dernier considère ainsi que ROGER (op. cit.) se met *dos à dos le pragmatisme scientifique des milieux et des environnements et l'esthétisme du paysage*. Quant à une autre conception telle que l'écologie du paysage, ROGER rappelle qu'elle est introduite par le biogéographe allemand Troll (*Landschaftökologie*, 1939). Un concept qui s'étend ensuite vers les pays de l'Est puis dans la pensée anglo-saxonne (*landscape ecology*). ROGER (op.cit., p.146) reconnaît que l'étude géographique ou écologique d'un lieu ou *pays*

n'est pas superflue et même que la connaissance des géosystèmes et des écosystèmes est indispensable, mais qu'elle reste inopérante dans la détermination des valeurs paysagères qui sont socioculturelles. Le même auteur (p. 151) préconise aussi de penser le paysage dans son processus évolutif et pas seulement comme un patrimoine à conserver ou protéger. Il s'agirait donc aussi de prendre en compte l'ensemble des phénomènes qui façonnent un territoire comme l'envisage la paysagénie ou l'étude des milieux.

CHOUQUER (2003) dresse sommairement les grandes lignes de l'écologie du paysage en proposant une recension du livre de Françoise Burel et de Jacques Baudry (1999). Le principe de cette écologie est que les activités humaines constituent le principal facteur d'évolution des paysages au niveau planétaire, ce qui est aussi le cas du modèle paysagénique. Mais à l'inverse de la paysagénie, elle considère l'espèce humaine plutôt comme un perturbateur d'un ordre naturel selon une éthique écocentrique, voire biocentrique, plutôt qu'anthropocentrique. CHOUQUER (2003, op. cit.) évoque les principales bases théoriques de l'écologie du paysage, à savoir: (1) des niveaux d'organisation hiérarchiques dans l'espace (écosystème < paysage < région < continent < planète; (2) la théorie assez mathématisée de la percolation se rapportant aux flux de gènes, d'individus, de matières; (3) la théorie biogéographique des îles c.à.d. du gradient de biodiversité en fonction de la distance au continent; et (4) la théorie des perturbations à l'origine de l'hétérogénéité des milieux.

Au niveau du langage, l'écologie du paysage utilise les termes de formes fragmentées, de matrices, de corridors, de taches, de mosaïques, de lisières, de patrons paysagers. Pour CHOUQUER (2003, op. cit.), elle entend ainsi *participer à l'aménagement et à la gestion des espaces, notamment avec la question des « corridors verts », celle des haies, ou encore en suggérant le respect des connexions [entre les écosystèmes] dans le tracé et le modelé des infrastructures de transport*. Remarquons cependant que cette terminologie évoque surtout des surfaces, des contours et des lignes et non des volumes spatiaux comme ceux de l'écosphère dans lesquels sont différenciés les écosystèmes.

Cette écologie du paysage est focalisée sur les facteurs biotiques et relève d'une approche que MOSS (2000) qualifie de "bioécologique". Elle vise la dynamique spatiale des populations animales et végétales et leurs problèmes à l'échelle communautaire. Or, MOSS précise que le contexte paysager est beaucoup plus large et convoque aussi la géographie, l'écologie, la science du sol, la géomorphologie, etc. Le pendant du courant "bioécologique" est alors le courant "géoécologique", enraciné quant à lui dans la géographie. Il vise l'interprétation systématique des composants liés à la terre tels que les reliefs, les sols, la végétation, l'impact de l'utilisation des terres par les humains pour produire des unités paysagères distinctes. La faiblesse du courant "géoécologique" est que la combinaison des composants dans une unité paysagère ne suffit pas à comprendre son fonctionnement. Ce dernier nécessite selon MOSS (op. cit.) d'intégrer dans cette unité les processus pédologiques, hydrologiques, géomorphologiques, etc. Le même auteur déclare surtout que les unités fondamentales du paysage sont des systèmes paysagers. Ils sont constitués d'entités spatiales juxtaposées (spatially-bounded entities), à composants verticaux tant biotiques qu'abiotiques. Enfin, MOSS spécifie le fait que ces unités s'étendent de la partie superficielle de la lithosphère (le sol) jusqu'à la basse atmosphère. Il fusionne ainsi les deux perspectives distinctes de l'écologie paysagère: bioécologique et géoécologique.

Le rôle que jouent les agriculteurs dans le design des paysages est examiné par BENOÎT et al (2012). Ces auteurs proposent dès lors leur modèle ALaDyn (Agricultural Landscape Dynamics). Il s'agit de se focaliser sur le concept de "champ cultivé" (système de culture) comme lieu d'application des pratiques agricoles, et ce en tant qu'interface entre l'écologie et d'autres disciplines. Pour les auteurs précités, la configuration spatiale du paysage inclut à la fois les caractéristiques topologiques de l'ensemble des champs (formes, tailles, localisations) et leurs relations fonctionnelles avec d'autres caractères paysagers (canaux d'irrigation, de drainage, haies et bordures parcellaires). Le design agricole est aussi influencé par les ressources naturelles et les conditions topographiques locales. La recherche en agronomie du paysage pourrait intégrer à la fois l'influence des caractéristiques du territoire sur les pratiques agricoles (itinéraire technique) et l'influence des agriculteurs dans les motifs et processus

examinés par l'écologie du paysage. Par ailleurs, RIZZO et al. (2013) se focalisent sur le concept d'unités de gestion de terre (land management units). L'agriculture est pressentie pour fournir de plus en plus de services: outre la production alimentaire et de biomasse énergétique, elle doit aussi fournir des SES (Services Éco-Systémiques) comme la préservation de l'environnement ou un cadre de vie agréable. Il devient alors crucial de comprendre les décisions des agriculteurs quant à l'organisation spatiale de leurs activités agricoles. RIZZO et al. (op. cit) font part de la manière dont la recherche agronomique récente identifie et modélise les entités spatiales majeures configurées par l'organisation des activités agricoles dans le paysage. Le but est de faciliter le dialogue entre géographes, agronomes et d'autres disciplines.

L'échelle du paysage est aussi utilisée pour assurer la transition agroécologique comme en font part BRETAGNOLLE & BAUDRY (2015) ainsi que GASCUEL-ODOUX & MAGDA (2015) avec des dispositifs tels que NATURA 2000 dédié à la conservation de la biodiversité. Les auteurs précités attirent l'attention que cette transition exigent une approche collective incluant d'autres acteurs que les agriculteurs tels que les ONG locales, régionales ou nationales ainsi que des chercheurs. Pour la recherche, la pluridisciplinarité est de rigueur étant donné que les systèmes sont complexes et multi-échelles. Ainsi des Zones Ateliers (ZA) sont mises en œuvre en tant qu'outils d'observations et d'expérimentations interdisciplinaires sur la biodiversité dite "ordinaire", "fonctionnelle" (services de pollinisation, de régulation et de contrôle biologique) et "patrimoniale" (oiseaux, plantes, insectes). L'agroécologie du paysage se présente comme une approche descendante (top-down) à l'opposé de la paysagénie qui envisage une démarche ascendante (bottom-up). Toutefois, les deux approches partagent le besoin d'une R&D (Recherche et Développement) participative associant les connaissances des acteurs locaux et celles des disciplines des chercheurs. Elles partagent également le concept de "communs" mais selon le dessein spécifique à chacune des deux approches.

Comme aucune discipline n'a pas encore pu dépasser les oppositions nature/culture et art/science dans l'approche du paysage, CHOMARAT-RUIZ (2014) réalise un essai de théorisation du "paysagisme" qui contiendrait également des savoirs et méthodes empruntés ou importés de l'agronomie, de la géographie, de la sociologie, etc. Elle développe aussi une réflexion épistémologique et éthique approfondie.

Une petit essai similaire sur des objets généraux, dépassant de loin le cadre du paysage, est accompli par l'architecte OXMAN (2016). Cette dernière s'attache à développer le "mêmeté de l'antidisciplinarité" pour les quatre domaines de l'art, de la science, du design et de l'ingénierie. Les frontières qui les séparent sont devenues floues au niveau des méthodes et peut être encore plus au niveau des motivations sous-tendues. La distinction entre nature et culture fait le pain et le beurre de tout anthropologue précise l'auteure. Si l'on décrit la nature comme tout soutien à la vie et que la vie est insoutenable sans culture, les deux systèmes de pensée fusionnent dans la même singularité. C'est dans cet ordre d'idées général que sont présentés les premiers éléments de paysagénie en considérant son objet comme intriqué et l'exercice de son art comme polymathique. Un art basé sur l'empirisme des savoirs et savoir-faire des parties prenantes et l'interdisciplinarité ou transdisciplinarité de nombreuses sciences et sciences appliquées.

### *1.3. Structure du livre*

Après cette introduction, l'ouvrage se concentre en cinq points clés complétés au final d'une synthèse conclusive, d'un glossaire et de la liste des références citées. Il est basé sur ma propre expérience menée au Burundi et sur une importante fouille bibliographique. Il se base donc sur des résultats expérimentaux obtenus dans des laboratoires ou des sites distribués sur plusieurs continents. Il prétend à faire progresser les savoirs et savoir-faire dans le design paysager des territoires et se focalise en particulier sur les milieux ruraux. Il se destine à un public spécialisé mais ouvert à l'interdisciplinarité. Il nécessite en particulier des connaissances en agronomie, pédologie, géomorphologie, phytobiologie et écologie, ainsi qu'une sensibilité à la socio-économie, à l'urbanisme et même à la génétique. Son public se situe donc d'abord

parmi les géographes et géologues, les ingénieurs agronomes et bio-ingénieurs, les sociologues, les biologistes, les écologues, et sans doute aussi les architectes et paysagistes. Les chercheurs et les étudiants dans ces diverses disciplines pourraient être plus spécifiquement intéressés. Les coopératives agricoles et forestières seraient également concernées, tant en pays développés qu'en pays en développement. Les exploitants forestiers, les cultivateurs et les éleveurs sont invités à en prendre connaissance, malgré ses aspects scientifiques parfois ardu.

Après cette introduction, sont présentés d'abord les éléments théoriques de paysagénie territoriale: la conception générale du modèle, ses objets et dimensions, les critères d'identification des "holons" et des "facettes" paysagéniques dont la dénomination est inspirée de distinctions antiques romaines. Ces facettes sont définies en tant que "communs" potentiels de "Ager", de "Saltus", de "Silva", de "Urbs", de "Hortus", de "Aqua", et de "Desertum". C'est avec ces éléments que le design paysager empirique produit les instanciations d'une espèce paysagénique. Une application partielle en est proposée à titre d'illustration dans la région naturelle des Landes de Gascogne au Sud-Ouest de la France.

Le troisième point explicite le processus d'aluminisation des sols: définition des régimes écoclimatiques de pédogenèse acide, réactions d'acidification des sols (respiration racinaire et microbienne, nitrification de l'ammonium, oxydation des sulfures de fer, ferrolyse), aluminisation subséquente par hydrolyse acide des minéraux primaires et des produits d'altération, développement du complexe adsorbant ou d'échange, échange ionique de l'aluminium avec les cations de base qui sont alors lessivés.

La "Phytobiologie de l'aluminisation" s'attache ensuite aux inductions physiologiques de l'aluminisation chez les espèces végétales au niveau de la membrane plasmique, de la paroi cellulaire, du cytosquelette cellulaire et de l'ADN du noyau. Il passe également en revue les mécanismes de résistance et de tolérance à l'aluminium tels que l'exclusion racinaire, l'augmentation du pH de la rhizosphère, l'accumulation au niveau des racines et des feuilles ou encore l'activation de voies métaboliques particulières et la régulation de l'expression de gènes au niveau de "loci de traits quantitatifs". Une revue de la sensibilité d'espèces naturelles et cultivées à l'aluminium est également présentée à partir de données expérimentales obtenues avec des échantillons de sols placés en vases de végétation sous abri ou avec des solutions de culture en laboratoire.

Le point cinq opère quant à lui un important changement d'échelle spatio-temporelle. Les notions de biodiversités  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont ainsi rappelées. Les concepts écologiques de "niche" et de "biotope" sont distingués et commentés à partir de la littérature. Les temporalités anté-préhistoriques sont brièvement revues comme la géochronologie des 5 grandes extensions massives ou les oscillations climatiques et leurs conséquences géomorphologiques qui ont conduit par exemple au développement de cuirasses latéritiques à l'ère Tertiaire. Les échelles spatio-temporelles amènent à rediscuter de l'évolution des espèces et d'en reconsidérer les hasards et nécessités avec de nouveaux schémas moteurs. Il s'agit aussi de donner à l'évolution des espèces une dimension spatiale au regard des changements et stress environnementaux induits notamment par les divers degrés d'aluminisation des sols. Une augmentation de la biodiversité avec l'âge des holons est rapportée en relation leur degré d'aluminisation. Les phénomènes de progression et régression des écosystèmes sont enfin évoqués.

Un dernier point aborde la paysagénie de l'aluminisation comme telle au niveau des territoires. Le phénomène global de l'anthropisation de l'écosphère est d'abord examiné puisque c'est avec lui que démarre le design paysager territorial. Depuis la préhistoire sont rappelées les grandes étapes et la vitesse relative de la colonisation de la niche humaine dans divers continents et de manière globale au travers de l'évolution des facettes paysagéniques de l'Ager, du Saltus, de la Silva et de Urbs, ce dernier comme centre de développement des villes à proximité de l'Ager non aluminisé. La deuxième partie se focalise sur les interactions de l'aluminisation avec les itinéraires techniques utilisés pour façonner les holons paysagéniques dans les territoires

ruraux. Des données agropédologiques sont ainsi réunies et analysées en Afrique, en Asie, en Amazonie et en Europe. Ces données confirment une relation décisive entre l'aluminisation et les différents types d'holons de Silva, d'Ager et de Saltus et ce malgré leur nombre curieusement limité et leur caractère souvent trop fragmentaire.

Une synthèse conclusive finale pointe l'organisation des savoirs et savoir-faire en silos disciplinaires et lui attribue les étonnantes incomplétudes relevées dans l'ouvrage. Malgré ces données encore limitée dans la recherche, il s'avère qu'une bonne cohésion se dégage dans l'ensemble, du niveau cellulaire des plantes jusqu'au niveau des holons paysagers concernés.

## 2. Éléments de paysagénie territoriale

### 2.1. Conception générale

La paysagénie territoriale est conçue comme un art polymathique. Elle est dédiée à l'identification et à la dynamique des territoires c'est-à-dire à leur organisation, à leur différenciation et à leur évolution. Son cadre est l'aménagement territorial selon un mode participatif et collaboratif entre les acteurs de terrain aux intérêts spécifiques d'une part et, d'autre part, les chercheurs-développeurs des disciplines et spécialités qu'elle convoque. Cet art se base sur les traits et caractères naturels (biophysiques) et culturels (socio-anthropologiques) des territoires par une métaphore avec la génétique, c'est-à-dire avec les traits génotypiques et caractères phénotypiques des organismes vivants. Les traits et caractères naturels sont acquis en dehors de toute intervention humaine dans la période anté-préhistorique. Ils sont de ce fait spécifiques à l'écologie fondamentale (voir point 5). La paysagénie territoriale considère des systèmes complexes évolutifs mais elle y inclut les traits et caractères culturels qui ont organisés les territoires. Le concept de génome paysagénique représente l'ensemble des traits d'une espèce paysagénique (EP) que partagent sa population à savoir l'ensemble d'instanciations paysagéniques (IP) existantes. Par analogie, le "phénomène" paysagénique se rapporte à l'ensemble des caractères d'une espèce (EP) et donc à l'espace de phase effectivement occupé par tous les phénotypes existants de ses IP. Une EP réunit donc la population de ses instanciations existantes de la même manière que l'ensemble des individus d'une espèce en biologie. Le génome paysagénique peut être assimilé à une sorte de "moule" à partir duquel se façonne par ontogenèses différenciées une polymorphie d'instanciations durant une période de temps limitée. Ce moule génomique n'est pas stable. Il évolue d'une part selon la temporalité générationnelle propre au renouvellement des populations humaines et d'autre part selon la spatialité environnementale.

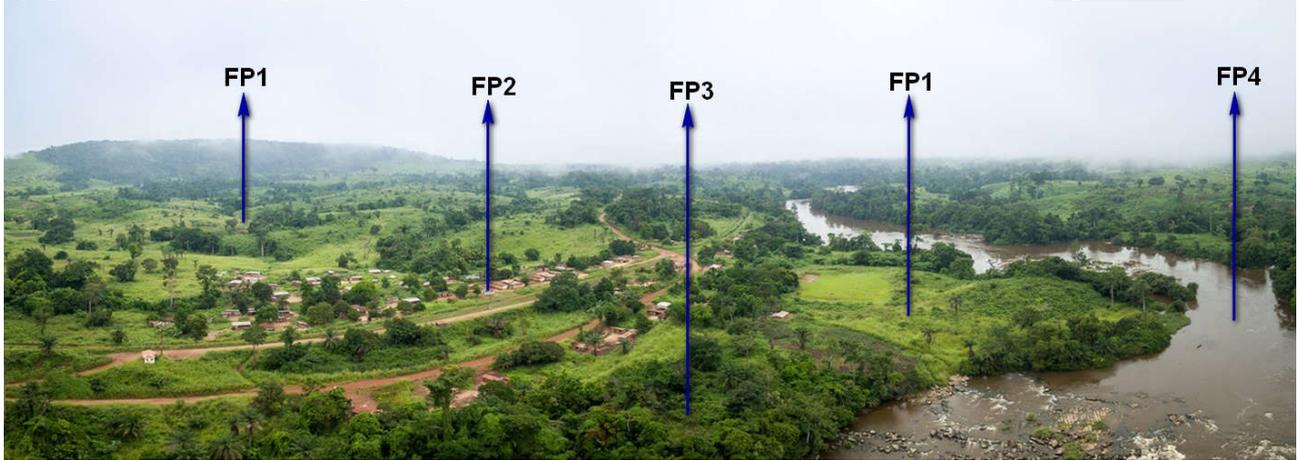
Le point de vue paysagénique est systémique car de nombreuses composantes naturelles et culturelles entrent en interaction. Il en résulte que plusieurs types de connaissances et compétences peuvent interagir selon des disciplines et spécialités en tant que "branches" de savoir et de savoir-faire. Le point de vue est aussi complexe car il s'attache à plusieurs niveaux d'organisation intégrés à l'instar des mondes mosaïques de AUDOUZE et al. (2015). Il s'agit donc d'une complexité (auto-) organisée. Mais, si une mosaïque est en deux dimensions, le modèle paysagénique l'est en trois (3D). Le système paysagénique est ainsi compartimenté tant dans sa partie épigée que dans sa partie hypogée à la manière même de l'écosphère terrestre qui contient l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et la biosphère.

L'auto-organisation d'une IP s'appuie sur un système multi-agents (SMA) caractérisé par une prise de conscience d'intérêts et d'enjeux collectifs qui façonnent ainsi les "communs" potentiels à l'échelle locale. Ces "communs" sont spatialement distribués en sous-phénotypes ou facettes de l'IP. Les agents, que l'on peut aussi appeler acteurs, sont constitués des usagers autochtones, directs et indirects. Ces acteurs sont généralement en relation avec des partenaires allochtones indirects et distants. Ces derniers peuvent les influencer ou peser dans les décisions qu'ils doivent prendre.

Le concept de "holon" est emprunté à KOESTLER (1969) pour désigner selon LE MOIGNE (2006) "*des agrégats insécables*", des "*processeurs irréductibles et polyfonctionnels tels que si on les fait intervenir pour assurer une fonction, on entraîne ipso facto l'activation potentielle de toutes leurs autres fonctions*". Concrètement, le "holon paysagénique" (HP) se constitue d'un type de biotope anthropisé ou d'anthrobiote, en tant qu'unité volumique élémentaire, fondamentale et fonctionnelle de paysagénie territoriale. C'est donc un objet verticalement multi-compartimenté tel qu'illustré à la [figure 2.4](#). Dans une démarche holistique pluridisciplinaire, les différentes parties ont chacune une conception spécifique de l'holon. Pour adopter une interdisciplinarité, l'idéal serait d'obtenir un holon unifié qui devrait être discuté et approuvé. Ce pourrait être par exemple le plus petit commun volume d'holon entre les disciplines convoquées.

Le terme de "facette paysagénique" (FP) est quant à lui emprunté à BLANC-PAMARD (1986). Il désigne cependant ici une entité plus large et le plus souvent fragmentée. La FP est un assemblage plus ou moins vaste d'un ou plusieurs HP distribués de manière non aléatoire dans l'espace. La FP se base en fait sur les caractères d'un commun potentiel. Les acteurs sont susceptibles de développer ce commun et de le faire muter pour améliorer leur bien-être.

L'IP territoriale se compose de plusieurs FP agencés dans l'espace selon leurs caractères épigés. L'illustration photographique d'une IP et de ses FP est reproduite à la [figure 2.1](#).



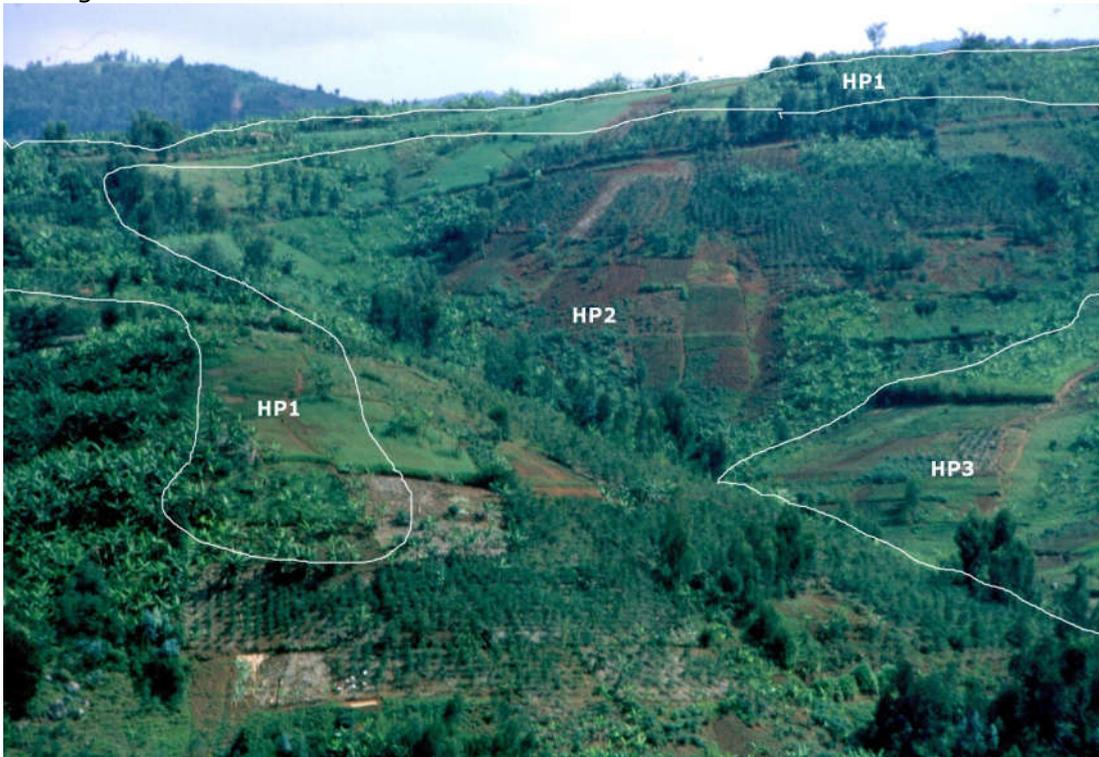
*Figure 2.1. Illustration photographique d'une instanciation paysagère et de quatre facettes paysagéniques ou communs potentiels (FP1 à FP4) qui la façonnent. Village de Makabana au Congo (Photo: Fotolia).*

La FP est la perception visuelle (épigée) d'un commun exprimée par l'interaction sous-jacente et invisible des traits propres aux holons paysagéniques (HP) qui le composent et en assurent les fonctions. Les interactions des traits paysagéniques s'étendent latéralement non seulement entre les holons d'une même FP mais aussi d'une même IP, voire d'une IP voisine. Le concept de holon est cependant basé sur l'intensité plus forte des interactions des traits qui lui sont propres par rapport à l'intensité plus faible des interactions entre traits de HP adjacents d'une même FP et à fortiori entre les traits des HP de FP adjacentes voire d'une autre IP. La [figure 2.2](#) illustre de manière schématique une FP à trois HP.

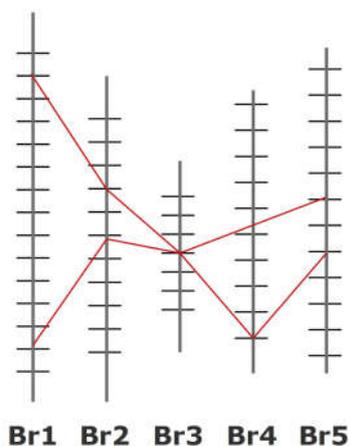
Si un caractère phénotypique d'une FP peut être généralement ressenti ou observé par un acteur de cette FP ou même de l'IP entière qui l'englobe, l'identification d'un trait nécessite quant à lui une observation plus fine ou un examen plus approfondi. L'identification des HP relève du domaine des chercheurs-développeurs qui doivent en établir les traits diagnostiques. Un trait de paysagénie territoriale est en effet une caractéristique ou une propriété spécifique afférente à tout ou partie d'une FP dans une IP particulière. L'identification des traits en rapport avec les caractères paysagéniques peut ainsi nécessiter des études sur des échantillons ou des mesures de terrain à l'aide de méthodes, d'outils et d'appareils adaptés. Cette identification exige aussi d'établir le processus fonctionnel d'expression des traits considérés dans le modelage du ou des caractères envisagés. Les traits sont dès lors classés en plusieurs "branches" et chacune est l'équivalent d'une discipline ou d'une spécialité propre aux distinctions classiques des savoirs et savoir-faire des chercheurs-développeurs. La [figure 2.3](#) schématise l'interaction de plusieurs traits en un réseau dans un HP à cinq branches d'une facette paysagénique.

Le dogme d'un gène pour un caractère ayant volé en éclats comme le considère notamment SUING (2016) dans son analyse critique du néodarwinisme, on peut parallèlement postuler qu'un trait paysagénique participe à plusieurs réseaux d'expression phénotypique de caractères paysagéniques territoriaux. Concrètement cela signifie par exemple que le trait pédologique diagnostique d'une aluminisation de plus de 50% du sol sur plus de 50 cm d'épaisseur (voir point 3) peut être partagé par plusieurs HP d'une même FP ou plusieurs IP d'une même EP. Mais cela peut signifier aussi que plusieurs traits paysagéniques appartenant à des branches

différentes peuvent contrôler un même caractère dans un HP. Ainsi, outre le trait d'un taux d'aluminisation supérieur à 50% peuvent intervenir l'itinéraire (agro-)technique pratiqué, les conditions météo-climatiques et les pressions parasitaires saisonnières dans le niveau de production agricole atteint dans un même HP.



*Figure 2.2. Schéma d'un facette paysagénique à trois holons de position topographique: HP1 pour le sommet, HP2 pour le versant, HP3 pour le fond de vallée (Photo: Luc Opdecamp)*



*Figure 2.3. Schéma d'un réseau actif de traits à cinq branches (Br1 à Br5) dans l'un des holons d'une facette paysagénique*

Quant aux branches de la paysagénie territoriale, elles couvrent pratiquement tous les domaines et sous-domaines des savoirs et savoir-faire humains ayant "trait" direct ou indirect aux territoires et parmi lesquels l'encadré 1 en rassemble une liste non exhaustive. La paysagénie territoriale est ouverte à toute contribution disciplinaire dans le cadre du développement de son modèle de système complexe auto-organisé et évolutif. Il va de soi que toutes ces disciplines ne doivent pas être convoquées dans tous les analyses et projets. Mais, il faut choisir les plus appropriées en fonction des cas et veiller à leur intention de travailler selon une approche interdisciplinaire.

### Encadré 1. Liste non exhaustive de branches d'identification des traits de paysagénie territoriale

anthropologie, agronomie, archéologie, architecture, biologie, biogéographie, climatologie, écologie, économie, épidémiologie, esthétique, ethnographie, géographie humaine et physique, génie civil et rural, géologie et géomorphologie, histoire, hydrographie et hydrologie, horticulture, médecine, paléontologie, palynologie, paysagisme, pédologie, philosophie, physiologie végétale et animale, politique, sociologie, urbanisme, etc.

Toujours est-il cependant, que toutes les disciplines convoquées pour une démarche interdisciplinaire de paysagénie sont priées d'adopter la conception générale développée ici, à savoir une structure tridimensionnelle partant de l'espèce paysagénique (EP). Cette dernière regroupe alors toutes ses instanciations (IP) contiguës en son sein. Et chaque IP contient les facettes paysagéniques (FP). Enfin, c'est au niveaux des holons paysagéniques (HP) que sont identifiés les traits propres de chaque discipline.

## 2.2. Objets et dimensions

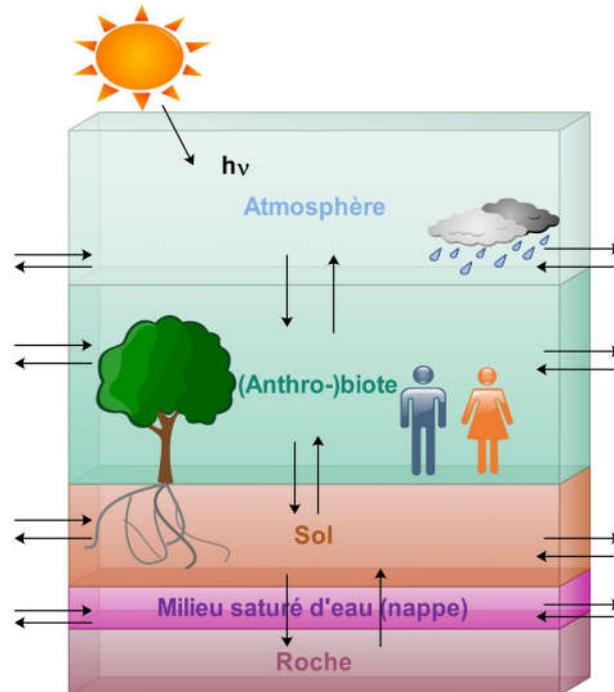
Les objets de la paysagénie ont des dimensions spatiales définies selon leur tout et leurs parties à chaque niveau d'échelle ou d'organisation. Ces dimensions sont délimitées par des frontières qui ne sont ni hermétiques ni stables. L'organisation et la structure interne des objets sont également variables car ils peuvent évoluer dans le temps. Ils connaissent donc aussi une histoire au cours de laquelle les "us et coutumes" des acteurs ont été modifiés ou ont carrément mutés. Ils peuvent ainsi avoir connu des ruptures pour s'adapter à des changements politiques ou d'environnement. Aux trois dimensions de l'espace s'ajoute donc celle du temps.

Les objets élémentaires à un temps "t" sont des HP (holons paysagéniques) génotypiques et FP (facettes paysagéniques) phénotypiques inscrits dans les trois dimensions (x,y,z) de l'espace d'une instanciation paysagénique (IP) appartenant elle-même à une espèce paysagénique (EP). Si les dimensions latérales se limitent par des coordonnées en latitude et en longitude (x,y), la dimension verticale (z) s'établit le long d'un axe à cotes positives pour la partie épigée et à cotes négatives pour la partie hypogée. Cette dernière s'étend pour les holons (HP) sur l'épaisseur du sol jusqu'à la roche mère géologique ou pédologique et peut inclure s'il échet une nappe d'eau libre comme illustré à la [figure 2.4](#). Elle peut aussi inclure une nappe captive dans le cas où une couche imperméable la surplombe. Si une nappe d'eau libre débouche ou affleure en surface, on a affaire à un cours d'eau, un marais, un étang, une lagune littorale, etc. Les objets de paysagénie sont donc étagés à l'image de l'atmosphère, biosphère, hydrosphère et lithosphère qui compartimentent l'écosphère. Les traits des objets de paysagénie sont "codés" dans la dimension verticale, ce qui est illustré dans le schéma conceptuel de la [figure 2.4](#). On comprend dès lors que les branches disciplinaires puissent être focalisées directement sur tout ou partie d'un ou plusieurs compartiments de l'écosphère et que les branches disciplinaires concernent une distribution similaire de traits en partie ou en totalité d'un ou plusieurs compartiments.

## 2.3. L'identification de communs ou facettes paysagéniques

Le concept de "commun" n'est pas nouveau comme l'explique LE ROY (2016). Ainsi le droit romain ne pouvait pas s'appliquer à la terre et à ses ressources dans la mesure où elles étaient indispensables à la reproduction des groupes. C'est seulement au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle avec la première révolution agricole et le mouvement des "enclosures" (*Enclosure Acts*) en Grande-Bretagne qu'une appropriation et une exploitation privative du sol entrent dans les mœurs par force du droit. Cela se traduit dans le paysage par un recul de l'*openfield* au profit du bocage. Pour LE ROY (op. cit.), la société occidentale subit alors la révolution de la marchandisation et l'addiction au "propriétarisme". Les droits locaux coutumiers sont transformés en droits de propriété privée ou étatique. Le régime colonial redécouvre des communs en Afrique subsaharienne mais n'en a cure et étend le monopole foncier de l'État sur l'ensemble des territoires non encore appropriés privativement. A l'instar de l'étatisation des communs de pâturages à moutons des Landes de Gascogne par la loi du 19 juin 1857 de Napoléon III, tel

qu'évoqué par PAPY (1977). LE ROY (op. cit.) met sur un même pied l'accaparement des terres communes par les *landlords* et l'appropriation des terres indiennes par les pionniers américains. Les mouvements récents d'accaparement des terres en Afrique, en Amérique latine ou en Asie procèdent également d'une logique comparable. Le référent pré-colonial ainsi que la tenure communautaire des terres avant la première révolution agricole sont considérés par LE ROY (op. cit.) comme des "primo-communs". Il s'agit d'ensembles constitués d'une communauté, de ressources et de protocoles de gouvernance. Mais voici que des "néo-communs" réapparaissent tels que les régies de quartier, les *fablabs*, l'habitat participatif, les coopératives, etc. Ces néo-communs tentent un ajustement mutuel entre les communs et la propriété privée. La société complexe contemporaine ne pourrait se passer ni des uns ni de l'autre.



*Figure 2.4. Compartimentation verticale des holons de paysagénie territoriale*

BOLLIER (2014) donne une définition des communs particulièrement en accord avec la conception des objets de la paysagénie territoriale telle qu'illustrée à la [figure 2.4](#): "Ce sont des ressources plus une communauté définie et des protocoles, valeurs et normes inventés pas cette communauté pour gérer certaines ressources [...] comme des communs".

Elinor Ostrom, prix Nobel d'économie 2009, donne également une définition des communs. La voici, telle que rapportée dans la note de lecture de BOTTOLIER-DEPOIS (2012): "Le terme de ressource commune désigne un système de ressource suffisamment important pour qu'il soit coûteux (mais pas impossible) d'exclure ses bénéficiaires potentiels de l'accès aux bénéfices liés à son utilisation".

Ostrom induit à partir de son expérience des réalités de terrain un ensemble de huit principes ou modalités d'auto-organisation des communs qui correspondent en quelque sorte aux protocoles, valeurs et normes évoquées dans la définition de BOLLIER (op. cit.). Ces principes sont énumérés dans l'[encadré 2](#).

L'identification de communs paysagéniques n'entraîne pas de facto leur institution. La prise de connaissance du système des huit modalités d'Ostrom pour l'auto-organisation efficace et durable des communs ne suffit pas non plus comme tel à son implémentation effective par les acteurs. Mais comme le rapporte BOTTOLIER-DEPOIS (op. cit.), Ostrom considère l'implémentation du système comme un phénomène "séquentiel et incrémentiel". L'auto-organisation d'un commun est ainsi un processus. Son identification paysagénique pourrait alors participer au déclenchement d'un tel processus par la collecte et mise à disposition des acteurs des informations nécessaires et suffisantes à sa configuration. L'existence de traits de relative félicité ou d'adversité sont en effet partagés au niveau des holons constitutifs des

communs potentiels identifiés.

*Encadré 2. Les huit principes d'Elinor Ostrom pour concevoir l'auto-organisation des "Communs", d'après BOLLIER (2014) et BOTTOLIER-DEPOIS (2012)*

1. Définition de limites claires pour le bien commun et pour les acteurs y ayant accès
2. Adoption de règles d'usage du bien commun adaptées aux conditions et besoins locaux
3. Mise en place de dispositifs de choix collectifs incluant la plupart des acteurs concernés
4. Implémentation par les acteurs eux-mêmes d'un système de surveillance des comportements
5. Adoption de sanctions graduelles pour le non respect des règles
6. Reconnaissance de l'auto-organisation du bien commun par les autorités extérieures
7. Conception de mécanismes rapides et peu coûteux pour la résolution des conflits
8. Organisation polycentrique et multi-scalaire des responsabilités de gouvernance

## 2.4. Les niveaux d'organisation paysagéniques

Le terme "anthrobiotes" signalé dans la [figure 2.4](#) désigne conceptuellement des communs phénomiques (FP, facettes paysagéniques). Ils se définissent à la fois par un grand type d'affectation des sols et par une catégorie spécifique d'acteurs autochtones directs ou indirects qui en jouissent et participent à leur modelage. Des exemples de processus de modelage des FP sont les processus d'évolution des sols et de la biodiversité, les processus d'érosion et de sédimentation gravitaires, hydriques ou éoliens, les variations et pulsations climatiques, l'évolution démographique, culturelle et politique, les changements de conjonctures ou de structures économiques, le développement de filières de produits et services, etc.

Les anthrobiotes, communs ou FP sont des phénotypes aux caractères relativement homogènes. Comme déjà évoqués, ces caractères sont exprimés par l'interaction de traits variables qui œuvrent en réseaux. Selon le modèle paysagénique, les territoires se différencient par les actions, pratiques et décisions de six catégories d'acteurs intelligents qui font émerger six catégories de communs phénomiques, chacun en plusieurs formations dispersées ou en formation d'un seul tenant dans chaque instanciation paysagénique (IP). Chaque formation d'une catégorie de commun phénomique est modelée par un ou plusieurs types de "holons génomiques" selon des processus déjà évoqués. Les six catégories de communs phénomiques de la paysagénie sont inspirés des catégories antiques romaines telles que revisités par VIDAL (2011) et complétée par la catégorie des eaux de surface continentales: l'Ager, le Saltus, la Silva, l'Urbs, l'Hortus et l'Aqua. Une septième catégorie est ajoutée qui peut être considérée comme un pseudo-anthrobiote, à savoir le Desertum où la vie est fortement contrariée par une indisponibilité en eau liquide.

Les catégories phénomiques de base de l'espace agricole sont reprises par JOUVE (2016) à savoir "Ager", "Saltus", "Silva" et "Hortus". Leur distribution spatiale préside également chez cet auteur à l'identification des paysages ruraux tandis que "Urbs" est évoqué par les relations ville-campagnes. POUX et al. (2009a, 2009b) explicitent aussi la fameuse trilogie agricole de l'Ager, du Saltus et de la Silva.

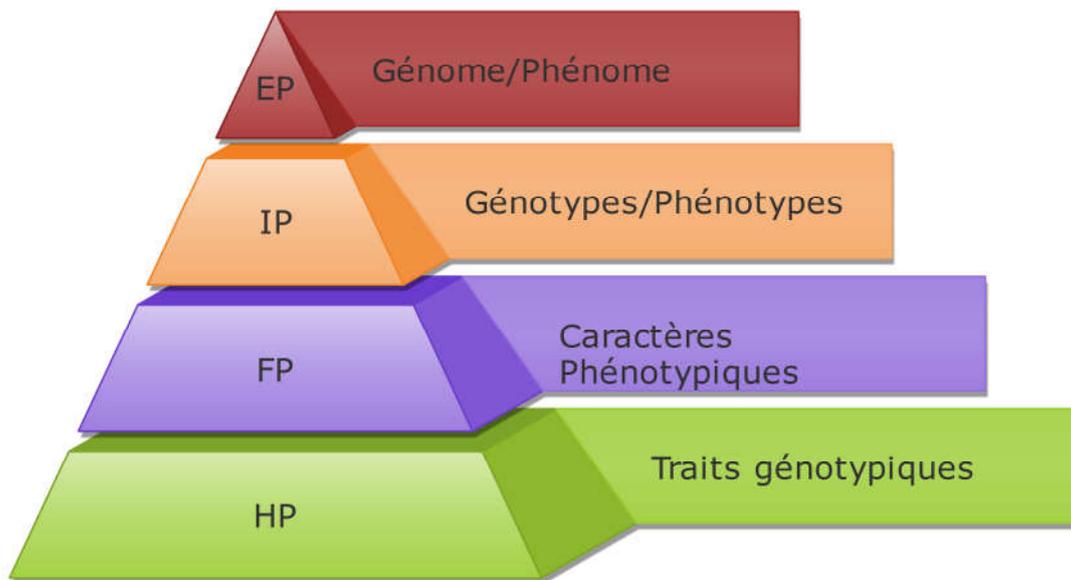
L'identification d'une espèce paysagénique (EP) correspond à une population d'IP semblables c'est-à-dire à un groupe d'IP aux caractères et traits similaires. Une IP est donc l'expression locale d'une EP mais qui est fondée par des liens sociaux constituant la charpente sociale de cette IP. L'EP quant à elle équivaut à l'unité paysagère (UP) utilisée comme concept de base dans les atlas de paysage en France. L'identification d'un EP en paysagénie ou d'une UP d'un atlas de paysages nécessite pour le moins l'examen stéréoscopique de photographies aériennes ou l'examen croisé de cartes topographiques et d'occupation des sols. L'UP ou l'EP doit aussi être reconnue sur le terrain aux travers de ses IP par un promeneur en observation exploratoire des lieux. De plus, les acteurs locaux d'une IP doivent pouvoir être identifiés individuellement et regroupés facilement.

Dans le cadre de l'élaboration des atlas de paysages à l'échelle départementale ou régionale en France, RAYMOND et al. (2015) rappellent la définition initiale de 1994 pour les unités paysagères (UP) à savoir "*des paysages portés par des entités spatiales dont l'ensemble des caractères de relief, d'hydrographie, d'occupation du sol, de formes d'habitat et de végétation présentent une homogénéité d'aspect. Elles se distinguent des unités voisines par une différence de présence, d'organisation ou de forme de ces caractères.*" C'est une définition qui

a le mérite d'évoquer des caractères réunis dans des sortes de réseaux, ce qui se rapproche du concept d'EP proposé en paysagénie territoriale en tant qu'ensemble des IP de même "génome". Pour les atlas des paysages de Wallonie en Belgique, DROEVEN et al. (2004) donnent une définition plus restreinte à l'UP: "*portion de territoire embrassée par la vue humaine au sol et délimitée par des horizons visuels (hauteurs ou lisières)*." Par contre ces mêmes auteurs utilisent le concept de "territoire paysager" comme une agrégation de telles unités aux caractéristiques similaires. On peut en déduire une certaine équivalence entre le "territoire paysager" wallon, l'unité paysagère française et l'EP dans la conception de la paysagénie territoriale. L'UP de Wallonie serait alors équivalente à l'IP qui n'aurait pas d'équivalent en France. L'IP serait ainsi un motif de base qui se répéterait dans un EP. DAVODEAU (2009) rapporte qu'en dessous d'une superficie de 100 km<sup>2</sup> on se situe à des échelles trop élevées par rapport au cadre des atlas départementaux français à savoir celui des "plans de paysage". Par ailleurs, cet auteur souligne l'ambivalence de la notion de paysage qui est "à la fois matérielle et immatérielle", raisonnée et ressentie, selon que cette notion est utilisée respectivement par des géographes ou écologues d'une part et par des paysagistes d'autre part. Toutefois, DAVODEAU (op. cit.) considère que les deux types d'approche sont complémentaires et que les paysages sont "*des objets matériels certes, mais toujours perçus et vécus par des populations*". Intégrer le point de vue des habitants est cependant difficile sur des territoires aussi vastes que les départements. Le modèle paysagénique adopte pourtant ce critère intégré. Il est fondamental et relié avec le concept de commun potentiel en tant que "charpente sociale" d'une IP. En ce sens, la paysagénie s'accroche assez bien, via son concept d'instanciation (IP), à cette autre notion utilisée du "cadre de vie". Celui-ci est l'expression à la fois du patrimoine naturel et du patrimoine culturel qui fondent tous deux l'identité des populations, en accord avec l'article 5 de la Convention européenne du paysage (CoE, 2000). Le cadre de vie est aussi celui des liens sociaux et du paysage au quotidien. Il signifie en somme les "environs" ou "alentours" au niveau individuel.

Ce qui est propre au modèle paysagénique c'est le rôle génotypique des holons paysagéniques (HP) dans le modelage phénotypique des FP. Les HP agissent ainsi en tant que processeurs de traits interactifs. Tous les HP analogues d'une même FP constituent un sous-génotype d'une IP. Les diverses FP sont donc aussi des sous-génotypes d'une IP. Une population d'IP qui partagent le même "génome paysagénique" produit enfin une EP. C'est cette dernière qui est assimilée à l'*unité paysagère* des atlas de France et au *territoire paysager* des atlas belges en Wallonie. Le modèle paysagénique exige cependant une collaboration entre les acteurs des communs potentiels des FP et les chercheurs-développeurs des branches disciplinaires engagées. Une cohésion forte de ces derniers s'impose également au niveau de l'identification des HP. Un schéma synthétique général de la structure organisationnelle de la paysagénie territoriale est proposé à la [figure 2.5](#). Au-delà de l'EP s'identifie la région naturelle. Cette dernière se compose donc d'au moins une EP. La région naturelle se situe toutefois à un niveau organisationnel où les liens sociaux des communs deviennent beaucoup plus distants et donc aussi beaucoup plus lâches.

Quant à la structure, il est toujours possible d'objecter qu'elle est plus adaptée à une paysagénie rationnelle plutôt qu'à une paysagénie sensible. Toutefois, BERQUE (op.cit.) fait référence à l'existence de règles dans l'enchaînement des motifs spatio-temporels des paysages ainsi qu'à un code ou une matrice qui présiderait un tel processus. Par rapport à l'art des jardins au Japon, il évoque les grands traits de paysages "célèbres" qu'il considère comme des traits de *représence* en matière d'esthétique et d'éthique. Il est bien tentant d'effectuer alors un parallélisme entre d'une part les caractères phénotypiques et traits génomiques de l'espèce paysagénique (EP) et d'autre part les schèmes des jardins japonais *qui jouent trajectivement comme empreintes et comme matrices*. De même un parallélisme s'impose entre le processus d'évolution du modèle paysagénique et celui de "motivation" paysagère de BERQUE. Et le "milieu" que constitue la société (locale) chez BERQUE, considérée en tant que relation mésologique ou médiane, correspond bien aussi à l'instanciation paysagénique (IP) dans une EP.



*Figure 2.5: Structure organisationnelle hiérarchique d'une espèce paysagénique territoriale (EP)*

### 2.4.1. Communs et holons de Ager

Ager est la FP constituée par le sous-phénomène du domaine cultivé de manière quasi-permanente, planté ou semé et, à l'origine, labouré en tant que terre dite arable. Il regroupe tous les systèmes de cultures pratiqués dans l'EP considérée et ses diverses IP. De nombreux champs et parcelles d'espèces annuelles ou bisannuelles peuvent être cultivées dans l'Ager suivant les zones climatiques: le maïs vivrier ou fourrager, le riz pluvial et irrigué, le froment, l'orge, le sorgho, le millet, la canne à sucre et la betterave tant sucrière que fourragère, la pomme de terre, la patate douce, le manioc, le soja, le pois et le haricot, l'ananas, etc. On pourrait encore évoquer de nombreuses plantes à épices ou à parfums. Les prairies temporaires font aussi partie de l'Ager. Elles sont semées avec des espèces herbacées, fauchées ou pâturées pendant maximum 5 années consécutives. Au-delà de 5 ans, elles deviennent permanentes et sont assimilées à du Saltus (sans fauchage).

Les prairies temporaires en rotation avec des cultures annuelles constituent un Ager prairial. Sont aussi considérés comme de l'Ager, les vignes et vergers intensifs non pâturés, ainsi que plus généralement les plantations d'espèces agricoles pérennes tels que les oliviers, palmiers, bananiers, cacaoyers, caféiers, théiers, etc., à l'exception des arbres destinés à la production intensive de bois ou de grumes qui font partie de la Silva. Dans l'Ager, la fumure minérale et ou organique des parcelles est pratiquée plus ou moins régulièrement selon les disponibilités. A la [figure 2.6](#) des photos illustrent quelques exemples de FP d'Ager annuel ou pérenne de plusieurs régions du monde et donc de plusieurs EP.

Le collectif d'acteurs en Ager regroupe de manière directe les agriculteurs sédentaires ainsi que, le cas échéant, les propriétaires fonciers des parcelles. Ce collectif s'étend à d'autres autochtones résidant dans l'IP d'appartenance et ce du fait qu'ils partagent avec les acteurs précités les enjeux environnementaux de l'Ager tels que la disponibilité en eau, les voies de transport local, la qualité de l'air, la faune et la flore semi-naturelle, les us et coutumes locales, l'esthétique paysagère, etc. Enfin, de manière beaucoup plus indirecte les partenaires allochtones et distants dans les filières de transformation et de distribution des produits de l'Ager sont des partenaires de ce commun potentiel du fait des qualités traçables des produits et de leurs débouchés.

Les caractères phénotypiques d'un Ager dans une IP résultent de plusieurs traits génotypiques en interaction, d'une manière comparable à celle dont les gènes d'un organisme vivant participent à l'expression de ses caractères phénotypiques. L'identification de traits qui participent à l'expression du phénotype d'un Ager résulte d'un diagnostic réalisé par plusieurs chercheurs-développeurs selon les branches mobilisées. Ce diagnostic est génotypique dans le

sens métaphorique et se base sur l'identification d'un ou plusieurs holons paysagéniques (HP) caractérisés chacun par un réseau spécifique de traits en interaction pour la FP de l'Ager.



*Figure 2.6. Illustrations de 4 FP d'Ager (Photos: Fotolia): Ager bocager en Toscane (A), avant-plan), Ager rizicole de Bali (B), Ager d'oliviers en Andalousie (C) et Ager de théiers au Kerala (D)*

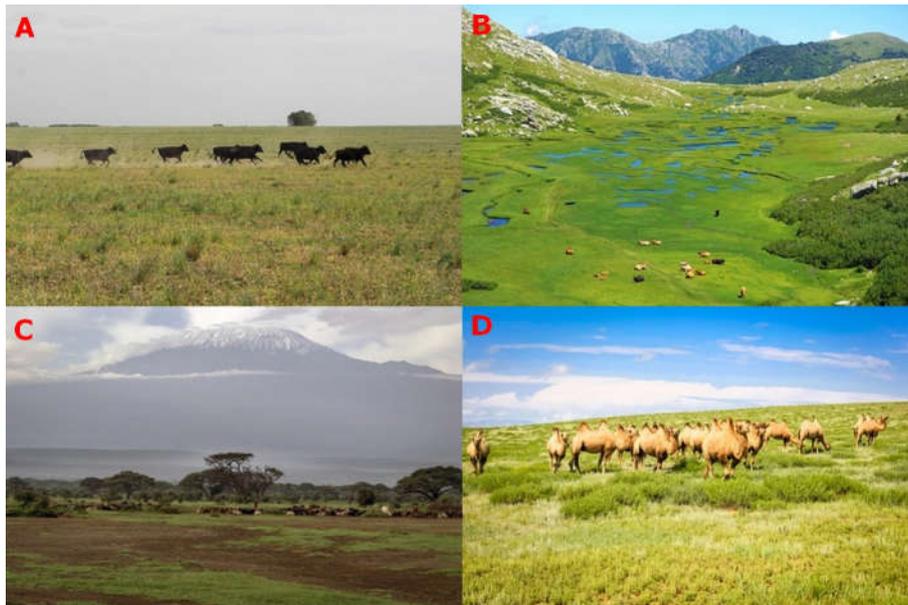
Chaque HP d'une FP d'Ager peut être symbolisé par une formulation générale de type "iAg,abcde...". iAg désigne une FP ou un commun d'Ager, le préfixe "i" rappelant qu'il s'agit d'une entité intelligente puisque elle regroupe aussi les acteurs qui la façonnent. Les lettres abcde... sont une juxtaposition de traits diagnostiques identifiés par les diverses branches disciplinaires convoquées. Par exemple pour un HP donné chacune des lettres de l'itération "abcde..." peut être le symbole d'un trait caractérisant le système de culture et son itinéraire technique, celui du type de filière de commercialisation de la ou des productions, celui de la grande classe texturale du sol et celui de son degré d'hydromorphie, celui la classe d'inclinaison topographique, celui de l'appréciation de sa valeur esthétique, écologique, etc. selon une légende détaillée. Une telle formulation favoriserait alors la représentation cartographique des HP. Le problème avec une carte classique est cependant qu'elle ne permet pas facilement de mise à jour. Or, en paysagénie les dynamiques peuvent être rapides, surtout au niveau des holons. L'itinéraire technique d'un système de culture peut se modifier en quelques saisons par exemple. Elle peut aussi être rapide au niveau des FP, par exemple suite à une déforestation pour installer des pâturages de Saltus. Dès lors, l'utilisation d'un SIG (Système d'information géographique) pour représenter les différents composants d'auto-organisation des territoires deviendrait quasi indispensable.

#### 2.4.2. Communs et holons de Saltus

Saltus est un domaine semi-naturel. C'est un commun potentiel qui est déjà implémenté. Il porte la marque d'une gestion humaine dans une version extensive par le pâturage de troupeaux d'animaux domestiques et souvent par la pratique de feux périodiques pour limiter ou détruire l'embroussaillage. Saltus est un type d'anthrobiote développé dans tous les espaces ouverts non cultivés la plupart du temps. Il est exploité généralement pour l'élevage pastoral et la cueillette. La reproduction de la fertilité des sols y est naturelle, assurée par le bouclage des cycles de nutriments sans apports d'engrais exogènes et pouvant être accéléré par la pratique de l'écobuage pour une brève mise en culture temporaire. Différents types de troupeaux et de formations herbacées plus ou moins arborées peuvent faire partie intégrante de ce type de facette, y compris des prés-vergers pâturés. Les acteurs du Saltus sont essentiellement des éleveurs et des pasteurs, nomades ou sédentaires. VANDERPOOTEN (2012) rappelle que les physiocrates du XVIII<sup>e</sup> siècle opposaient le système de la "petite culture" à celui de la "grande culture". Le premier se caractérise par de vastes espaces de

"Saltus", non cultivés (pâturages permanents), et une petite partie seulement de sols cultivés soumise à une rotation culturale. Tandis que dans le système de "grande culture" un vaste "Ager" domine le paysage, caractérisé par une alternance régulière de cultures et de prairies temporaires. Le territoire de l'Ager y est partagé régulièrement par l'agriculture et l'élevage sur les mêmes parcelles. La [figure 2.7](#) illustre quelques grands communs classiques de Saltus.

La symbolique pour représenter les divers holons du Saltus d'une IP, de préférence dans un SIG, est similaire à celle proposée pour Ager: "iSa,abcde...". Les lettres de l'itération abcde peuvent indiquer si l'élevage est sédentaire ou itinérant, les espèces des troupeaux qui pâturent, la pratique ou non de feux, la composition phytosociologique de la formation herbeuse, la profondeur relative du sol, les espèces réservées à la cueillette (gomme arabique par exemple), l'intérêt touristique éventuel, etc.



*Figure 2.7. Illustrations de 4 FP de Saltus (Photos: Fotolia): Saltus de la Pampa d'Argentine (A), Saltus de pozzine en Corse - holon typique tourbeux cerné par un holon rocailleux - (B), Saltus de savane au Kenya sous arrière-plan du Kilimandjaro (C) et Saltus steppique du Gobi pâturé par des chameaux(D)*

### 2.4.3. Communs et holons de Silva

Silva est l'espace boisé fermé, englobant des formations végétales perçues comme primaires et qualifiées de "sauvages" par VIDAL (op. cit.). Cependant, c'est un commun implémenté par de nombreuses "tribus" ou peuplades indigènes depuis plusieurs siècles. Les forêts tropicales soi-disant vierges sont en fait remaniées depuis longtemps par l'activité des essarteurs et la pratique itinérante de l'abattis-brûlis. Il s'agit là aussi de Silva en tant que agroforêts à rotation très lente, c'est à dire à jachère forestière de longue durée où l'homme s'est donc inséré (ROSSI, 2000). De plus, il faut élargir Silva aux anthrobiotes sylvicoles plantés ou semés pour la production de bois d'œuvre ou d'énergie et dont l'utilisation est orientée parallèlement vers des activités de chasse et de pêche. Les bois et forêts domaniales sont des néo-communs gérés par l'État. Les agents "Silva" sont des propriétaires, des exploitants et des ouvriers forestiers parmi lesquels peuvent se compter des essarteurs pratiquant une agriculture itinérante sur brûlis, des chasseurs et des cueilleurs. La [figure 2.8](#) présente quelques FP classiques de Silva dans le monde.

Les holons de Silva "iSi, abcde..." sont basés notamment sur les traits des peuplements et des stations forestières propres à l'approche agrosystémique des ingénieurs forestiers, sur les traits anthropologique des acteurs, sur les traits de la cueillette, de la chasse et de la pêche, sur le degré d'anthropisation agroforestière tels que le système de culture itinérante, l'implantation localisée d'espèces pérennes (cacaoyer, hévéa, caféier, palmier, etc.), l'intérêt

naturaliste de la faune et de la flore, etc.



*Figure 2.8. Illustrations de 4 FP de Silva (Photos: Fotolia): Taïga de Laponie en Finlande (A), Silva en zone volcanique de Bali (B), Silva d'Amazonie au Brésil (C) et massif résineux des Vosges (D)*

#### 2.4.4. Communs et holons de Urbs

"Urbs" est une FP marquée par une emprise bâtie supérieure à 50% dans une aire minimum fixée en fonction des conditions socio-économiques locales, par exemples 50 ares dans un hameau villageois ou 1 km<sup>2</sup> dans une petite ville. Cette FP est réservée à une concentration d'activités humaines de résidence, d'artisanat et d'industrie, de commerce, de transport et de services. On peut fixer conventionnellement aussi une densité d'acteurs de 1.000/km<sup>2</sup> pour distinguer une FP de Urbs urbaine d'une FP de Urbs villageoise ou rurale. Une FP de Urbs urbaine est souvent une plaque tournante de développement économique.

COLLINS et al. (2000) envisagent ce type de commun en tant qu'écosystème hétérotrophe, à métabolisme "industriel" du fait de sa forte consommation énergétique et de matières. Ces auteurs y décèlent aussi des sites correspondant partiellement à des HP urbains en tant que sous-anthrotopes formés tantôt d'un noyau de béton et de verre, tantôt de de parcs industriels, ainsi que des HP intriqués avec "Hortus" tels que les parcs publics et jardins privés, terrains de golf, bords arborés des rues, etc. Urbs se développe selon une dynamique pilotée par la croissance économique et démographique ainsi que par des décisions institutionnelles. C'est aussi un commun de taille très variable allant du simple hameau de village de quelques dizaines d'habitants à la ville de plusieurs milliers, dizaines ou centaines de milliers d'habitants ou à la mégapole de population dépassant les dix millions. En tant que commun, Urbs peut se présenter en plusieurs sous-groupes d'intérêts variés distribués dans l'ensemble des acteurs urbains: résidents, ouvriers et employés, commerçants, artisans, industriels, prestataires de services, etc. La [figure 2.9](#) propose quelques illustrations diversifiées de Urbs.

Les holons "iUr, abcde..." de Urbs peuvent être composés de divers quartiers résidentiels aux traits architecturaux, urbanistiques et de densité de population parfois très contrastés, ainsi que de diverses zones d'activité industrielle ou commerciale, à des traits topographiques et hydrographiques particuliers, à des environnements plus ou moins pollués, à des densités plus ou moins fortes de trafic routier ou ferroviaire, etc.

#### 2.4.5. Communs et holons de Hortus

Hortus était à l'origine une ceinture horticole de Urbs qui s'avérait nécessaire aux villes pour l'acheminement rapide des denrées périssables. Cette ceinture persiste encore parfois en bribes, notamment dans les pays en développement. Actuellement, le phénomène

d'urbanisation s'est amplifié et concentre plus de la moitié de la population mondiale. Cette concentration atteint même plus de 80% dans un pays comme la France d'après JANIN (2015), où le phénomène gèberait plus de 200 ha par jour. Parallèlement, VIDAL (op. cit.) observe que des espaces verts de type Hortus reviennent en ville ainsi qu'une horticulture hors sol ou dans des friches urbaines, tantôt récréative dans les pays développés et tantôt plus fonctionnelle et alimentaire dans les pays en développement. Quant au acteurs d'un commun de Hortus, ils désignent les horticulteurs et jardiniers urbains et péri-urbains pratiquant à titre professionnel ou privé. La [figure 2.10](#) reproduit quelques illustrations photographiques de Hortus.



*Figure 2.9. Illustrations de 4 FP de Urbs (Photos: Fotolia): Ville de Manaus, état d'Amazonas au Brésil (A), Village de Montovun en Croatie (B), Cité du Soleil à Haïti (C) et Mégapole de Shanghai (D)*



*Figure 2.10. Illustrations de 4 FP de Hortus (Photos: Fotolia): champs de tulipes aux Pays-Bas (A), potager urbain à Bruxelles (B), Central park à New-York (C) et champs maraîchers près de Hambourg (D)*

Les holons de Hortus "iHo,abcde..." se distinguent par exemple selon les traits de texture ou de degré de pollution des sols, les traits des services prestés (parcs et jardins, promenades, golf, autres terrains de sport, etc.) ou ceux des filières d'écoulement des production selon leur

nature (plantes d'ornement, fleurs, produits maraîchers, etc. ), les traits de situation géographique par rapport à Urbs, les traits d'équipement (serres, irrigation, etc.) et d'intensité de main d'œuvre, ceux de la fertilisation organique et minérale pratiquées, etc.

#### 2.4.6. Communs et holons de Aqua

Aqua désigne les eaux de surface navigables ou non navigables ainsi que les eaux souterraines affleurantes à l'exclusion des mers et océans. Aqua englobe les zones inondées comme les mangroves, le bayou, les salants et tous les écosystèmes amphibies. La [figure 2.11](#) illustre quatre facettes de Aqua dans le monde. Un réseau hydrographique constitutif de Aqua est tronçonné en FP et HP dans une IP et une EP du fait que la plupart des rivières d'importance s'étendent sur de grandes distances. Les grandes rivières et fleuves traversent donc les frontières des autres communs potentiels.

Un holon "iAq,abcde..." représente un volume d'eau de surface tel qu'une portion de rivière ou une partie d'étang. Ce volume est partagé collectivement par un groupe d'acteurs connus et définis. Le contenu matériel du volume est relativement homogène dans ses traits (abcde) et caractères selon le degré de précision ou de résolution adopté. On pourrait citer des traits tels que: un intervalle donné entre les débits d'étiage et de crue, un lit de sédiments de même type, une biodiversité aquatique similaire en nombre et types d'espèces, de même pratiques de pêche, de loisirs aquatiques, de navigation, etc.



*Figure 2.11. Illustrations de 4 FP de Aqua de 4 IP appartenant également à 4 EP bien distincts (Photos: Fotolia): Rivière Li en Chine, pêche au Cormoran (A), Canal de Sclausen en Basse Saxe, péniche chargée de charbon (B), Nil à Assouan, felouques de croisière (C) et delta du Mékong, mangrove (D)*

#### 2.4.7. Communs et holons de Desertum

La FP de Desertum s'applique aux espaces de déserts et pseudo-déserts rocheux, rocailleux, de sable ou de glace.

Les communs de Desertum sont très peu peuplés voire de simples lieux de transit des nomades. Ils peuvent s'étendre sur de très vastes zones relativement uniformes et peu anthropisées comme l'Antarctique ou le Sahara. Mais, ils peuvent aussi être intégrés à des EP et IP tempérés, subtropicaux et tropicaux plus humides sous formes d'affleurements rocheux ou de cuirassements latéritiques. De même ils peuvent être associés avec des zones de peuplement d'Ager et d'Aqua comme dans les oasis.

Quatre FP de Desertum sont illustrées à la [figure 2.12](#). Les holons "iDe,abcd..." peuvent se distinguer par la nature minérale des sols, la rareté relative et le type de végétation, l'accès

plus ou moins proche à un point d'eau, l'activité économique qui s'y déroule (transport nomade, pêche sous glace), etc.



*Figure 2.12: Illustrations de 4 FP de Desertum (Photos: Fotolia): Dunes de sable d'Oman (A), Glaces et Roches d'Antarctique (B), Rocailles du Cap Vert (C), Marnes des Bardenas Reales de Navarre en Espagne (D)*

## 2.5. Illustration: traits et caractères des landes de Gascogne

### 2.5.1. Traits et caractères du milieu naturel

#### *Données géographiques et géologiques*

Les landes de Gascogne constituent ce que PAPY (op. cit.) dénomme un "grand ensemble géographique". Elles s'étendent sur un triangle de plus de 1 Mha (1 million d'hectares) dans le Sud-Ouest de la France. Leur topographie est plane, une sorte de vaste plateau avec une pente moyenne de 1,25% d'après JOLIVET et al. (2007).

Elles sont approximativement délimitées à la [figure 2.13](#) sur le littoral atlantique entre les embouchures de l'Adour et de la Garonne et sont étalées entre les vallées de ces deux fleuves. Leur territoire est découpé administrativement sur trois départements, principalement sur celui de la Gironde et des Landes mais aussi beaucoup plus modestement sur celui du Lot-et-Garonne.

DUBREUILH et al. (1995) situent les landes au sein du grand domaine géologique du Bassin aquitain, bordé au Nord par celui du Massif armoricain, à l'Est par celui du Massif central et au Sud par les Pyrénées. L'Ouest de ce Bassin s'est vu comblé de dépôts alluviaux du Néogène (Miocène puis Pliocène de l'ex Ère tertiaire) et du Pléistocène en provenance alternée du Massif central et des Pyrénées. La présence locale d'accumulations ligniteuses à la fin des séquences sédimentaires témoignent de colonisations végétales et donc aussi d'un effet agrasant sur les terres émergées. Un gradient chronologique de Sud-Est vers l'Ouest s'observe pour cette agradation continentale sur la coupe de la figure 2 de DUBREUILH et al. (op. cit.). Des dépôts alluviaux datés du Pléistocène constituent la formation dite des "Castets", partie intégrante du "Sable des landes *lato sensu*". Ils sont recouverts de sables jaunes clairs déposés suite à leur remaniement éolien par les forts vents d'Ouest au cours des glaciations du Pléistocène. DUBREUILH et al. (op. cit.) considèrent effectivement que c'est principalement le matériau des sables des Castets repris par le vent au cours des glaciations du Würm qui a recouvert les landes en surface. Ces dépôts éolisés de couverture forment le "Sable des landes *stricto sensu*". Pour JOLIVET et al. (op. cit.), le "Sable des landes" constitue un caractère identitaire et

il est ainsi diagnostiqué comme tel d'une véritable *région naturelle*. Il faut aussi y inclure les corps dunaires littoraux, d'origine maritime sédimentaire et éolienne au cours de la période actuelle de l'Holocène.

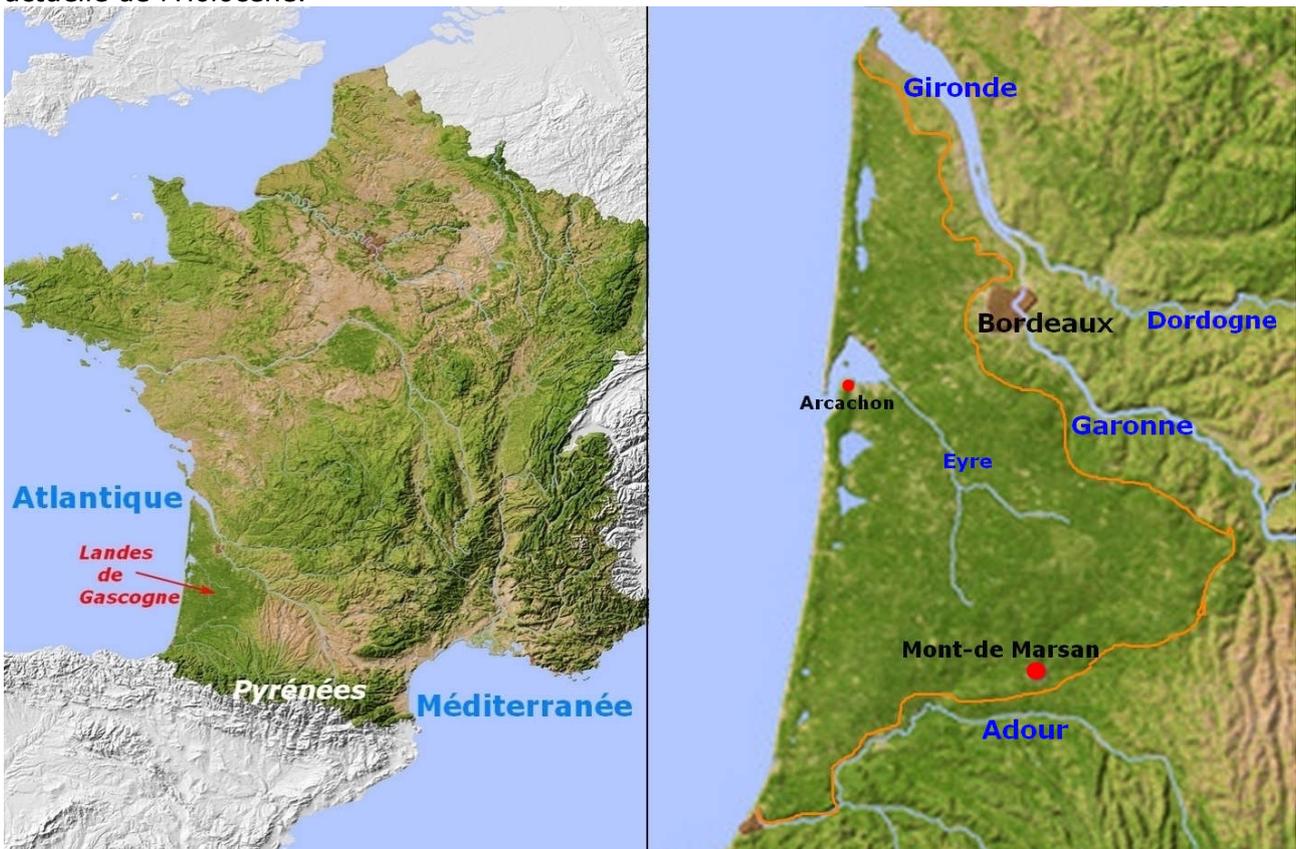


Figure 2.13: Situation géographique des Landes de Gascogne à gauche. Et à droite, un agrandissement (Source du fond oro-hydrographique et d'occupation des sols: Fotolia)

PAPY (op. cit.) distingue trois régimes de drainage au sein des Landes pour établir trois domaines distincts. D'abord, la lande humide couvre une zone d'environ 500 kha (500.000 ha) naturellement inondée durant de long mois. Elle forme en grande partie les interfluvés rétro-littoraux et la gouttière pré-littorale en arrière des formations dunaires. Son altitude varie de 30 m à l'Ouest jusqu'à 150 m à l'Est. Ensuite la lande semi-humide ou mésophile la borde dans les parties hautes des vallées en pente douce. Enfin, la lande sèche sèche se limite à la partie basse et souvent raide des versants de vallées creusées par les cours d'eau comme l'Eyre ou les petits fleuves côtiers (courants landais) qui drainent le plateau rétro-littoral. Dans la lande humide, PAPY (op. cit.) situe une vaste nappe phréatique d'eau libre proche de la surface en toute saison, rarement à plus de 1 ou 2 m de profondeur. Elle subit des oscillations saisonnières de 0,5 à 2 m d'amplitude selon les bilans entre l'alimentation par les pluies, de l'ordre de 1.000 mm/an, et le drainage par les rivières ainsi que l'évapotranspiration dont la quantité est comprise entre 650 et 750 mm/an. Cette nappe est aussi continue dans le sol et sous-sol sur une épaisseur variable de 10 à 130 m sur toute l'étendue de la région naturelle telle que considérée par JOLIVET et al. (op. cit.). Malgré l'absence de mention explicite par les divers auteurs précités, la présence de cette nappe phréatique devrait être attribuée à des argiles intercalaires moins perméables dans les diverses séquences d'alluvions fluviales du Néogène et du Pléistocène ainsi qu'au drainage naturel trop lent des cours d'eau du fait du faible gradient topographique.

Quant à la végétation, les conclusions de l'étude palynologique de FAURE et GALOP (2011) font référence à une pinède mixte, ancienne et naturelle, comportant du bouleau et du chêne. Elle domine le territoire durant la première moitié de l'Holocène, jusqu'à environ 6 Ka AEC (6.000 ans Avant l'Ère Courante, c'est-à-dire av. J.C). Il y succède ensuite une chênaie mixte avec des pins mais diversifiée aussi en espèces feuillues (noisetier, bouleau, orme, tilleul, saule, etc.). Cette chênaie mixte ne sera que faiblement anthropisée, sous-forme d'un système

agro-forestier jusqu'à 3,5 Ka AEC, début du néolithique.

### Données géomorphologiques et pédologiques

Sur la frange côtière dans une bande littorale pouvant atteindre plusieurs km de large s'inscrit un relief dunaire composé du cordon littoral actuel et de dunes anciennes en retrait dont l'allure est en croissant de lune, tantôt parabolique, à face convexe sous le vent, tantôt barkhanoïde, à face convexe exposée au vent. MUGICA et al. (2008) en présentent la succession suivante selon un gradient d'âge décroissant de l'intérieur des terres vers la côte:

- dunes paraboliques de 3 à 1 ka AEC;
- barkhanes de 1 ka AEC jusqu'au XIII<sup>e</sup> siècle, responsables de la formation des étangs et lacs côtiers;
- dunes paraboliques à nouveau du XIII<sup>e</sup> au XVII<sup>e</sup> siècle;
- dunes à crête barkhanoïde du XVII<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> siècle, jusqu'à 80 m de haut;
- cordon des dunes actuelles d'une hauteur de 10 à 25 m.

Une coupe transversale schématise ces grands éléments de la géomorphologie landaise à la [figure 2.14](#). PAPY (op.cit.) précise encore que la lande humide des interfluves n'est pas strictement plane et présente plusieurs formations locales en dépression ou en relief à dénivelé relativement faible telles que des cuvettes constituant des marécages tourbeux, des lagunes et des dunes éparses d'une hauteur dépassant à peine les 2 m. Les "lagunes" sont décrites comme des mares rondes ou ovales de 10 à 80 m de diamètre et d'environ 2 m de profondeur où l'on pouvait pêcher carpes et brochets. Elles pourraient être la trace d'anciens culots de glace formés en conditions périglaciaires. Les modestes dunes éparses sont aussi appelées "ronds de fougère" par les paysans du Médoc.

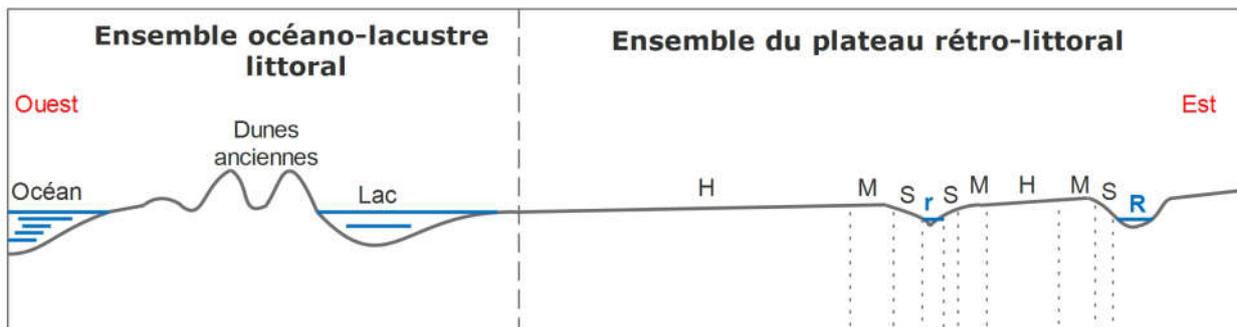


Figure 2.14: Coupe géomorphologique transversale Ouest-Est des landes selon deux ensembles distincts. Légende pour le plateau rétro-littoral: H = lande humide, M = lande semi-humide, S = lande sèche, r = ruisseau, R = rivière

JOLIVET et al. (op.cit.) localisent ces micro-dunes continentales principalement le long des cours d'eau. Elles seraient formées d'apports éoliens issus du matériau de creusement des vallées. Les mêmes auteurs indiquent également la présence d'un micro-relief caractéristique des landes constitué de rides transversales de quelques décimètres de dénivellation, discontinues et formant des ondulations parallèles masquées en grande partie par la végétation.

Tant PAPY que JOLIVET et al. fournissent des données sur les caractéristiques naturelles des sols. Dans le plateau rétro-littoral, les sols sont marqués par une podzolisation. Elle consiste en une migration de complexes humiques alumino-ferreux en conditions acides (acido-complexolyse). Ces complexes s'immobilisent en profondeur par insolubilisation. La zone d'accumulation du fer et de l'aluminium ainsi que de la matière humique au-dessus est dénommée "horizon spodique". Celui-ci est favorisé par une hydromorphie temporaire qui permet la précipitation du fer sous forme ferrique en période aérobie. La cimentation des grains de sable par les constituants alumino-ferriques peut alors entraîner une induration de l'horizon spodique sous forme d'un "alios". Ce dernier présente une perméabilité plus faible mais n'est pas pour autant imperméable au point de provoquer une suspension superficielle de la nappe phréatique durant tout l'hiver. L'alios se distingue de la "garluche" qui est une cuirasse ferrugineuse dure induite par une oxydation brutale de la nappe d'eau le long des

cours d'eau les plus importants. La garluche n'est donc localement présente que dans la lande sèche. Lorsque les conditions d'hydromorphie s'allongent en durée comme dans la lande mésophile d'abord, l'horizon spodique ferro-alumineux est de plus en plus meuble et de moins en moins différencié jusqu'à devenir carrément absent dans la lande humide. La granulométrie du sol révèle une teneur moyenne en sables (50 à 2.000 µm) de 95% ce qui rend ce matériau très filtrant. Le pH (H<sub>2</sub>O) reste souvent inférieur à 5,0 dans les 50 premiers centimètres, indice d'une proportion élevée d'aluminium sur le complexe adsorbant argilo-humique. Des arénosols (type de sols peu évolués) sont représentatifs des sables dunaires littoraux. Ils sont composés à plus de 98% de sables et leurs traits au niveau des dunes anciennes et actuelles ne consistent ni en engorgement d'eau, ni en une acidité significative, ni en une différenciation d'un horizon spodique. Une engorgement d'eau marque cependant les dépressions entre les dunes qui se dénomment "lettes". La salinité va décroissante à mesure que l'on s'éloigne de la mer océane (plage, lette, zone humide en bordure des lacs). L'eau des étangs et des lacs est douce.

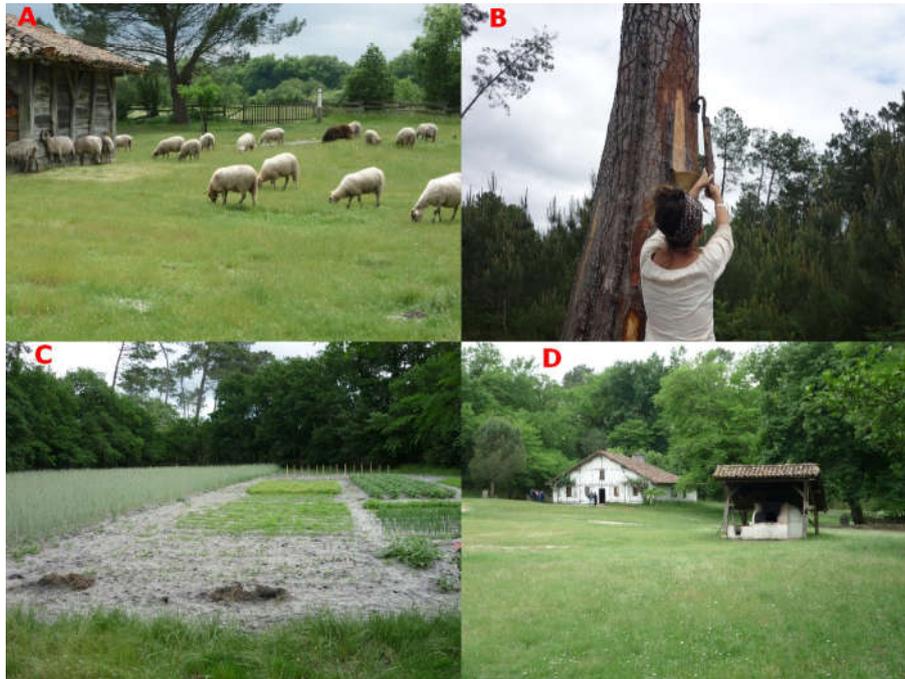
## 2.5.2. Traits et caractères paysagéniques

### *Évolution historique*

Les traits paysagéniques sont en partie hérités du milieu naturel. Mais, ils sont aussi acquis sous l'influence humaine par l'aménagement et la gestion du territoire. Ce dernier se voit ainsi conféré ses caractères phénoquiques essentiels. Le facteur anthropique peut provoquer des mutations plus ou moins spectaculaires. FAURE & GALOP (op. cit.) situent le début de la colonisation humaine des landes durant l'Antiquité, vers 2.500 AEC, entre la fin du Néolithique et l'Âge du Bronze. L'anthropisation devient alors pérenne. L'établissement humain marque le début d'une coexistence forestière avec des landes agro-pastorales dont l'extension s'accélère au Moyen-Âge, période de forte déforestation en Europe. La forêt feuillue va persister jusqu'à cette époque. C'est alors que s'établit le système agro-pastoral qui précède la pinède actuelle. Jusqu'au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, PAPY (op. cit.) précise que si la lande humide était affectée au parcours des moutons (Saltus), la lande mésophile ou semi-humide et la lande sèche l'étaient aux champs (Ager, Hortus) et à la "pignada" (Silva). Le fumier produit lors des stabulations hivernales des moutons était utilisé pour l'engraisement des cultures. L'écomusée de Marquèze à Sabres a reconstitué les principaux caractères de la colonisation agro-pastorale des landes avec un habitat rural organisé en "airiaux". Ceux-ci rassemblaient plusieurs familles et métiers. Depuis l'époque gallo-romaine, la pinède était exploitée par le gemmage c'est-à-dire la récolte de la résine par saignée des troncs. La [figure 2.15](#) illustre les activités agro-pastorales et de gemmage telles que reconstituées à l'écomusée pré-cité. Les "quartiers" désignaient des regroupements d'airiaux et les "bourgs" de véritables villages. C'était une économie centrée plutôt sur l'auto-subsistance avec partage des métiers dans les airiaux. Les terres du Saltus constituaient de véritables "communs" où les bergers se déplaçaient sur des échasses pour surveiller au loin les troupeaux et garder les pieds au sec. Les ouvriers de gemmage s'appelaient d'abord des "résiniers" puis des "gemmeurs" lorsqu'ils furent syndiqués après la révolution industrielle du XIX<sup>e</sup> siècle. La résine récoltée était distillée pour produire la térébenthine et le colophane. Elle était cependant utilisée dès l'époque gallo-romaine pour le calfatage des bateaux.

Dans le système agro-pastoral, le drainage du sol par des fossés semi-circulaires dénommés "crastes" et prolongés jusqu'à la rivière dans les zones inondées de la lande humide était pratiqué d'après PAPY (op. cit.). Il s'agissait ainsi de conquérir de nouveaux espaces en faveur de l'agriculture et de la pinède. JOLIVET et al. (op.cit) rappellent aussi l'historique du paysage landais et son passé à la fois agro-pastoral et agro-forestier. Le défrichage de la forêt mixte primitive s'opérait sur les têtes de vallons bien drainés pour l'installation d'airiaux et de quartiers dans la lande mésophile ainsi que sur les vieilles dunes boisées du littoral. Avec la proto-industrialisation centrée sur le charbon et la machine à vapeur à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, l'économie entame une mutation importante. L'émergence d'une classe sociale ouvrière, l'intensification du commerce et le développement des marchés initient le mouvement des *enclosures* en Angleterre, une privatisation complète du foncier par une disparition des droits de vaine pâture. A la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, cette mutation se renforce grâce à un nouvelle

révolution technologique basée sur l'électricité, le gaz et le pétrole ainsi que le moteur à explosion. Le gemmage persista jusqu'à la moitié du XX<sup>e</sup> siècle, les produits dérivés de la pétrochimie le rendant obsolète.



*Figure 2.15: Reconstitutions à l'écomusée de Marquèze (Photos: Luc OPDECAMP): Moutons de Saltus dans l'airial (A), Saignée de gemmage sur un pin (B), Champ de seigle d'Ager et potager de Hortus (C), Maison du meunier et four à pain dans l'airial (D)*

Le Saltus de la lande humide devient dès lors archaïque aux yeux des dirigeants politiques et de Napoléon III. Ce dernier promulgue *la loi du 19 juin 1857 dite d'assainissement et de mise en culture des Landes de Gascogne* pour faire entrer l'espace landais dans le développement économique-industriel en cours. Cette loi instaure l'obligation pour les communes de valoriser et de boiser leurs terres ou de les vendre s'il n'en ont pas les moyens. Pour POTTIER (2010), il en résulte une acquisition massive de terres par les notables girondins et landais ainsi que des plantations massives avec une essence existante, le pin maritime (*Pinus pinaster*). Début du XX<sup>e</sup> siècle, le massif forestier est passé de 130 à 843 Kha, dont 780 en pins maritimes. Petit à petit les airiaux et quartiers sont désertés au profit des villages (bourgs) et des villes. PAPY (op. cit.) fait état des diverses difficultés techniques et obstacles naturels à l'assainissement. Ils causèrent indirectement de dramatiques incendies ravageant la nouvelle pinède jusqu'à ce qu'un plan d'ensemble de drainage perpendiculaire aux courbes de niveau puisse être efficacement implémenté. Ce plan est basé sur le système de crastes hérité, complété et modifié.

PAPY rappelle aussi que la monoculture de pins dans la lande humide a été dénoncée. De vastes zones agricoles se sont alors implantées là où la lande est drainée et convient le mieux. En cas de sécheresse, il est aussi possible d'irriguer. Le maïs et des fourrages ont été utilisés car ce type d'espèces supporte la montée hivernale des eaux. La grande agriculture d'Ager dans la lande humide se résume pour PAPY en 3 étapes:

- après 1949, à Solférino et à Labouheyre sont créés de vastes domaines pour la culture du maïs et l'élevage de bovins, mais ce dernier s'avère non rentable;
- de 1958 à 1968, la société d'économie mixte d'Aménagement des Landes de Gascogne défriche et assainit 8.000 ha, installe des infrastructures et des unités d'exploitation familiale de 70 ha qui sont occupées en majorité par des Français revenus d'Afrique du Nord;
- à partir de 1966, des agriculteurs acquièrent de grandes parcelles et créent des domaines de plusieurs centaines d'ha alors que s'éteint l'agriculture traditionnelle de lande sèche. La nouvelle agriculture en lande humide est soutenue par de puissants moyens financiers. Elle s'appuie sur la mécanisation et l'irrigation ainsi que sur une main d'œuvre ouvrière. Elle

couvrait 45.000 ha de lande humide à la date de publication de l'article de PAPY, essentiellement voués à la culture du maïs. De nombreuses exploitations familiales promues par la compagnie d'Aménagement des Landes n'ont pas pu faire face aux coûts élevés de l'exploitation intensive. Mais d'immenses champs de maïs rompent encore aujourd'hui la monotonie de la pinède.

### *Données agropédologiques*

Les données agropédologiques sont celles que peut exploiter l'ingénierie agronomique à l'échelle des territoires. C'est une échelle qui dépasse à la fois celle d'une parcelle et le plus souvent aussi celle d'un ensemble de parcelles propres à une exploitation agricole ou forestière. Les échelles de l'agropédologie sont typiquement celles de la paysagénie (HP, FP, IP et EP de la [figure 2.5](#)) et se rapportent en quelque sorte à celles des pédopaysages ou plus largement encore au concept d'agropédosystèmes introduit par OPDECAMP (2015). Les sols n'y sont plus considérés comme des objets naturels à part, étudiés uniquement pour eux-mêmes. Au contraire ce sont leurs attributs ou traits importants pour l'aménagement agronomique qui sont essentiellement étudiés. Ces traits font dès lors l'objet d'une classification technique plutôt que d'une classification naturelle.

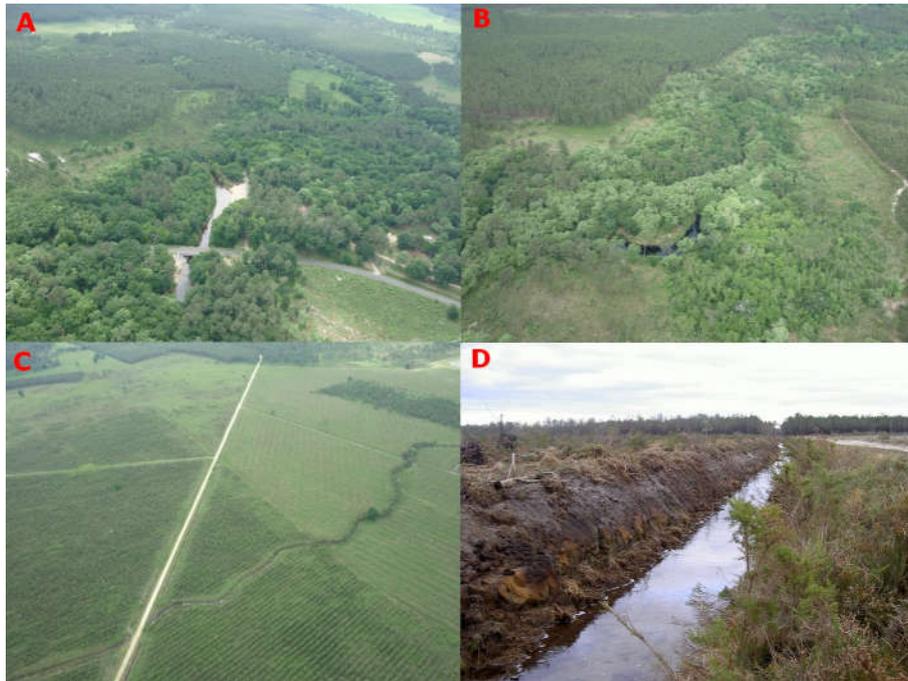
SANCHEZ et al. (2003) ont mis à jour la dernière classification technique des sols, mais elle date déjà et n'a pas été fort appliquée, à défaut probablement d'échelle adaptée et de communicabilité entre agronomes et pédologues. Contrairement à ce que le titre de cette classification technique laisserait sous-entendre, elle n'est pas limitée aux régions tropicales. En agropédologie, les traits des sols sont examinés dans leur association avec les itinéraires techniques généraux mis en œuvre par les exploitants. Ces itinéraires sont fortement conditionnés aussi par le développement des filières économiques. S'il existe des incompatibilités ou des préalables, le nombre de combinaisons possibles reste potentiellement assez élevé pour ouvrir de nombreux "champs" d'innovation.

Les interactions entre les anthrobiotes et les sols s'opèrent dans l'unité des compartiments verticaux illustrée à la [figure 2.4](#). Les traits suivants, symbolisés par la concaténation "Sage" d'après la classification proposée par SANCHEZ et al. (2003, op. cit.), peuvent être retenus pour la plupart des HP du plateau landais rétro-littoral, qu'il y ait ou non un horizon spodique bien marqué. Les symboles signifient dans l'ordre:

- "S": un matériau sableux jusqu'à plus de 50 cm de profondeur;
- "a": une toxicité aluminique pour les espèces sensibles mais un trait favorable pour les espèces tolérantes du fait probable d'une meilleure disponibilité ou assimilation potentielle du phosphore en présence d'aluminium cationique (formation de paires d'ions complexes Al-P, voir point 3);
- "g": un engorgement d'eau dû au drainage imparfait ou insuffisant mais qui peut être avantageux pour la riziculture irriguée par exemple si le niveau de la nappe peut être contrôlé et bien ajusté;
- "e": un matériau très lessivable pour les nutriments minéraux ionisés et les composés organiques solubles.

Comme déjà évoqué, le drainage naturel de plateau est insuffisant et assuré naturellement par les ruisseaux, rivières, courants et fleuves. Ce drainage naturel se distingue à vol d'oiseau par des tracés sinueux et des galeries de feuillus. Il est amélioré par un réseau artificiel de crastes raccordé au réseau hydrographique naturel. Les quatre photos reproduites à la [figure 2.16](#) sont illustratives du drainage naturel et artificiel des landes.

JOLIVET et al. (op.cit.) précisent l'itinéraire technique actuel de la sylviculture basée sur des variétés de pin améliorées, un drainage systématique, une fertilisation phosphatée, des éclaircies jusqu'à une densité finale de 400 pins/ha et une coupe rase après 35 à 50 ans de croissance. La productivité est estimée à 12 m<sup>3</sup>/ha/an, mais elle s'inscrit dans une fourchette de variabilité assez large de 7 à plus 16 m<sup>3</sup>/ha/an d'après LOUSTAU et al. (1999) cités par ces auteurs. De nouvelles variétés sont envisagées sur des rotations plus courtes de 20-25 ans et plus orientées vers la trituration. La production connaît plusieurs filières comme le bois de chauffe, le bois d'œuvre, la trituration pour former de la pâte à papier ou même la carbonisation pour obtenir du charbon actif (agent de filtration-épuration).



*Figure 2.16: Drainage naturel par les cours d'eau et artificiel par les crastes (Photos A, B et C par Luc OPDECAMP et photo D, libre de droit, par le Lycée Louis de Foix, Bayonne): affluent de l'Eyre près de Pissos (A), galerie de feuillus le long du réseau hydrographique (B), réseau de crastes se déversant dans un ruisseau (C), fossé de craste où l'on perçoit un horizon spodique ocre dans la paroi verticale (D)*

Il faut savoir que la Silva du plateau landais est privatisée à plus de 90% selon POTTIER (op. cit.) et que sa fonction première est la production. Elle est divisée en multiples parcelles de propriétaires, au gré des subdivisions cadastrales. L'âge de la pinède peut y être fort variable et les pratiques peuvent également varier, ce qui est illustré par les photos de la [figure 2.17](#). Actuellement, des essais de diversification avec l'Eucalyptus sont également tentés (communication orale du 30 juin 2018 de Pierre COUDER, pilote d'autogyre et formateur à l'école de pilotage "Le vol des aigles" à Biscarosse).

Pour ce qui est de la FP de la Silva littorale, POTTIER (op. cit.) relève bien qu'elle se distingue de celle du plateau du point de vue géomorphologique car elle occupe les anciennes dunes. Elle se distingue aussi du point de vue économique et environnemental car son but est d'assurer prioritairement une protection contre l'invasion du sable.

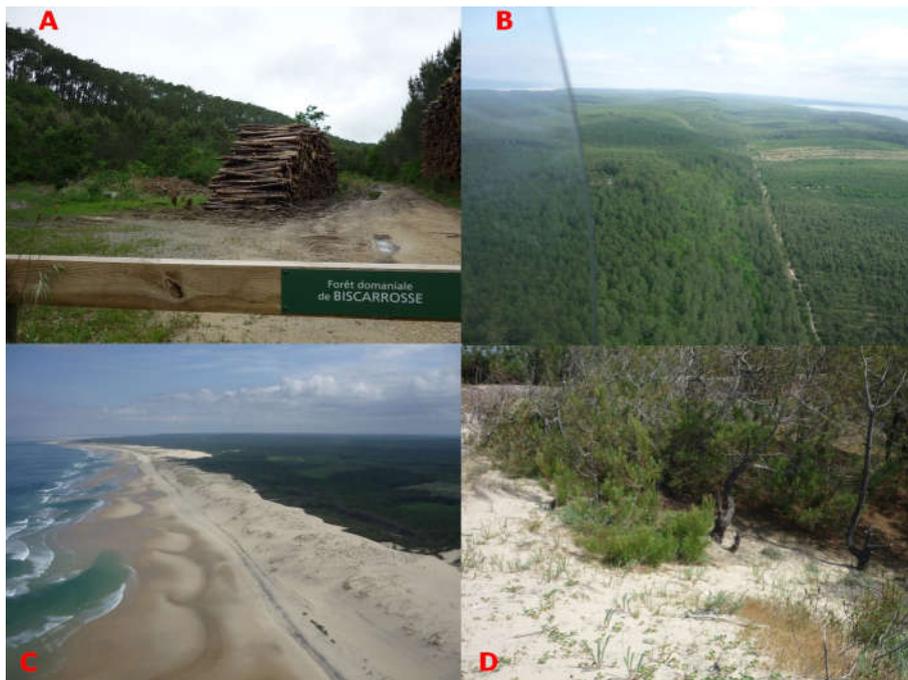
La Silva littorale assure aussi une fonction sociale d'accueil du public d'où découle une image de "marque". Enfin, elle est aussi spécifique du point de vue de la propriété foncière car elle est majoritairement publique constituée de forêts domaniales à 52%.

Pour rappel, le compartiment "sol" de cette facette paysagère est également bien distinct de celui de la Silva rétro-littorale du plateau. Techniquement, ce compartiment peut être symbolisés par "Se" c'est-à-dire des sables très lessivables selon les conventions de SANCHEZ et al. (2003, op. cit.). Plusieurs photos de la Silva dunaire sont rassemblées dans la [figure 2.18](#).

L'Ager des landes est orienté vers la culture intensive de maïs en irrigation par aspersion avec des tourniquets géants de 500 à 800 m de diamètre dans des exploitations de 100 à 150 ha, comme illustré à la [figure 2.19](#). C'est essentiellement du maïs grain (> 90%) produit pour les filières avicole et porcine. La DRAAF d'Aquitaine (2013) signale sa progression ainsi que l'apparition de légumes de plein champ (maïs doux, haricots verts, carottes). L'irrigation par aspersion s'est maintenue et développée car le maïs est sensible à la sécheresse estivale. Les rendements en maïs (grain) irrigué atteignent les 10 t/ha.



*Figure 2.17: Diversité parcellaire de la Silva du plateau landais (Photos: Luc OPDECAMP): parcelles d'âge très variable (A), pinède à sous-étage de jeunes feuillus (B), parcelle coupée à blanc (C), géométries et dimensions variables des parcelles (D)*



*Figure 2.18: Vues aériennes et au sol de la Silva dunaire (Photos: Luc OPDECAMP): forêt domaniale dans les dunes anciennes (A), les ondulations du relief dunaire de la Silva littorale entre océan et lacs (B), contacts entre la Silva dunaire et les dunes actuelles (C), langue d'invasion et d'envasement de la pinède littorale à Lacanau par le sable des dunes vives actuelles (D)*

Les superficies cumulées en 2010 pour les deux départements principaux de la région naturelle, à savoir celui de la Gironde et celui des Landes, sont proches de 100.000 ha pour le maïs et de 20.000 ha pour les légumes. L'Ager dans les landes représente donc globalement environ 10% de la région naturelle. Il se localise bien-sûr dans l'ensemble du plateau rétro-littoral drainé par des crastes et non dans l'ensemble océano-lacustre représenté dans le

schéma de la figure 2.14. Son compartiment sol est donc représenté par la même concaténation de lettres "Sage" que la Silva rétro-littorale, en référence à la classification technique de SANCHEZ et al. (op. cit., 2003). A propos du caractère aisément lessivable des sables des landes, JUSTE et al. (1982) ont mesuré le lessivage de l'azote (nitrique), du phosphore (P), du potassium (K<sup>+</sup>) sous apports d'engrais, ainsi que de calcium et magnésium apportés par amendement. Les mesures sont effectuées de 1972 à 1979 en cases lysimétriques de plein champ sur 1 m d'épaisseur de podzol hydromorphe humique cultivé en maïs. D'abord, ils observent un coefficient moyen de drainage de 55% [mm drainés/(mm de précipitations + mm d'irrigation)] soit près du double que les 20 à 30% habituels en Europe de l'Ouest. Ils observent également que le pH (H<sub>2</sub>O) des eaux drainées est de 6,4 alors que le pH (H<sub>2</sub>O) du sol varie entre 5,3 et 5,0 sur son épaisseur de 100 cm indiquant un lessivage profond exceptionnel des amendements calci-magnésiens. Les pourcentages moyens d'éléments minéraux lessivés par rapport à leurs apports sous forme d'engrais ou d'amendement sont de 24% pour l'azote, 0,2% pour le phosphore, 31% pour le potassium, 102% pour le calcium et 194% pour le magnésium. Les HP de Ager s'appauvrit donc en calcium et surtout en magnésium. Ces HP semble s'enrichir en azote et en potassium essentiellement exportés par le maïs, ainsi que très nettement en phosphore probablement "fixé" dans le compartiment sol et en partie exporté lors des récoltes.

Le système dunaire actuel du littoral atlantique présente les caractères d'une FP de Desertum composée de plusieurs HP. MUGICA et al. (op. cit.) dans leur "illustration 3" y distinguent ainsi la plage, l'avant-dune, le cordon dunaire composé de la dune blanche où peut se fixer l'oyat (*Ammophila arenaria*) et de la dune semi-fixée ou "grise", ensuite l'arrière-dune non boisée à dune "grise" antérieure et lette, enfin une transition avec les dunes anciennes boisées. C'est dans ces HP que l'on peut identifier d'éventuels traits de salinité (s) du fait d'apports par les embruns et l'eau de mer portant la conductivité électrique de l'eau du sol dans la lette par exemple au-dessus de 0,4 S/m. Dans la lette grise l'Immortelle des dunes (*Helichrysum stoechas*) est résistante à cette salinité.



Figure 2.19: Ager intensif centré sur le maïs grain irrigué des landes (Photos: Luc OPDECAMP): irrigation par aspersion en rampes tournantes (A), rampe d'irrigation au repos dans jeune champ de maïs (B), détail des jeunes plants de maïs (C), bâtiments agro-industriels (D)

#### Données sociologiques et urbanistiques

L'identification des acteurs et parties prenantes est primordiale et incontournable en paysagénie territoriale. DEUFFIC et al. (2010) fournissent une partition des propriétaires forestiers privés selon les trois classes d'importance relative suivantes:

- les groupements et grandes familles détiennent 25% de la surface boisée. Ils sont moins de

200 et possèdent de grands domaines de plus de 500 ha selon le cadastre 2003. Parmi eux, moins de 50 possèdent des domaines de plus de 1.000 ha.

- les propriétés moyennes familiales détiennent 35% de la surface boisée. Ces périmètres de 100 à 500 ha sont détenus par 1.600 propriétaires, mais les revenus forestiers qu'ils procurent ne sont généralement pas suffisants pour en vivre, un minimum de 300 à 500 ha étant nécessaire.

- les petites propriétés individuelles ou collectives occupent 30% de la surface boisée. Ces propriétés de 4 à 100 ha sont au nombre d'environ 16.500. L'intérêt économique est faible à très faible et la valeur surtout symbolique. Les motivations de ces propriétaires sont de l'ordre de l'atavisme familial, du mimétisme social (intégration) et d'une épargne alternative. Les mêmes auteurs répartissent aussi les propriétaires en trois groupes face à l'écologisation de la société depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle, notamment par la classification de zones de protection NATURA 2000:

- les sceptiques remettent en cause l'intérêt fonctionnel et économique de la biodiversité. Pour eux, la biodiversité s'ajuste à la sylviculture et ces propriétaires sont hostiles à l'idée d'ériger la forêt en patrimoine naturel;

- les adeptes de la biodiversité ordinaire c.à.d. des espèces qui relèvent de la pratique sylvicole quotidienne par contraste avec la biodiversité extraordinaire qui concernent les espèces protégées. Considérant que ces dernières et leur biotopes sont déjà investies par les naturalistes, ces propriétaires s'intéressent prioritairement à la biodiversité des espèces de production en termes de mosaïque paysagère, de classes d'âge aussi à l'échelle du massif. Ils maintiennent les ripisylves et les chênes en bordure des parcelles. Ils partagent avec le groupe précédent l'idée que le faible niveau de biodiversité est lié aux conditions de pauvreté du sol et estiment qu'une biodiversité élevée est associée à des terrains plus riches. Leurs pratiques sont justifiées au nom de la rationalité économique. Ils s'opposent aux cadres réglementaires de gestion des objets naturels. C'est ainsi qu'au niveau faunistique ils perçoivent certaines espèces comme nuisibles ou ravageuses: chevreuils, cerfs, sangliers, insectes, etc.

- les promoteurs d'une biodiversité intégrée estiment que le travail du forestier intègre la prise en compte de la biodiversité. Ils défendent des pratiques de diversification des essences de production, de maintien d'un sous-étage, d'installation de lisières feuillues, de rétention d'arbres sénescents et de bois mort, etc. Ils espèrent en tirer divers avantages comme la résistance aux aléas, la résilience des peuplements et même des gains de productivité.

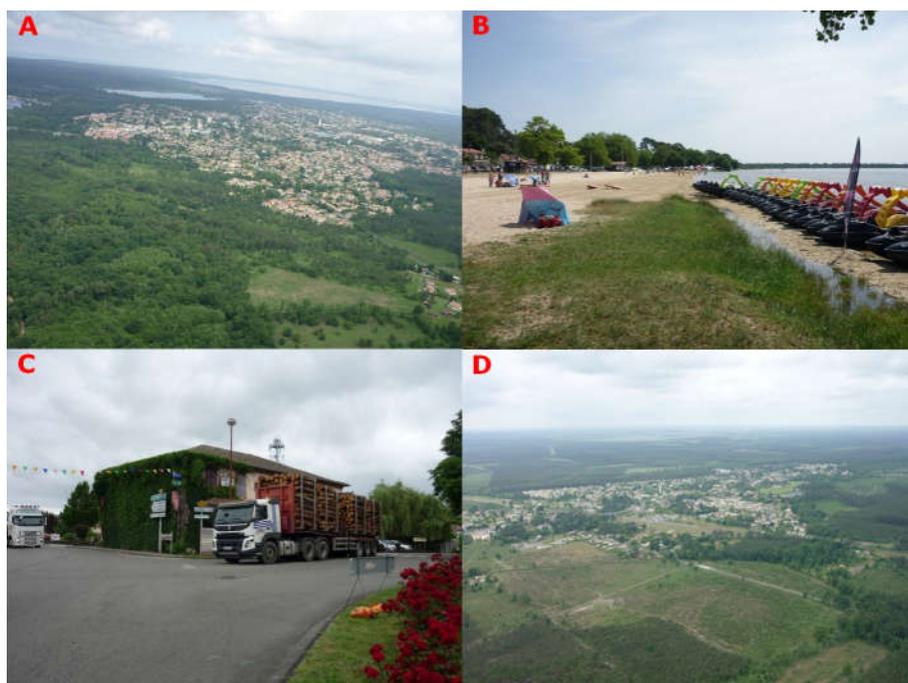
D'autres acteurs importants de la paysagénie des landes se retrouvent groupés au niveau local dans les villages ou villes dont les caractères et traits urbanistiques sont associés aux FP d'Aqua que sont l'océan atlantique et les lacs littoraux. On peut les définir comme des HP de villégiature océane et lacustre tels que Soulac-sur-Mer, Montalivet, Lacanau & Lacanau-Océan, Cap Ferret & Arcachon, Sanguinet, Biscarosse & Biscarosse-Plage, Parentis-en-Born, Mimizan & Mimizan-Plage, Léon, Soustons, Hossegor, Capbreton, etc. Les campings y occupent souvent des espaces importants mais discrets. D'autres HP de Urbs constituent plutôt des carrefours de communication routière ou ferroviaire tels que Sainte-Hélène, Le Barp, Belin-Béliet, Pissos, Sabres, Labouheyre, Castets, Magesq, Roquefort, etc. Enfin, il faut évoquer des HP de villes comme Mont-de Marsan, Dax ou encore Saint-Médard-en-Jalles, Martignas-sur-Jalles en périphérie de Bordeaux. Les acteurs locaux y sont des commerçants, ouvriers forestiers et agricoles, employés et fonctionnaires, etc. La [figure 2.20](#) rassemble quelques illustrations des HP de Urbs.

MORA et al. (2012, p. 113) se réfèrent aussi à l'émergence fondamentale de l'intercommunalité, dont le Parc Naturel Régional (PNR) des Landes de Gascogne est un exemple et constitue effectivement un projet de territoire mais d'initiative publique à savoir le Conseil Régional. Ce PNR regroupe 40 communes réparties sur les départements de la Gironde et des Landes. Il doit concourir aux politiques de protection de l'environnement, d'aménagement du territoire, de développement économique et social, de formation et d'éducation du public. Par ailleurs, les mêmes auteurs évoquent un autre type de projet de territoire, à savoir le "pays" qui est une émergence de démocratie participative. Le "pays" fédère des acteurs privés et publics autour d'un projet de développement à l'échelle d'un bassin de vie ou d'emploi (p.114). Si le pays n'a plus de légitimité administrative en France

suite à la loi n° 2010-1563 du 16 décembre 2010 de réforme des collectivités territoriales qui interdit la création de nouveaux pays, cette loi ne précise pas le devenir de ceux qui existent déjà. De plus, les "pays" peuvent être représentés et gérés sous différentes formes juridiques: *syndicat mixte de pays, association, groupement d'intérêt public, etc.* (Source: Wikipédia).

### 2.5.3. Synthèse

La délimitation des landes de Gascogne repose sur deux caractères naturels principaux: des sols sableux depuis la côte atlantique jusqu'aux têtes des vallées de la Garonne et de l'Adour et un relief plat rompu seulement par les dunes littorales et les vallées du bassin de l'Eyre. La grande superficie assez homogène ainsi délimitée dépasse largement le million d'hectares, ce qui permet de l'identifier comme une région naturelle. Le sable se sature rapidement d'eau par les pluies ou l'irrigation et s'assèche rapidement aussi par drainage et évapotranspiration. Il est aisément lessivable en éléments minéraux et composés organiques solubles. Le nom de "landes" est hérité de l'histoire agro-pastorale et forestière. Les "landes" mal drainées dominaient la région depuis le Moyen-Âge et étaient exploitées en tant que parcours "communs" pour les moutons, ce qui est typique d'une FP de Saltus. Elle coexistait avec une FP de Silva exploitée notamment pour le gemmage depuis l'époque gallo-romaine et une FP de Ager dans les parties inférieures des versants du réseau hydrographique. Elles ont été drainées et boisées de pins maritimes au XIX<sup>e</sup> siècle, marquant une mutation majeure de Saltus en Silva ainsi qu'une privatisation massive des "communs" pastoraux. L'importance de la FP de Aqua est également remarquable et se décline en 4 espèces: océan et lacs du littoral d'une part et d'autre part un réseau assez régulier de fossés à ciel ouvert anthropiques (crastes) raccordé au réseau hydrographique naturel du plateau rétro-littoral.



*Figure 2.20: Quelques types de HP de Urbs dans les landes (Photos: Luc Opdecamp): Biscarosse et ses lacs littoraux (A), Lacanau en bordure de son lac (B), le carrefour de Pissos (C), Ychoux dans le plateau landais (D)*

Les HP littoraux sont dominés par la Silva de protection dans les anciennes dunes paraboliques et barkanoïdes à sols moins différenciés et parfois salés par les embruns. Tous les HP rétro-littoraux sont marqués par un pH du sol acide, un taux d'aluminium échangeable présumé supérieur à 50% dans les 50 premiers cm et une podzolisation marquée surtout lorsque le drainage s'améliore comme dans la lande mésophile et surtout sèche (alios, garluche). Dans la FP de Silva rétro-littorale drainée s'imisce de grands îlots de FP d'Ager drainés, irrigués, fertilisés, amendés et centrés sur la production de maïs grain dont le rendement peut dépasser les 10 t/ha. La FP d'Ager comporte aussi des HP de cultures légumières. Outre le drainage par

les crastes, les HP de silva en pinède reçoivent une fertilisation phosphatée et affichent une productivité moyenne estimée à 12 m<sup>3</sup>/ha/an, inscrite dans un intervalle de 7 à plus 16 m<sup>3</sup>/ha/an. Ses filières sont le bois d'œuvre et de chauffe ainsi que la pâte à papier ou le charbon actif. La taille critique pour vivre uniquement de revenus forestiers serait d'environ 400 ha. La Silva de pins rétro-littorale se mue en galeries de feuillus en bordure des cours d'eau. Les facettes de Urbs sont également distribuées de même que Aqua entre le littoral océano-lacustre et le plateau rétro-littoral. Ces deux ensembles géomorphologiques peuvent être considérés comme les deux EP constitutives de la région naturelle aussi identifiés par POTTIER (op. cit.). Leur spécificité est cependant basée non seulement sur des traits géomorphologiques et géographiques mais aussi sur des traits agropédologiques, sociologiques et urbanistiques. Les IP de chacune de ces 2 EP peuvent émerger avec des phénotypes propres selon la volonté des acteurs et parties prenantes de gérer des communs potentiels.

## 2.6. Discussion

Le cadre de la paysagénie se base d'abord sur une métaphore avec la biologie évolutive mettant en œuvre l'interaction entre génotype et phénotype au niveau d'une instanciation paysagénique (IP), et entre génome et phénotype au niveau d'une espèce paysagénique (EP). L'identification des caractères phénotypiques locaux des sept types de "communs potentiels" ou facettes paysagéniques (FB) de Ager, Saltus, Silva, Urbs, Hortus, Aqua et Desertum est une première étape essentielle à l'adoption du modèle envisagé. A cet égard l'identification des acteurs et des parties prenantes est essentielle. S'il faut distinguer plusieurs FP d'un même type, la question se pose aussi de différencier soit plusieurs IP, soit plusieurs EP. Toutes les IP d'une EP ne se composent pas nécessairement des sept catégories de FP. Ainsi de très grands territoires urbanisés, forestiers, de savanes, de prairies, de steppes ou de déserts peuvent être exempts de l'une ou plusieurs autres FB.

La représentation cartographique et sa mise à jour régulière à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) sont préconisées pour offrir un outil aisé de gestion des communs potentiels et suivre ainsi leur auto-organisation par les acteurs ou parties prenantes. L'intervention de chercheurs-développeurs de plusieurs branches disciplinaires est nécessaire pour élaborer un tel outil dans sa conception informatique et dans l'identification des "traits de caractères" de chaque IP et EP en accord avec les acteurs locaux. Ces derniers constituent la charpente sociale des communs potentiels au niveau du cadre de vie qu'ils doivent reconnaître avec les frontières de l'IP correspondante. Les traits de cette charpente sociale locale ne définissent pas à eux seuls le génotype s'ils ne sont pas associés en réseau avec d'autres traits de caractères identifiés par d'autres branches disciplinaires (agronomie, géographie, paysagisme, urbanisme, etc.). Les traits génotypiques définissent un ou plusieurs holons paysagéniques (HP) d'une FP. Il s'agit donc de considérer l'ensemble des savoirs et savoir-faire disciplinaires et d'en extraire, sélectionner, traduire et signifier ceux qui peuvent participer aux traits génotypiques des HP constitutifs des FP dans chaque IP et EP. La pertinence des réseaux de traits génotypiques retenus devrait pouvoir être estimée par analyse statistique grâce à l'outil SIG. La démarche paysagénique devient alors une R&D transdisciplinaire, participative et collaborative avec les acteurs locaux. L'EP peut être comparée au concept d'unité paysagère adopté dans l'élaboration des atlas départementaux de France ainsi qu'à celui de territoire paysager des atlas de Wallonie en Belgique. L'EP présente toutefois un plus grand nombre de dimensions topologiques.

La paysagénie peut donc offrir un cadre conceptuel avancé de coopération interdisciplinaire. Un modèle explicatif et de prospective peut alors être élaboré tant pour des démarches publiques que privées d'innovations ou de mutations territoriales. L'adoption d'une éthique de participation et d'approbation des acteurs et parties prenantes en serait un gage de succès.

## 3. L'aluminisation des sols

### 3.1. Régimes écoclimatiques de pédogenèse

D'importants traits génomiques se différencient dans les sols des holons paysagéniques (HP) sous l'action des anthrobiotes et selon les interactions écoclimatiques variables entre les divers compartiments de l'écosphère tels qu'illustrés à la [figure 2.4](#) du point précédent. Si la dynamique présidant à l'évolution des sols est généralement lente, de l'ordre de milliers ou de plusieurs dizaines de milieu d'années, les traits qui se développent par pédogenèse en sont normalement d'autant plus stables dans la durée. Il arrive cependant que certains processus ne se déroulent qu'en quelques dizaines ou centaines d'années sous l'influence de pulsations climatiques ou de d'aménagement et de pratiques agricoles tels que le drainage, l'irrigation et la fertilisation, voire dans certains cas particuliers en quelques jours seulement (drainage des sols sulfatés acides potentiels). Selon les trajectoires suivies, des espèces paysagéniques (EP) variées seront développées dans lesquelles le processus d'aluminisation des sols s'intégrera ou non. VAN BREEMEN et al. (1983) distinguent trois grands régimes écoclimatiques pour définir l'orientation des grandes trajectoires génomiques tracées par la pédogenèse.

#### 3.1.1. Régime de terre haute aride et semi-aride

Un premier régime est celui des HP de terre haute aride et semi-aride. Il est marqué par une prédominance de l'évapotranspiration sur les précipitations ainsi que par de bonnes conditions de drainage. Sont assimilées à des terres hautes des terrasses de sédiments fluviaux plus ou moins anciens et qui sont surélevées par rapport aux berges actuelles du cours d'eau de telle sorte que la zone vadose dépasse deux mètres. La zone vadose est définie par l'épaisseur qui sépare la surface du sol du sommet d'une nappe phréatique en toute période de l'année. Le sol de terrasses de terre haute peut comporter des traces d'hydromorphie fossiles dans la zone vadose, ces terrasses seront considérées également comme terres hautes. Dans le régime considéré, le bilan entre apports et exports d'éléments minéraux dans le sol tend vers un excédent positif, c'est-à-dire vers une accumulation. Les apports minéraux proviennent des eaux de ruissellement d'amont, des précipitations ou de l'eau d'irrigation. Si les cations divalents ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) dominent les monovalents ( $\text{Na}^+$ ), ils précipitent sous forme de carbonates et le pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ) demeure sous 8,5. Si par contre le cation alcalin sodique domine, le carbonate de sodium précipite et le pH peut s'élever au-dessus de 9. Ce cas dernier peut se produire en cas d'irrigation avec une eau non appropriée. Aucune aluminisation des sols ne se produit dans un tel régime.

#### 3.1.2. Régime de terre basse à hydromorphie actuelle

Le deuxième régime est celui des HP de terre basse à hydromorphie actuelle, temporaire ou permanente. Il concerne aussi les sédiments actuels des HP amphibies d'Aqua de mangroves littorales.

##### *Terre basse à hydromorphie temporaire*

Des phases aérobies et anaérobies se succèdent en hydromorphie temporaire. Un tel régime provoque un enchaînement de réactions d'oxydation et de réduction. Les réactions de réduction génèrent des composés réduits avec des ions tels que le fer ferreux  $\text{Fe}^{2+}$  et les sulfures  $\text{S}^{2-}$ , tandis que les réactions d'oxydation génèrent le fer ferrique  $\text{Fe}^{3+}$  et des sulfites ou sulfates. Cette alternance régulière peut cependant induire des réactions d'alcalinisation ou d'acidification marquée du compartiment des sols dans les HP selon le degré de confinement hydrologique. Dans les milieux confinés continentaux formant des bassins hydrologiques clos, la réduction des sels sulfatés concentrés sous climat semi-aride à aride d'une part, et la décomposition microbienne des matières organiques d'autre part, génèrent des sulfures et du gaz carbonique qui se dissout en bicarbonates et carbonates durant la phase d'hydromorphie. En phase sèche, les sulfures peuvent s'évacuer par volatilisation ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ainsi que le gaz carbonique des bicarbonates. Ce n'est pas le cas des carbonates qui précipitent d'abord avec

les cations divalents ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ). Puis, lorsque le pH augmente, parallèlement à la concentration en sels, le carbonate de sodium précipite à son tour: c'est la formation de sols salés à alcalis tels que décrite par CHEVERRY (1969) sur les rives Nord du lac Tchad. JANITZKY & WHITIG (1964), cités par VAN BREEMEN et al. (op. cit.) en ont reconstitué les mécanismes au laboratoire, en référence aux sols salés de la vallée de Sacramento en Californie. Ces derniers auteurs font explicitement intervenir la décomposition microbienne anaérobie de la matière organique et la présence de sulfates de sodium. De tels processus biogéochimiques d'alcalinisation sont également hors de tout contexte d'aluminisation des sols. Ils se situent dans la trajectoire inverse de leur acidification.

#### *Terre basse à hydromorphie permanente*

Une trajectoire d'acidification peut être suivie par rupture d'un régime d'hydromorphie permanente en cas de drainage de HP de Aqua lors de l'aménagement rizicole des mangroves par exemple ou de celui des HP à sols hydromorphes des basses terres fluvio-maritimes.

### 3.1.3. Régime de terre haute en climat humide ou sub-humide

Enfin, une trajectoire d'acidification est aussi prise sous le troisième régime écoclimatique de la pédogenèse cité par VAN BREEMEN et al. (op. cit.), à savoir celui des terres hautes bien drainées où les précipitations excèdent l'évapotranspiration.

## *3.2. Trajectoires paysagéniques d'acidification des sols*

Les trajectoires d'acidification des sols sont celles prises par les terres hautes ou basses sous climat humide et sub-humide. En terre basse et même sous climat aride ou semi-aride des sols de HP de facettes de Ager, Saltus, Silva ou Aqua peuvent également s'acidifier. Si les terres hautes sont bien drainées, en terres basses l'eau stagne en surface ou à faible profondeur pour former des HP humides dans les FP (facettes paysagères).

L'épaisseur de la zone vadose peut donc atteindre plusieurs mètres (au moins deux par convention) ou décimètres en terre haute. Par contre, en terre basse, l'épaisseur de la zone vadose peut varier de nulle en période de crue à quelques décimètres ou mètres en période d'étiage. Si les terres basses des FP continentales subissent un drainage dans le sens du profil longitudinal des dépressions où s'écoulent les eaux de surfaces (HP de Aqua), elles ne sont pas confinées du point de vue hydrologique. Dans le cas inverse d'un confinement hydrologique, les HP présentent un faciès d'Aqua au moins durant une certaine période de l'année. Sans confinement, le drainage des terres hautes et basses s'effectue naturellement par les cours d'eau d'Aqua. La figure 3.1 illustre les deux grands types de terre en zone non confinée.



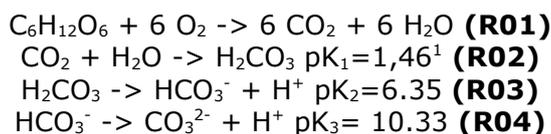
*Figure 3.1: Terre haute et basse sous climat humide tropical. HP de Ager sur colline et en marais billonné à Kitabi en région d'altitude au Rwanda (Photo: Hermann PFEIFFER)*

Deux types principaux de réactions génèrent régulièrement des protons dans le sol des HP bien drainés de terre haute: la respiration racinaire et microbienne et la nitrification de l'ammonium par les bactéries du genre *Nitrosomonas*. La nitrification se prolonge par la nitrification par les bactéries du genre *Nitrobacter*. Ces réactions se produisent également en terre basse, mais à vitesse plus lente. Dans certains HP de terre basse, dans les sédiments de Aqua tels que les fonds des mares et des cours d'eau ainsi que dans ceux des alluvions et sédiments fluvio-maritimes une accumulation de sulfures d'origine bio-organique et/ou minérale (eau de mer) et de fer ferreux (II) peuvent être par ailleurs une importante source d'acidification en cas de drainage ou de poldérisation: ce sont les réactions d'oxydation des sulfures fer (pyritiques) et de la ferrollyse.

Les traits physico-chimiques et topo-hydrologiques des sols ou sédiments des FP vont déterminer significativement les processus dominants des EP de l'écosphère et les trajectoires d'acidification. Il est important de tenir compte que ces processus se déroulent dans des systèmes ouverts ou semi-ouverts (confinement hydrologique) que constituent les HP et que les réactions chimiques et biochimiques auxquelles ils se réfèrent n'atteignent dès lors que des équilibres stationnaires temporaires. Les éventuelles constantes d'équilibre ne seront donc données qu'à titre indicatif de tendances.

### 3.2.1. Respiration racinaire et microbienne

La respiration racinaire et microbienne produit du dioxyde de carbone qui se dissout en acide carbonique dans l'eau du sol. La dissociation de cet acide faible produit des protons. Les réactions s'enchaînent comme suit:



Les valeurs de  $\text{pK}_1$ ,  $\text{pK}_2$  et  $\text{pK}_3$  sont celles fournies par BOLT & BRUGGENWERT (1976) à 25°C. L'eau de pluie contient du gaz carbonique dissous sous forme de  $\text{H}_2\text{CO}_3$  et  $\text{HCO}_3^-$  à un pH de 5,6. Il correspond à une pression partielle en  $\text{CO}_2$  de 0,3 millibars<sup>2</sup> (0,03%, 300 ppm) d'après les auteurs précités alors que dans l'eau du sol cette pression partielle peut s'élever jusqu'à 100 millibars (10% ou 100.000 ppm) sous le chevelu racinaire. La réaction R04 peut être négligée dans des conditions acidifiantes en l'absence de minéraux carbonatés dans le sol. Dans un tel système simplifié  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ , comportant un flux respiratoire régulier de dioxyde de carbone (système ouvert), les réactions chimiques R01 à R03 permettent d'établir la relation suivante entre le pH de l'eau du sol et la pression partielle en gaz carbonique ( $\text{pCO}_2$ ):

$$\text{pH} = 3,9 - 0,5 \log \text{pCO}_2$$

La figure 3.2 en reproduit le graphique.

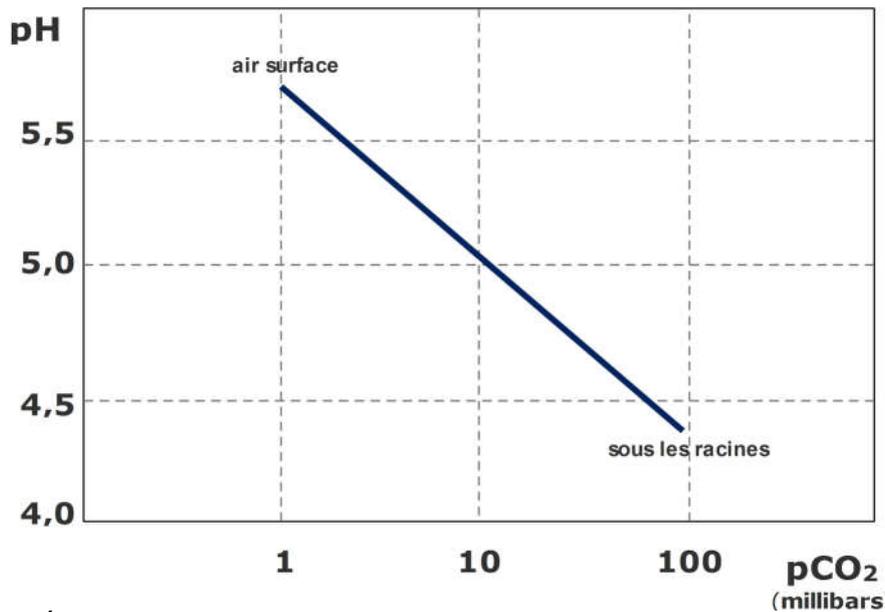
En cas de présence de minéraux carbonatés (calcaire, dolomie, etc.), ces derniers vont progressivement être dissous par la respiration hypogée et évacués par lessivage (système ouvert). Un ordre de grandeur de l'intensité de cette respiration dans le sol est déduit selon une revue bibliographique de SINGH et GUPTA (1977): 10 à 40 t/ha/an de  $\text{CO}_2$ . D'autres mesures effectuées dans une FP de Silva sous climat tempéré humide, publiées par THIERRON et LAUDELOUT (1996), rapportent des valeurs plus élevées: 70 t/ha/an dont 90% d'origine racinaire.

Les pressions partielles en  $\text{O}_2$  et  $\text{N}_2$  du sol vont s'amenuiser en profondeur au profit de celle en  $\text{CO}_2$  qui pourra s'élever jusqu'à 100 millibars. Dans la nappe phréatique, le  $\text{CO}_2$  dissous ( $\text{H}_2\text{CO}_3$

1  $\text{pK} = -\log K$ , ainsi si  $\text{pK} = 1,46$ , alors  $K = 10^{-1,46}$

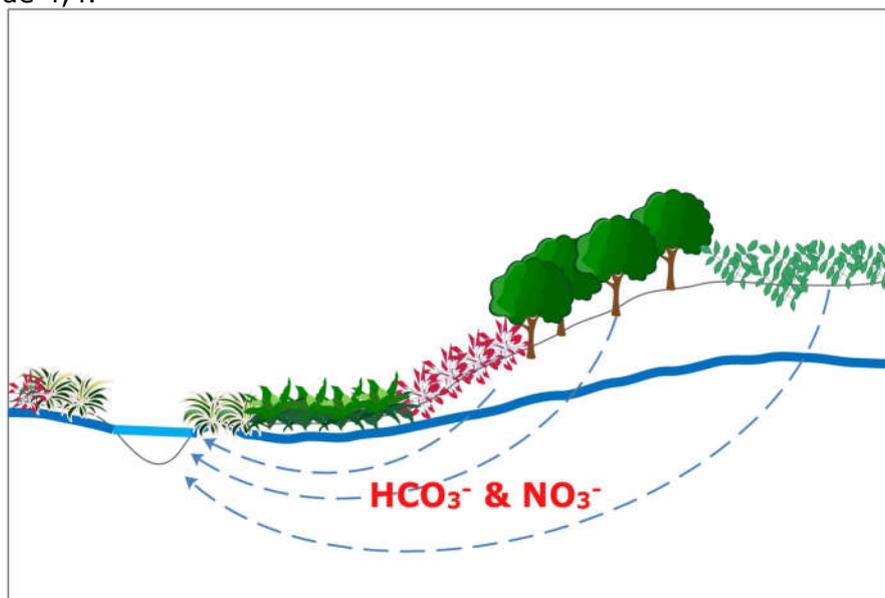
2 A la pression de 1 atmosphère correspond à peu près 1 bar, soit 1 kg/cm<sup>2</sup>, soit une colonne d'une hauteur de 10 m ou 1.000 cm d'eau sur 1 cm<sup>2</sup>, ce qui représente 1.000 cm<sup>3</sup>. Dès lors, 0,3 cm<sup>3</sup> dans cette colonne ou cette unité "atmosphère" en représentent une hauteur de 0,3 cm ou 0,03 % ou 300 ppm ou 0,3 millibars de pression partielle. 10% sont équivalents à 100 millibars ou à 100.000 ppm.

et  $\text{HCO}_3^-$ ) vont être transférés vers la rivière de AQUA qui draine le bassin versant selon le schéma de la [figure 3.3](#). A ce moment, le  $\text{CO}_2$  dissous va se remettre en équilibre avec sa pression partielle atmosphérique qui est beaucoup plus faible (0,3 millibars). Il en résulte un dégazage et donc une émission dans l'atmosphère par inversion du sens de la réaction R02.



*Figure 3.2: Évolution du pH de l'eau du sol en fonction de la pression partielle en gaz carbonique générée par la respiration racinaire et microbienne en l'absence de carbonates précipités (système simplifié)*

BORGES et al. (2015a) rapportent des valeurs de  $p\text{CO}_2$  dans l'eau des rivières de 12 bassins versants d'Afrique subsaharienne. Ces valeurs sont comprises dans un intervalle de 300 à 16.942 ppm pour une moyenne générale de 6.415 ppm, ce qui est toujours bien supérieur aux 300 ppm de l'eau pluviale. Les teneurs sont plus élevées dans les petits tributaires (largeur < 100m) que dans les grands (largeur > 100m), ce qui est compatible avec un dégazage d'amont en aval. Il existe cependant de nouveaux apports par la décomposition des matières organiques en suspension issues des HP de terres basses hydromorphes. Ces dernières font qualifier les eaux du fleuve Congo de "noires" avec une acidité qui varie de pH 3,6 à 5,9 avec une moyenne de 4,4.



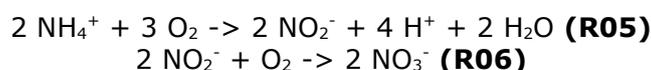
*Figure 3.3: Transferts de l'eau du sol et de ses anions issus de la biorespiration hypogée et de l'oxydation biologique de l'azote du sol vers une rivière par drainage de nappe souterraine*

Dans une autre publication, BORGES et al. (2015b) comparent des données de pression partielle en CO<sub>2</sub> des deux plus larges fleuves tropicaux que sont l'Amazone (n=136) et le Congo (n=280). Des fourchettes respectivement de 0,070 à 16,880 millibars et de 1,09 à 22,9 millibars sont observées. Une contribution significative des HP des basses terres humides est diagnostiquée mais elle n'a pas pu être quantifiée.

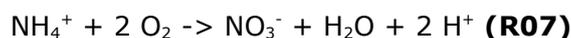
FUJII et al. (2012) décrivent et détaillent les divers processus d'acidification des sols. Ils précisent aussi que la vitesse d'acidification est proportionnelle à la production primaire nette et en donnent un ordre de grandeur comprise en 0,004 et 0,010 mol<sub>c</sub> de proton par mole de carbone organique produite.

### 3.2.2. Nitritation de l'ammonium

La nitrification autotrophe est une oxydation biologique de l'ammonium en nitrate qui est évacué par drainage (figure 3.3). Elle se décompose en deux phases successives, la nitritation ou nitrosation par des bactéries du groupe *Nitrosomonas* puis la nitratisation par des bactéries du groupe *Nitrobacter* (DOMMERSGUES et MANGENOT, 1970). Les deux réactions s'écrivent comme suit:



et donc globalement:



Il en résulte une production de deux protons par molécule d'ammonium oxydée en nitrate. Plusieurs sources sont reconnues pour les apports d'ammonium au sol: la minéralisation de la matière organique, les engrais azotés et les eaux pluviales.

#### *Apports d'ammonium par minéralisation de la matière organique*

L'ammonium peut provenir de la minéralisation de la matière organique du sol et plus précisément de l'ammonification des protéines par désamination microbienne (R08):



et l'ammoniac se dissout dans l'eau pour former l'ammoniaque qui se dissocie en ammonium:



La dissociation de l'ammoniaque est faible mais elle est favorisée dans le sol par l'absorption de l'ammonium par les plantes, son adsorption sur le complexe d'échange du sol et par sa nitrification (R07) dont l'effet acidifiant est ainsi atténué par l'OH<sup>-</sup> de dissociation (R09).

#### *Apports d'ammonium par les engrais azotés*

L'ammonium peut aussi être apporté par des engrais comme le sulfate d'ammonium dont l'effet acidifiant est bien connu. Pour l'urée, par contre, DOMMERSGUES et MANGENOT (op. cit.) mentionnent une hydrolyse par l'enzyme uréase qui produit de l'ammoniac et du gaz carbonique après un stade intermédiaire de carbamate:



C'est une réaction plutôt alcaline puisque deux molécules de NH<sub>3</sub> sont produites et donc 2 OH<sup>-</sup> (R09) par molécule d'urée. Par contre, la nitrification ultérieure de l'azote et l'accroissement de la pression partielle en gaz carbonique sont bien acidifiants comme vu précédemment. Des effets acidifiants de l'urée à long terme ont été ainsi mis en évidence par LUNGU & DYNODT (2008).

### Apports d'ammonium dans les eaux pluviales

L'ammoniac atmosphérique provient notamment de sa volatilisation à partir d'excréments d'animaux sauvages ou d'élevage et lors de l'application d'engrais sous forme d'urée. Au Congo, MEYER et DUPRIEZ (1959) ont observé un apport de 2,9 kg/ha/an d'azote ammoniacal. BRINKMANN (1983) rapporte lui une valeur de 1,8 kg/ha/an dans une forêt amazonienne. VAN MIEGROET & COLE (1985) mesurent un apport de 1,5 kg/ha/an dans un site forestier sous climat tempéré océanique à 56 km au SE de Seattle. Plus récemment, HUANG et al. (2014) citent près de 10 kg/ha/an dans le bassin versant forestier de Fengxingzhuang en Chine subtropicale.

### 3.2.3. Oxydation des sulfures de fer

VAN BREEMEN et al. (op. cit.) situent une importante production possible de sulfures de fer dans les sédiments marins littoraux et les estrans ou battures. Ils y sont produits par réduction des sulfates de l'eau de mer et s'accumulent sous forme de pyrite (FeS<sub>2</sub>) dans les sédiments et les sols durant plusieurs siècles. De tels matériaux de HP fluvio-maritimes sont désignés sous le terme de "sols sulfatés acides potentiels" en cas de drainage ou de poldérisation.

SHAMSHUDDIN et al. (2004) précisent aussi que la formation de pyrite exige la présence de Fe<sup>3+</sup>, de matière organique et de micro-organismes. Ces derniers sont des bactéries sulfato-réductrices dont GARCIA et ROGER (2000) soulignent la remarquable "*capacité à utiliser les composés minéraux du soufre comme accepteurs d'électrons pour l'oxydation des composés carbonés*". Ces deux derniers auteurs parlent ainsi de "*respiration des sulfates*" dans les "*biotopes riches en matière organique, tels que le fond des mares, étangs, cours d'eau, dans les sédiments fluvio-marins, les zones d'estuaire*". Dans de telles conditions anaérobies, ils attribuent à la microflore sulfato-réductrice près de 50% de la décomposition de la matière organique avec production de sulfures.

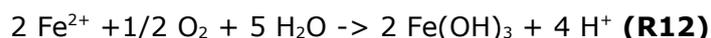
En cas de drainage des "sols sulfatés acides potentiels", la réaction d'oxydation de la pyrite est présentée comme suit d'après SHAMSHUDDIN et al. (2004, op. cit):



Ces auteurs observent une chute de pH de 6 à 3 au laboratoire avec un échantillon de l'horizon Cg (matériau parental hydromorphe) d'un "sol sulfaté acide potentiel" (après 2 semaines d'incubation) et qui se maintient à ce niveau pendant toute la durée d'expérimentation de 6 semaines. Pour l'exondation prolongée des mangroves à palétuviers du domaine fluvio-marin de basse Casamance au Sénégal, MOUGENOT et al. (1990) indiquent une forte et brutale acidification des sols, à savoir de pH 7 à pH < 3 en quelques jours. Ces auteurs estiment que ce processus est irréversible.

### 3.2.4. Ferrolyse

Le fer (II) réduit est constitutif de nombreux minéraux primaires et y joue ainsi un rôle primordial dans leur altération. CHURCHMAN & LOWE (2012) indiquent qu'il est facilement oxydé en Fe(III) lorsque le sol s'assèche, par exemple à la suite de la réaction d'oxydation de la pyrite (**R11**). Il en résulterait des déséquilibres de charge facilitant son hydrolyse. Le fer précipiterait ensuite sous forme d'oxydes ou d'hydroxydes secondaires dont il existe des formes amorphes ou nanocrystallines persistantes. Ce phénomène est connu sous le terme de "ferrolyse". ESPIAU et PEDRO (1983) ont étudié expérimentalement la phase d'oxydation du fer ferreux qu'ils schématisent par la réaction suivante:



La ferrolyse sera réexaminée dans le cadre de l'aluminisation proprement-dite.

### 3.2.5. Acidifications observées à divers niveaux d'échelle

A l'échelle de deux HP (holons paysagéniques) d'une même FP, VAN MIEGROET & COLE (op. cit.) comparent deux plantations contiguës d'essences forestières, l'une d'aulne rouge (HP n°1,

red alder, *Alnus rubra*) et l'autre du sapin Douglas (HP n°2, Douglas-fir, *Pseudotsuga menziesii*) sur un même sol forestier acide initial. Les deux HP ont en effet un passé forestier identique et sont différenciées par l'essence du peuplement depuis 50 ans. La plantation d'aulnes est riche en azote, ce qui peut être attribué à sa capacité fixatrice d'azote atmosphérique par actinorhizes racinaires avec *Frankia* (actinomycète) tandis que celle de sapins est pauvre en azote. Une acidification plus prononcée du sol s'observe sous aulnes (pH de 4,8) par rapport aux sapins (pH de 5,2). Les résultats des teneurs en azote du sol confirment la richesse relative des deux plantations et son influence manifeste sur les effluents d'eau du sol mesurés en 1981 et 1982. Les nitrates dominent très largement les bicarbonates sous aulnes tandis qu'ils restent absents sous sapins. Près de 99% des protons d'origine interne ou externe sont neutralisés dans le sol superficiel dans les deux plantations avant 30 cm de profondeur, ce qui souligne le pouvoir tampon du sol sur le court terme pédogénétique d'un demi-siècle seulement.

Dans des FP de Silva aux Etats-Unis d'Amérique (forêts tempérées), suite à des coupes à blanc une production protonique par nitrification est rapportée par FUJII et al. (op. cit.) de l'ordre de 11 kmol<sub>e</sub>/ha/an. Des valeurs plus élevées sont évoquées par ces auteurs pour la déforestation amazonienne. Les mêmes auteurs signalent aussi que la conversion agricole des terres forestières provoque un bilan protonique net positif par minéralisation de la matière organique et la nitrification subséquente au niveau de l'horizon humifère Ap (voir leur fig. 8b). Si le déficit en carbone organique atteint 20% par rapport au couvert "naturel", SANCHEZ et al. (2003) attribuent une pénalité à la fertilité potentielle du sol (symbole "m").

A une échelle mondiale de toutes les EP (espèces paysagéniques), BRUNNER & SPERISEN (2013) présentent en synoptique trois cartes relatives respectivement aux pH des sols acides (pH de 4,6 à 5,5) et très acides (pH inférieur à 4,5) en surface de 0 à 30 cm (leur fig. 1A), aux pH des sols acides et très acides en profondeur de 30 à 100 cm (leur fig. 1B) et à la densité de couverture forestière (leur fig. 1C). Il est remarquable d'y observer la correspondance entre les zones forestières denses tropicales, tempérées ou boréales de la planète et les sols acides. De plus, il apparaît également que les sols forestiers paraissent plus acides en surface qu'en profondeur, du moins au niveau tropical ou équatorial. Mais l'acidité des sols n'est pas l'apanage de Silva car elle déborde largement dans les savanes arborées de Saltus. La très faible échelle de ces données mondialisées produit ainsi une sorte de schéma cartographique. Il se révèle en bonne conformité avec la dynamique des processus d'acidification d'origine biologique passés en revue.

### 3.3. Trajectoires paysagéniques d'aluminisation des sols

Il existe deux conceptions complémentaires du processus d'aluminisation des sols qui ont en commun l'environnement acide dans lequel elle se déroule. La première est l'aluminisation minéralogique telle qu'utilisée par LANSON et al. (2015) ou VIENNET (2015). La seconde est l'aluminisation physico-chimique telle qu'utilisée par DUFFEY (2002). Les deux conceptions s'adressent aux fractions fines et colloïdales des sols. L'aluminisation minéralogique se marque par l'hydrolyse acide de l'aluminium des minéraux du sol et sa fixation dans les feuillets expansibles d'argiles comme la vermiculite ou la montmorillonite sous forme d'hyxo-polymères pour former des minéraux hydroxy-alumineux et interstratifiés à divers degrés de régularité. La conception physico-chimique se base sur le comportement compétiteur très puissant de la forme cationique monomère de l'aluminium [Al<sup>3+</sup> ou Al(OH)<sup>2+</sup>] pour les sites d'échange cationique des argiles ainsi que sur son pouvoir de complexation des sites d'échange organiques. L'aluminisation se déroule dans la continuité des trajectoires d'acidification des sols et aussi dans celles de leur pédogenèse aux niveaux intimes micro- et nanométriques.

#### 3.3.1. Hydrolyse acide des minéraux primaires

La paysagénie territoriale ne prend son sens qu'à partir du moment où des organismes vivants colonisent un territoire ou le traversent en y laissant des traces. Son fait le plus significatif est la naissance d'un sol. Elle se produit dès la colonisation de la roche mère dure ou meuble par des organismes vivants en surface tels que microbes, lichens, mousses, plantes, insectes, etc. Cette colonisation déclenche et développe les cycles du carbone et de l'azote puisés notamment dans l'atmosphère ainsi que simultanément les cycles du phosphore, du

potassium, du soufre et de quasi tous les éléments minéraux extraits par hydrolyse du régolithe embryonnaire, qu'il soit autochtone ou allochtone. L'hydrolyse acide se marque au fil du temps par ce que WYNS et al. (2014) désignent comme une altération soustractive au niveau du régolithe. CHURCHMAN & LOWE (op. cit.) n'évoquent pas les réactions biologiques de la respiration racinaire et microbienne ni même ceux de la nitrification dans l'hydrolyse des minéraux primaires. Ils font allusion cependant à un environnement acide aux niveaux des surfaces colloïdales argilo-humiques des sols en cours de pédogenèse. La formation du régolithe par l'altération soustractive produit également des macro-, méso- et micro-pores en plus des minéraux secondaires argileux (argilisation) et des oxydes et hydroxydes également secondaires (Fe, Al, Mn, etc.). Du point de vue minéralogique, le profil d'altération typique va concentrer en surface les éléments les moins solubles dans les minéraux secondaires transformés ou néoformés et les minéraux primaires résistants à l'hydrolyse tandis qu'en profondeur la composition minéralogique se rapproche de celle de la roche-mère géologique (minéraux primaires). La progression verticale de la porosité est essentielle à la rétention et au drainage de l'eau du sol en formation. CHADWICK & CHOROVER (2001) précisent ainsi que les flux hydriques conditionnent la trajectoire évolutive de l'altération des sols. Ils illustrent ce fait par une climoséquence à Hawaï dans une même coulée de lave de 170.000 ans d'âge sur une longue distance au travers d'un gradient pluviométrique allant de 160 à 3.000 mm/an. Ils y observent que la limite pluviométrique annuelle de  $P=1.400$  mm correspond à un seuil de lessivage du profil sur 1 m de profondeur. Au-delà de ce seuil, il apparaît une désaturation en cations dits "de base",  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  et  $Na^+$ , dans toute cette épaisseur. En-deçà, le lessivage ne produit ses effets qu'à moins de 1 m, c'est-à-dire qu'une redistribution verticale des cations s'opère et n'induit donc qu'un lessivage limité. Les auteurs concluent que c'est l'humidité effective qui favorise l'acidification du profil plutôt que la durée ou le temps à partir de ce seuil. Le seuil de 1.4000 mm/an n'a qu'une valeur contextuelle: il peut varier en fonction notamment de l'âge et du type de roche-mère des sols. Les concepts repris dans l'[encadré 3](#) sont utilisés par ces auteurs pour définir ce seuil en termes plus universels de rapport entre la profondeur d'humidification effective (V) et la porosité effective ( $V_0$ ).

***Encadré 3. Concepts d'humidité effective et de porosité effective utilisés par CHADWICK & CHOROVER (2001)***

Humidité annuelle effective (du sol) =  $P - ETP$  (ETP: évapotranspiration potentielle)  
 Profondeur d'humidification effective = V (sur base humidité annuelle effective)  
 Porosité totale = [microporosité + mésoporosité + macroporosité] sur 1 m de profondeur  
 Porosité effective =  $V_0$  = [porosité totale - microporosité] sur 1 m de profondeur  
 Microporosité = %eau volumique à 15 bars (1.500 kPa) sur 1 m de profondeur  
 Si  $V/V_0=1$ , alors il y a juste assez de P pour remplir tous les mésopores et macropores sur une base annuelle. Lorsque  $V/V_0=2$ , tous les méso- et macropores auront été complètement rincés (remplis 2 fois/an).

Quelques minéraux primaires ou pseudo-primaires représentatifs au départ d'une trajectoire ou d'une nouvelle trajectoire pédogénétique sont brièvement décrits dans le [tableau 1](#) d'après des données de CHURCHMAN & LOWE (op. cit.).

A partir des compositions chimiques de l'échantillon reproduit dans le [tableau 1](#), les origines des nutriments minéraux que sont les cations de base, le phosphore et le soufre dans les sols sont ainsi illustrées de manière non exhaustive. Les éléments minéraux les plus abondants constitutifs de la charpente solide des sols sont le silicium, l'aluminium et le fer. Les minéraux primaires comme tels sont considérés comme une réserve de minéraux altérables des sols. Elle en constitue un indicateur du degré d'évolution. Il va de soi que lors de tout mouvement vertical ou latéral d'éléments minéraux ou organiques dissous, les cations "donnent la main" à des anions parmi lesquels les nitrates et les bicarbonates au premier chef.

### 3.3.2. Argiles et produits d'altération

L'altération chimique de la roche mère combine des réactions de dissolution et d'hydrolyse des minéraux primaires. Les produits solides résiduels d'une dissolution sont de même nature qu'avant la réaction lorsque la dissolution est incomplète, tandis qu'ils diffèrent des composés

initiaux en cas d'hydrolyse. Les produits d'hydrolyse sont qualifiés de minéraux secondaires et comprennent des minéraux amorphes et des argiles plus ou moins bien cristallisées. L'argilisation est un processus majeur associé à l'hydrolyse des minéraux primaires qui peut s'étendre à son tour aux minéraux secondaires par agradation et dégradation. CHURCHMAN & LOWE (op. cit.) signalent par exemple les produits successifs d'altération d'un groupe typique de minéraux primaires tels que reproduits dans l'encadré 4.

*Tableau 1. Quelques minéraux primaires ou pseudo-primaires représentatifs*

Groupe	Nom	Composition	Remarque
tectosilicates	quartz	SiO <sub>2</sub>	omniprésent
	orthose, albite	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> , NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	feldspaths alcalins
	plagioclases	Na <sub>x</sub> Ca <sub>y</sub> AlSi <sub>z</sub> O <sub>8</sub>	feldspaths calco-sodiques
phyllosilicates	muscovite	KAl <sub>2</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	mica, dioctaédrique
	biotite	K(Mg,Fe <sup>II</sup> ) <sub>3</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	mica, trioctaédrique
	chlorite	(Fe,Mg,Al) <sub>6</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	métamorphisme faible
	antigorite	Mg <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	serpentine
inosilicate	hornblende	(Ca,Na) <sub>2,3</sub> (Mg,Fe,Al) <sub>5</sub> (Si,Al) <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	amphibole
	augite	(Ca,Na)(Mg,Al,Fe)(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	pyroxène
nésosilicate	forstérite	Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	olivine
cyclosilicate	tourmaline	(Na,Ca)(Li,Mg,Al)(Li,Fe,Mn) <sub>6</sub> (BO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> (OH) <sub>4</sub>	rare
phosphate	wavellite	Al <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH,F) <sub>3</sub> .5H <sub>2</sub> O	sédiments marins
carbonate	calcite	CaCO <sub>3</sub>	plutôt soluble
	dolomite	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	plutôt soluble
sulfate	gypse	CaSO <sub>4</sub>	très répandu
oxyde de fer	magnétite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	ubiquiste
sulfure de fer	pyrite	FeS <sub>2</sub>	sédiments littoraux

*Encadré 4. Exemple de produits d'altération successifs par hydrolyse des olivines, pyroxènes et amphiboles d'après CHURCHMAN & LOWE (op. cit., 2012)*

olivines pyroxènes amphiboles	---- - Mg <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , (Mn <sup>2+</sup> ) ---->	serpentine, chlorite, et/ou talc	smectite (trioctaédrique), + goethite, saponite
-------------------------------------	--	--	---

### *Développement du complexe adsorbant ou d'échange*

L'argilisation permet au sol d'acquérir des traits simples ou en réseaux tels que:

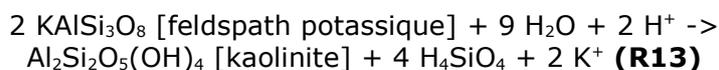
- des liaisons avec l'humus pour former le complexe argilo-humique,
- le développement d'une capacité d'échange cationique ou "CEC",
- l'accroissement considérable de la surface spécifique.

Une CEC plus élevée permet de retenir plus de cations à la surface du complexe adsorbant ou d'échange. Les charges négatives peuvent être permanentes ou variables en fonction du pH. Les permanentes résultent de substitutions isomorphiques dans les couches octaédriques ou tétraédriques des aluminosilicates. Les variables en fonction du pH se localisent d'une part sur les surfaces de minéraux hydroxylés ou oxy-hydroxylés à caractère cristallin ou amorphe et d'autre part sur les groupements carboxyl et hydroxyl de l'humus. Les charges variables peuvent aussi devenir positives sous certaines conditions physico-chimiques (pH) et minéralogiques (oxydes et oxyhydroxydes), auxquels cas se développe une capacité d'échange anionique (pH en-dessous du point de charge nulle).

### *Pouvoir tampon contre l'acidification*

Il a déjà été signalé que la présence de carbonates constituait un pouvoir tampon contre l'acidification du fait de leur dissolution. CHADWICK & CHOROVER (op. cit) font une analogie

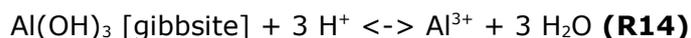
entre une hydrolyse et une réaction acide-base ou les minéraux primaires d'abord et secondaires ensuite constituent aussi un pouvoir tampon qu'ils désignent par "ANC" (Acid Neutralizing Capacity). Ils adoptent une analogie similaire pour les minéraux primaires mais où le pouvoir tampon est assuré en quelque sorte par des sels d'acide silicique ( $H_4SiO_4$ ) et du cation approprié correspondant. L'exemple suivant illustre cette capacité de réduire ou ralentir l'acidification par hydrolyse des minéraux primaires:



### *Aluminium amorphe*

Des produits hydroxy-aluminiques amorphes peuvent apparaître dès le stade initial de l'hydrolyse de minéraux primaires. Ainsi, KAWANO & TOMITA (1996) observent une précipitation d'hydroxyde d'aluminium amorphe à la surface d'un feldspath potassique légèrement altéré sur des échantillons prélevés dans une roche granitique de l'île de Yakushima (petite île au sud du Japon). On peut considérer qu'il s'agit là déjà d'une forme particulière d'aluminisation minéralogique. L'aluminium amorphe y est associé également à d'autres produits d'altération comme la gibbsite et l'halloysite. Les auteurs concluent que l'aluminium amorphe est probablement formé dans la première phase d'altération des feldspaths potassiques et se transforme ensuite en gibbsite à mesure que l'altération progresse. Dans des travaux antérieurs, les mêmes auteurs (KAWANO & TOMITA, 1994) avaient déjà identifié une phase initiale amorphe aluminique ou alumino-silicique mais à partir cette fois de feldspath sodique (albite). Il s'agirait de polymères amorphes à stœchiométrie indéfinie.

L'aluminium amorphe d'abord et la gibbsite ensuite jouent un rôle dans le pouvoir tampon ou "ANC" de CHADWICK & CHOROVER (op. cit), leur solubilité augmentant avec l'acidification:



La relation s'établit ainsi entre la concentration en  $\text{Al}^{3+}$  et le pH:

$$-\log_{10}(\text{Al}^{3+}) = 3 \text{ pH} - \log_{10}K$$

La solubilité de l'hydroxyde d'aluminium est inverse par rapport à sa cristallinité. Ainsi, les valeurs de pK citées par les auteurs varient de -10,8 (polymère amorphe) à -8,11 (gibbsite cristalline) ou de -9,23 à -7,69 selon BOLT & BRUGGENWERT (op. cit.).

La traduction graphique en est reproduite à la [figure 3.4](#).

Les observations de KAWANO & TOMITA (op. cit.) et ce graphique plaident en faveur du contrôle de la solubilité de l'aluminium par une phase amorphe générée dès les premières phases d'altération des minéraux primaires. CHADWICK & CHOROVER (op. cit.) soulignent aussi le rôle de complexes alumino-organiques en phase solide dans le contrôle de la solubilité de l'aluminium. La cinétique des néoformations secondaires favoriserait en premier lieu la précipitation des phases amorphes qui seraient les moins stables du point de vue thermodynamique: c'est la règle de OSWALD (1897). C'est ainsi que se "néoformant" d'abord des polymères amorphes d'aluminium qui se transformeraient ensuite (très lentement) en gibbsite plus stable du point de vue thermodynamique.

### *Fer amorphe*

La phase d'oxydation du fer ferreux dans la réaction de ferrolyse (R12) vue au point 3.2.4. a été étudiée expérimentalement par ESPIAU et PEDRO (op. cit.). Ils ont examiné les effets d'un traitement alterné et répétitif de montmorillonites naturelles ou saturées en  $\text{Ca}^{2+}$  par du lactate ferreux ainsi que de kaolinite-Ca durant 1 à 2 jours. Le traitement inclut ensuite un séchage à l'air libre durant 12 jours. Ce traitement alterné est répété 14 fois consécutives. Ils observent une acidification de la solution jusqu'à une valeur "tampon" ainsi qu'une disparition du fer de la solution dans l'ordre croissant suivant: réactif seul (16 ppm) < kaolinite (30 à 36 ppm) < montmorillonite (56 ppm). Le fer retenu ou précipité dépasse largement la CEC et le  $\text{Ca}^{2+}$  échangé avec la solution, ce qui indique sa fixation sous une forme hydroxy-polymérisée

ferrique en conformité avec la réaction **R12**. Une acidité d'échange se développe sur le complexe adsorbant, essentiellement de nature protonique et très peu aluminique. Les auteurs considèrent cependant que leur expérimentation ne correspond qu'à une phase rapide alors que la ferrolyse en conditions naturelles est plus lente et aboutit à une aluminisation progressive des argiles. Les minéraux 2:1 aluminisés peuvent alors évoluer vers des intergrades de type pseudo-chlorites par agradation avec une couche d'hydroxy-polymères d'aluminium (interstatifiés hydroxy-aluminiques).

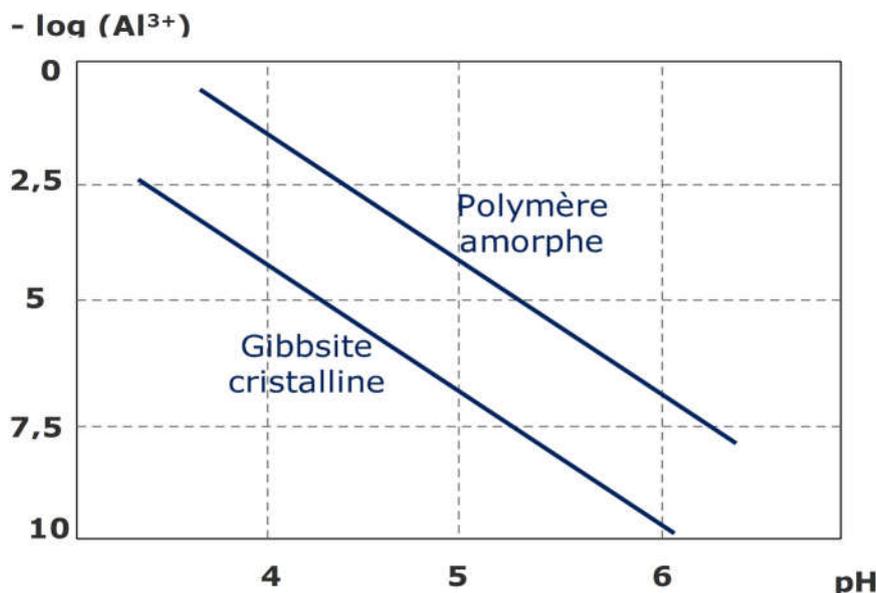


Figure 3.4: Solubilité (d'équilibre) de l'aluminium à partir de gibbsite et d'hydroxy-polymères amorphes

### 3.3.3. Aluminisation physico-chimique

L'aluminisation est à la fois minéralogique et physico-chimique comme indiqué précédemment. Elle s'opère dans le contexte d'une coexistence et d'une équilibration réciproque entre, d'une part, des formes amorphes et plus ou moins cristallines de l'aluminium et, d'autre part, des formes cationiques en solution et sur le complexe d'échange des sols. L'aluminisation physico-chimique est un processus par lequel les cations de base du complexe adsorbant sont déplacés en solution par échange avec l'aluminium cationique  $[\text{Al}^{3+}, \text{Al}(\text{OH})^{2+}]$ . L'hypothèse est émise ici que ce processus est alimenté par une dépolymérisation d'hydroxypolymères amorphes d'aluminium à mesure que l'acidification se poursuit. Elle est soutenue par des observations rendant compte du processus d'aluminisation tant en présence qu'en absence de gibbsite. Par ailleurs l'aluminium interagit avec la matière organique, le phosphore et le fer.

#### Taux d'aluminisation ou indice "m" de Kamprath

La somme des cations de base échangeables, extraites par l'acétate ou le chlorure d'ammonium 1N, et de l'acidité d'échange constituée par l'aluminium monomère cationique et les protons extraits ensemble au chlorure de potassium 1N définit la capacité d'échange cationique effective (CECe). Le taux d'aluminisation peut ainsi s'exprimer par l'indice "m" de KAMPRATH (1967) qui est le pourcentage de saturation des charges négatives nettes du complexe adsorbant occupé par l'aluminium cationique. Ces notions se traduisent par les relations de formulées dans l'encadré 5.

#### Encadré 5: Capacité d'échange effective et taux d'aluminisation

$$\text{CECe}_{[\text{capacité d'échange effective}]} = (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{K}^+ + \text{Na}^+)_{\text{cations de base}} + (\text{Al}^{3+} + \text{H}^+)_{\text{acidité d'échange}}$$

$$m \text{ (indice de Kamprath \%)} = 100 \times \text{Al}^{3+} / \text{CECe}$$

L'aluminisation induit dès lors un lessivage ou une évacuation latérale des cations de base qui

accompagnent les bicarbonates et les nitrates représentés dans la [figure 3.3](#) et une saturation progressive du complexe adsorbant par l'aluminium. Le taux d'aluminisation d'un sol progresse dès lors avec l'acidification en accord avec le graphique reproduit à la [figure 3.4](#). Trois seuils clé de correspondance en sont proposés par OPDECAMP (1997) tels qu'indiqués dans le [tableau 2](#).

*Tableau 2. Correspondance entre 3 seuils de pH et le taux d'aluminisation des sols (Source: OPDECAMP, 1997, op. cit.).*

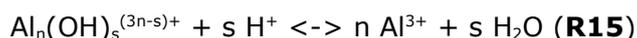
pH (H <sub>2</sub> O) du sol	Taux d'aluminisation "m" (%)
> 5,5	0
5,5 à 5,0	0 à 50
< 5,0	> 50

Le processus d'aluminisation s'initierait ainsi par acidification dès que le pH (H<sub>2</sub>O) du sol descend en-deçà de 5,5. Le degré de précision peut-être grossièrement estimé à 0,5 unités de pH. Ainsi, CHADWICK et CHOROVER (op. cit.) font démarrer ce processus effectivement à un pH de 5,5 mais c'est plutôt à un pH de 4,5 qu'ils situent le seuil d'aluminisation de 50%.

### *Formes polymérisées amorphes*

L'apparition d'aluminium amorphe comme produit d'hydrolyse primaire de feldspaths a été démontrée par KAWANO & TOMITA (op. cit.). De plus la règle d'OSWALD (op. cit.) des étapes établit la précipitation précoce des phases minérales amorphes par rapport aux phases cristallines. Il est dès lors pertinent de soutenir l'hypothèse que si l'acidification progresse assez vite en-deçà de pH (H<sub>2</sub>O) 6,0 ou 5,5, l'aluminium amorphe peut se dépolymériser en faveur de l'aluminisation physico-chimique du complexe adsorbant plutôt que de poursuivre sa cristallisation sous forme de gibbsite ou de la couche octaédrique d'un interstratifié secondaire. La force du pouvoir tampon et les cinétiques d'hydrolyse seraient dès lors déterminantes du type d'évolution.

Les polymères amorphes d'aluminium évoqués dans la littérature présentent une charge positive dans des conditions acides et sont donc "hypohydroxylées". Elles répondent à diverses formules possibles telles que Al<sub>13</sub>O<sub>4</sub>(OH)<sub>24</sub><sup>7+</sup> d'après AKITT et al.(1972), cités par BACHE & SHARP (1976) ou Al<sub>6</sub>OH<sub>15</sub><sup>3+</sup> et Al<sub>8</sub>OH<sub>20</sub><sup>4+</sup> d'après BROSSET et al. (1954) et MATIJEVIC et al. (1961) cités par RICHBURG & ADAMS (1970). La formulation générique de la dépolymérisation de l'aluminium amorphe sous conditions acidifiantes est dès lors proposée comme suit:



### *Aluminisation en présence de gibbsite*

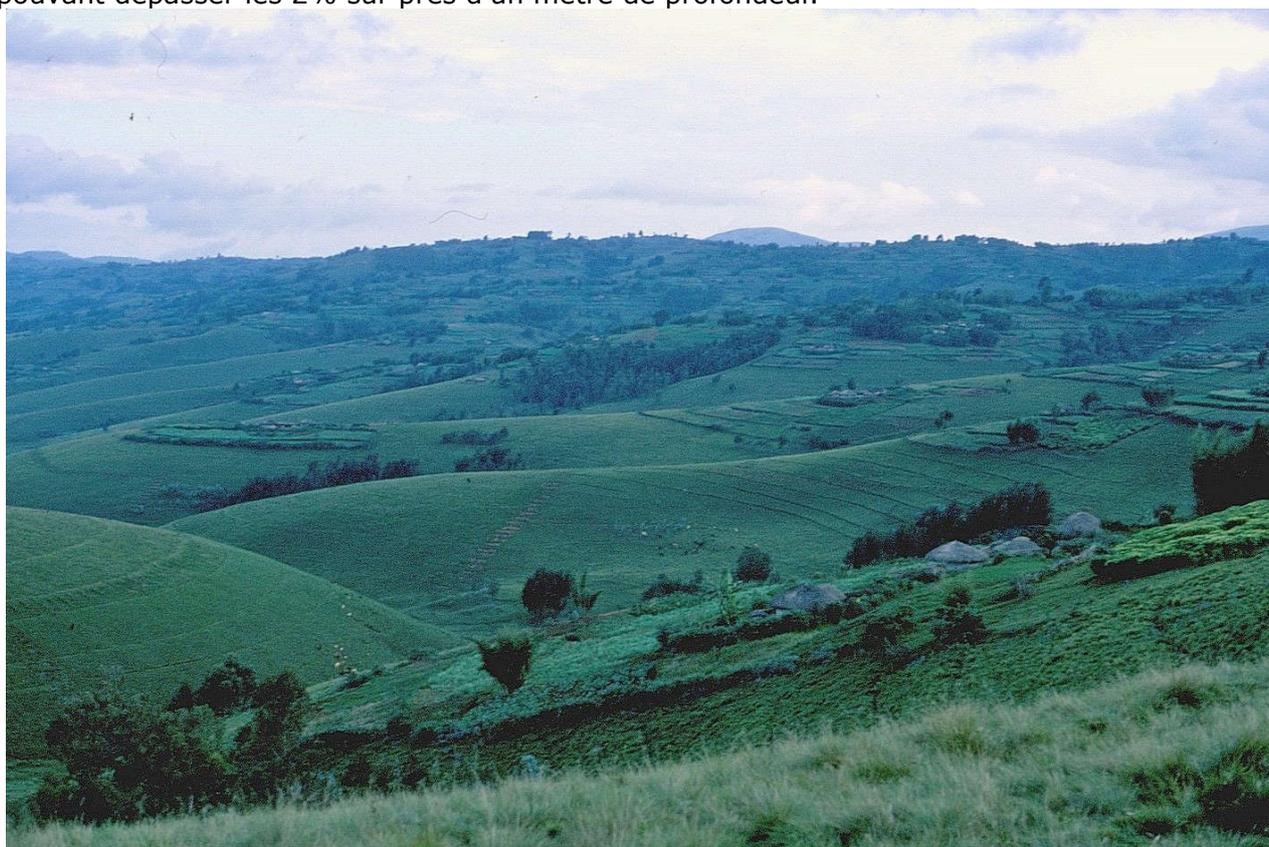
Une illustration du processus d'aluminisation est obtenue grâce aux données analytiques reproduites dans le [tableau 3](#). Il s'agit de résultats d'analyse du laboratoire de chimie agricole de l'Institut des sciences agronomiques du Burundi (ISABU) à partir d'échantillons prélevés dans plusieurs HP (holons paysagéniques) de parcelles d'essai à la station expérimentale de cet Institut à Gisozi en haute altitude.

Cette séquence de profils d'aluminisation du sol est développée sur une surface "pénéplanée" à une altitude moyenne d'environ 2.100 m. C'est un pseudo-plateau de quelques kilomètres mètres de largeur. Il forme un méso-relief interne et irrégulier à plusieurs niveaux de replat. L'instance paysagénique (IP) qui l'entoure présente un relief vallonné. Sa composition est largement dominée par une FP de Saltus constituée de pâturages naturels à *Eragrotis olivacea*. Ces derniers sont exploités comme parcours pour du bétail bovin. Cependant, les parties sommitales forment généralement une FP d'Ager en HP de cultures vivrières de subsistance (banane, pois, maïs, patate douce) et localement en HP de plantations de théiers. Des boisements parsèment aussi cet espace en une mosaïque de HP de Silva, notamment sur les sommets de plateau ou de crête. Une vue générale de ce type de IP est reproduite à la [figure 3.5](#).

*Tableau 3. Dix profils d'aluminisation croissante dans la station ISABU de Gisozi au Burundi (Source: OPDECAMP, 1988a).*

Prof. (cm)	P01 (m%)	P02 (m%)	P03 (m%)	P04 (m%)	P05 (m%)	P06 (m%)	P07 (m%)	P08 (m%)	P09 (m%)	P10 (m%)
7	2	6	25	18	59	49	70	75	89	86
20	5	5	33	21	59	65	73	74	86	86
33	3	9	19	18	34	53	66	77	91	73
46	7	14	8	16	13	37	68	75	87	61
59	12	16	7	16	22	21	63	68	86	72
72	6	13	6	17	11	20	61	78	79	74
85	9	10	7	18	11	20	57	75	80	84
98	9	10	4	14	16	21	52	79	77	78

De nombreux HP présentent souvent dans les sols un horizon sombre de profondeur témoignant d'un remaniement superficiel par apport colluvial ancien, ce qui suppose que les sols d'autres HP ont subi un décapage érosif de réjuvenation relative. Sous cet horizon sombre s'identifie une argile lourde rouge à rouge-foncé contenant environ 70% d'argile granulométrique. Un matériau superficiel plus léger peut être différencié dont la teneur en argile est de l'ordre de 55%. Les sols de la séquence d'aluminisation sont profonds, bien drainés et dits "humifères" car ils sont imprégnés de carbone organique avec des teneurs pouvant dépasser les 2% sur près d'un mètre de profondeur.



*Figure 3.5: Facettes et HP de Saltus, Ager et Silva près de Gisozi au Burundi (Photo: Luc OPDECAMP)*

Les pH (H<sub>2</sub>O) varient de 5,7 à 4,4 et la CECe reste comprise entre 7,61 cmol<sub>c</sub>/kg et 0,67 cmol<sub>c</sub>/kg selon le gradient d'aluminisation et de la profondeur des échantillons prélevés. Autrement dit, la CECe diminue à mesure que l'aluminisation progresse, de même qu'elle diminue dans chaque profil de la surface vers la profondeur. La composition minéralogique des

argiles, a été déterminée à l'époque par diffraction X dans le laboratoire du "Centre d'études des sols tropicaux" de la Faculté des sciences agronomiques de l'Université catholique de Louvain à Louvain-la-Neuve (Belgique). Les résultats établissent que la kaolinite et la gibbsite dominent la fraction argileuse sur toute l'épaisseur échantillonnée des sols. La troisième espèce minéralogique par ordre d'importance est une chlorite thermiquement instable, c'est-à-dire un minéral à 14 angström ou 1,4 nanomètre, non gonflant et détruit à une température inférieure à 550°C (tout comme la kaolinite par ailleurs). Un tel interstratifié est typique de l'aluminisation minéralogique évoquée précédemment. La présence de goethite et d'hématite est également détectée dans la plupart des échantillons ainsi qu'occasionnellement un autre interstratifié non gonflant de type illite-vermiculite. Enfin, des teneurs en aluminium amorphe "Al<sub>ox</sub>" variant de 0,64 à 2,24% et de fer amorphe entre 0,70 et 1,63% sont mesurées après extraction à l'oxalate acide (pH 3) dans les 10 mêmes profils d'aluminisation reproduits au [tableau 3](#). La coexistence de gibbsite et d'hydroxypolymères amorphes d'aluminium est ainsi diagnostiquée tout au long du processus d'aluminisation.

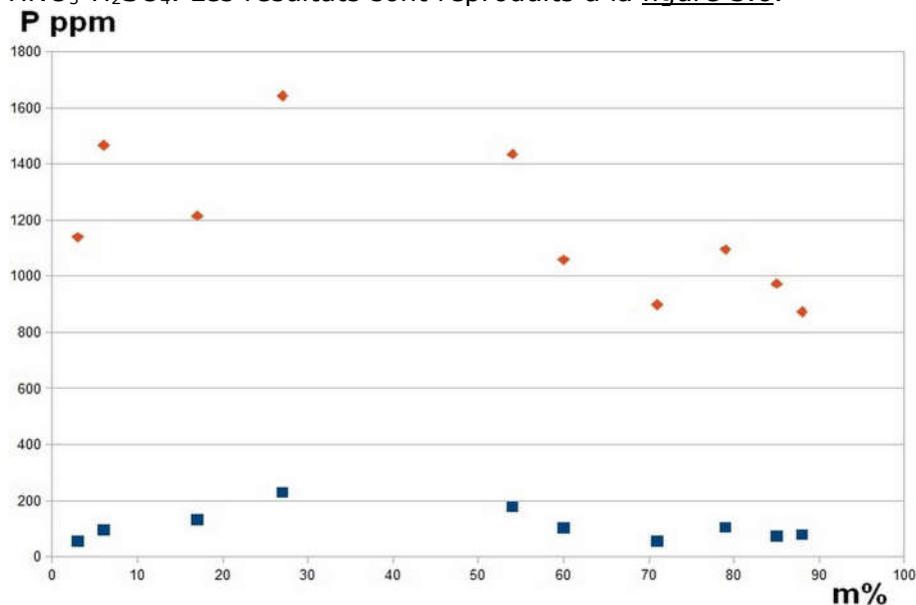
### *Aluminisation en absence de gibbsite*

A l'Ouest du Brésil, la rivière Javari marque la frontière entre le Brésil et le Pérou et se jette dans l'Amazone à proximité de la ville "Benjamin Constant". MARQUES et al. (2002) observent des teneurs élevées en Al<sup>3+</sup>, extrait au KCl N, de 7 à 18 cmol<sub>c</sub>/kg dans l'horizon superficiel (0 à 20 cm) de deux sols S1 et S2 de HP de terre haute (terrasse) et d'un sol S3 d'un autre HP de terre basse dans des alluvions "récentes" situées dans le lit majeur du Javari, en zone marécageuse d'un ancien méandre de la rivière. Les pH (H<sub>2</sub>O) en S1, S2 et S3 sont compris entre 4,4 et 4,7 et le taux d'aluminisation entre 50 et 80%. Par contre, dans le sol de deux autres sites S4 et S5 d'un troisième HP développé dans une levée alluviale en bordure du cours actuel de la rivière Javari, le pH est supérieur à 6,0 et il n'y a pas d'Al<sup>3+</sup> extractible, le taux d'aluminisation physico-chimique y étant donc nul. Partout, dans l'horizon superficiel des cinq sites de sols examinés, la CECe est assez élevée, de l'ordre de 12 à 22 cmol<sub>c</sub>/kg. Ces dernières valeurs sont en accord avec la présence de smectite (argile 2/1 gonflante) dans la composition minéralogique des argiles des sols. Un interstratifié hydroxy-aluminique à base de smectite est également omniprésent dans la fraction d'argiles fines (<0,2 µm) et témoigne ainsi d'une aluminisation minéralogique préalable à l'aluminisation physico-chimique. Le comportement de l'interstratifié aux RX se distingue par un gonflement incomplet après traitement au glycérol et une rétractation tout aussi incomplète après traitement thermique. La kaolinite est également présente mais pas de gibbsite. De la vermiculite et de la chlorite sont détectées dans le sol du troisième HP en S4 et S5. La fraction sableuse des deux sols de terre haute S1 et S2 est presque exclusivement composée de quartz. Dans le site S3, la trop faible teneur en sables ne permet pas l'examen de cette fraction granulométrique. Par contre des minéraux primaires comme des feldspaths, du mica et de la chlorite sont présents dans les deux sites S4 et S5 de la levée alluviale actuelle qui confirmeraient leur degré d'altération moins avancé que les autres sols. Les auteurs considèrent cependant que les taux d'aluminisation élevés des sols S1, S2 et S3 sont surfaits et que le réactif d'extraction (KCl) inclurait de l'aluminium hydroxylé en provenance de l'interstratifié hydroxy-aluminique de smectite. L'aluminium extrait au KCl ne serait en effet pas corrélé avec son activité en solution du sol. Ils se basent sur l'absence de symptômes "sérieux" de toxicité aluminique dans les HP de pâturages et plantations en S1 et S2 et dans le manioc en S3. Cependant, plusieurs auteurs cités par ROBARGE & COREY (op.cit.) prétendent que les hydroxypolymères d'aluminium ne sont pas extractibles par un sel neutre comme le KCl N. L'absence d'Al<sup>3+</sup> dans le sol du HP d'Ager (maïs) en S4 et S5 serait due à un pH bien moins acide, supérieur à 6. L'absence de gibbsite cristallisée n'empêche cependant pas de considérer l'aluminium hydroxylé de l'interstratifié comme sa forme pseudo-amorphe et précoce en S4 et S5 ou persistante en S1, S2 et S3.

### *Interactions de l'aluminisation avec le phosphore*

Les dix sites des profils d'aluminisation du Burundi à Gisozi décrits au [tableau 3](#) ont fait l'objet d'un autre échantillonnage. Ce dernier consiste en des prélèvements superficiels entre 0 et 15 cm de masses d'environ 500 kg de terre, homogénéisées et sous-échantillonnées en quatre composites de 100 prises à raison de quelques gramme par prise. Ils sont soumis à une nouvelle caractérisation analytique. Il s'agit d'obtenir un volume de terre suffisant pour réaliser

des essais de croissance en vases de végétations afin d'étudier les effets de l'aluminisation sur différentes espèces et variétés cultivées. Parmi les analyses effectuées figurent la CECe et l'aluminium échangeable pour établir les taux d'aluminisation ainsi que deux types d'extractions du phosphore. Le "Phosphore Olsen-Dabin" est obtenu par extraction avec une solution mixte de  $\text{NaHCO}_3\text{-NH}_4\text{F}$  et le "Phosphore total" par une extraction avec un mélange d'acides forts  $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4$ . Les résultats sont reproduits à la [figure 3.6](#).



*Figure 3.6: Distribution des teneurs en phosphore "total" (losanges) et "Olsen-Dabin" (carrés) dans la séquence d'aluminisation de Gisozi (Burundi) d'après les résultats de OPDECAMP et al. (1988)*

L'évolution de la teneur en "phosphore total" et celle de la teneur en "phosphore Olsen-Dabin" présentent toutes deux une allure similaire, marquée par une augmentation en début d'aluminisation jusqu'à un taux-seuil compris entre 30 et 40%, puis par une diminution de cette teneur au-delà de ce taux seuil. Ce dernier correspond expérimentalement à un  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  de 5,0. Ce comportement du phosphore dans la séquence de Gisozi est analogue avec celui observé par ROBARGE & COREY (op. cit.) avec une résine échangeuse d'ions saturée en aluminium cationique. La résine aluminisée est neutralisée à différents taux par ajout d'une base [ $\text{NaOH}$  ou  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] en quantités pré-calculées. Ensuite, du phosphore est ajouté sous forme de  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  ou  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ . Les auteurs observent une affinité croissante puis décroissante de la résine pour le phosphore. Ils mettent en évidence une "hydroxy-polymérisation" progressive de l'aluminium sur la résine à mesure que le pH augmente et que se développe ainsi une capacité croissante d'adsorption du phosphore par la résine traitée. Toutefois au-delà d'un certain pH, une compétition s'engage entre les ions hydroxylys  $\text{OH}^-$  et les ions monophosphates  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , aux dépens de ces derniers. L'inverse se produirait donc en cours d'acidification et d'aluminisation dans les sols de Gisozi mais l'allure croissante puis décroissante des teneurs en phosphore serait comparable à celle obtenue en laboratoire sur résine.

L'affinité et l'instabilité de liaisons entre le phosphore et les surfaces d'oxydes ou d'oxyhydroxydes d'aluminium (extraction  $\text{NH}_4\text{F}$ ) et de fer du complexe adsorbant est confirmée dans les conclusions de SALJNIKOV & CAKMAK (2011). Ces auteurs considèrent même que des composés "aluminophosphorés" peuvent migrer en profondeur et approvisionner les autres réservoirs ou fractions extractibles du phosphore. Dès lors, au vu de l'allure similaire de l'évolution du phosphore total dans la [figure 3.6](#), il est pertinent d'assimiler les hydroxypolymères aluminiques amorphes à des formes intermédiaires vers une fixation du phosphore sur la gibbsite et la pseudo-chlorite thermiquement instable (ou vermiculite aluminisée). Une phase intermédiaire amorphe de fer est également plausible vers une fixation sur l'hématite et la goéthite pour des liaisons Fe-O-P. De plus les phases amorphes de Fe et Al comme intermédiaires avec les phases cristallines sont en accord avec la règle de OSWALD (op. cit.). Cette règle empirique a été confirmée par observation directe en microscopie

électronique de haute résolution d'une "nanocristallisation" de  $\text{LiFePO}_4$  à  $450^\circ\text{C}$  par CHUNG et al. (2009) au départ d'une préparation de poudre amorphe. Plusieurs phases ou étapes transitoires métastables sont en effet apparues nécessitant autant de niveaux d'énergie d'activation correspondants pour obtenir finalement une structure cristalline stable. L'hypothèse émise ici est donc que l'hydrolyse des minéraux primaires en minéraux secondaires tels que la gibbsite ou les interstratifiés hydroxy-aluminiques passe par une phase amorphe précoce intermédiaire de polymères hydroxy-aluminiques qui contrôlent l'aluminisation dans les trajectoires d'acidification des sols. Cette phase intermédiaire hériterait de phosphore primaire pour l'adsorber et former des "complexes Al-P". Le phosphore s'adsorberait davantage au détriment des anions hydroxyles jusqu'à un pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ) de 5,0 en-deçà duquel l'aluminisation détruirait alors progressivement ces complexes Al-P par dépolymérisation.

### *Interactions de l'aluminisation avec la matière organique du sol*

BLOOM et al. (1979) confirment que ce n'est pas un simple hydroxyde qui contrôle l'activité de l'aluminium dans des horizons humifères de sols acides, avec ou sans gibbsite, car ils obtiennent une pente inférieure à 3 entre l'activité de l'aluminium en solution du sol et le pH, telle celle représentée dans la [figure 3.4](#). La pente obtenue par ces auteurs est de fait comprise entre 1,7 et 2,36 suivant la solution de sel 0,02 N utilisée ( $\text{KCl}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CuCl}_2$  ou  $\text{LaCl}_2$ ). Le même phénomène est observé avec une tourbe forestière saturée à 100% ou 80% par l'aluminium avec des pentes respectives de 2,09 et 1,64. Par ailleurs, l'ajout d'humus de feuilles a pour effet de réduire l'activité de l'aluminium en solution, ce qui pourrait résulter d'un accroissement de la CEC organique (carboxyles). L'aluminium organique ( $\text{Al}_{\text{org}}$ ), qui est aussi échangeable, constitue donc naturellement une fraction significative de l'aluminium dans les horizons humifères des sols acides ( $\text{pH} < 5,5$ ) ou très acides ( $\text{pH} < 5,0$ ), à côté de l'aluminium en phase amorphe précipitée ( $\text{Al}_{\text{am}}$ ).

Une adsorption importante de phosphore ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) est observée expérimentalement par BLOOM (1981) sur une tourbe forestière saturée à 80% par l'aluminium. Outre la formation de complexes humiques est également citée la possibilité de générer une "pseudo-variscite" amorphe. Voici deux réactions parmi d'autres proposées par l'auteur qui pourraient expliciter le phénomène (R16 et R17):



Pour des ajouts de quantités limitées de phosphore, entre 4 et 20  $\mu\text{mol}$  dans les conditions expérimentales adoptées, cette adsorption diminue très significativement lorsque le pH de la suspension de tourbe est abaissé en-dessous de 5,5. Par contre, si le pH de 5,5 est relevé l'adsorption du phosphore ne tend qu'à décliner légèrement. On retrouve ainsi une allure similaire<sup>3</sup> mais moins marquée que celle observée à la [figure 3.6](#) dans la séquence Gisozi. L'auteur conclut d'ailleurs que l'aluminium organique ( $\text{Al}_{\text{org}}$ ) contribue avec l'aluminium minéral amorphe ( $\text{Al}_{\text{am}}$ ) à la rétention du phosphore dans les horizons humifères des sols acides. Il signale aussi que l'oxalate d'ammonium acide extrait simultanément ces deux formes d'aluminium dans les sols ( $\text{Al}_{\text{ox}}$ ):

$$\text{Al}_{\text{ox}} = \text{Al}_{\text{org}} + \text{Al}_{\text{am}}$$

Le rôle significatif de la matière organique et de l'aluminium amorphe dans l'adsorption du phosphore est confirmé par HAYNES & SWIFT (1989) avec des échantillons de tourbe et d'humates saturés en aluminium. Leurs chaulages avec du  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  jusqu'à pH 5,5 et 7,0 provoquent une nette augmentation de la capacité d'adsorption du phosphore. Une préparation d'aluminium amorphe expérimentale développe cependant une capacité encore nettement supérieure. L'association d'aluminium organique et minéral amorphe prémunit par ailleurs le phosphore contre sa fixation sur les hydroxydes et oxyhydroxydes cristallins et renforce le

<sup>3</sup> la courbe est inversée car l'auteur dose le phosphore en équilibre dans la solution plutôt que le phosphore adsorbé

pouvoir tampon contre l'acidification. Mais cette association peut aussi réduire les sites potentiels d'adsorption du phosphore. Les résultats sont présentés sous formes d'isothermes d'adsorption qui ne permettent pas l'interprétation fine de l'adsorption du phosphore en fonction du pH (3,5 - 5,5 - 7,0).

Enfin, dans 86 échantillons d'horizons humifères de sols sableux et limono-sableux, très acides [pH(H<sub>2</sub>O) de 4,0 à 4,2 et m% de 47 à 56], prélevés dans des HP de Silva en Pologne centrale montagneuse, GRUBA & SOCHA (2016) obtiennent une bonne corrélation entre l'Al<sup>3+</sup> échangeable et la teneur en carbone organique. C'est une illustration d'aluminisation physico-chimique d'un complexe adsorbant de nature essentiellement organique. L'aluminium échangeable est manifestement d'abord de l'aluminium amorphe organique (Al<sub>org</sub>) à hauteur de 56%, extrait au CuCl<sub>2</sub>, et provient également de l'aluminium amorphe minéral à hauteur de 44%. Ces pourcentages respectifs se rapportent à l'aluminium amorphe total extrait à l'oxalate d'ammonium (Al<sub>ox</sub>). Il faut signaler que du point de vue minéralogique il existe cependant de très faibles quantités de kaolinite (>5%), le reste étant du quartz et des traces d'hématite et qui ne développent pratiquement aucune CECe significative.

### *Interactions de l'aluminisation dans les sols sulfatés acides*

D'après WANG et al (2000), l'aluminium organique, échangeable et hydroxy-adsorbé représentent en moyenne 25% de l'aluminium total dans une série de sols sulfatés acides actuels que ces auteurs ont soumis à une extraction séquentielle fractionnée. Ils considèrent que ces formes sont les plus actives au cours de l'aluminisation de ces sols par une forte et rapide acidification. FRINK.(1973) rapporte aussi l'existence dans les sols sulfatés acides de plusieurs formes d'aluminium telles que la persistance de longue durée de composés hydroxy-aluminiques plus solubles que la gibbsite, dont plusieurs espèces de polymères amorphes ainsi que des complexes avec la matière organique et le phosphore. Il rapporte aussi l'aluminisation minéralogique interfoliaire de vermiculite et de montmorillonite (pseudo-chlorites, interstratifiés). Par ailleurs, il cite une espèce minéralogique de base à savoir le sulfate cristallin d'aluminium hydraté de formule Al<sub>4</sub>(OH)<sub>10</sub>SO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O et dénommée "basaluminite". FRINK (op. cit.) fait aussi état d'au moins trois plateaux tampons lorsqu'un sol sulfaté acide est soumis à un chaulage. Le premier se situe aux pH les plus acides et il l'attribue à des protons "libres" échangeables ou en solution dont l'importance est spécifique aux sols sulfatés acides. Le deuxième plateau tampon au cours du chaulage est centré sur un pH de 5,0 et s'étend jusqu'à pH 5,5-6,0. Il correspond assez bien à la neutralisation du premier stade d'hydrolyse de l'aluminium dont le pK correspond justement à 5, selon la réaction suivante:

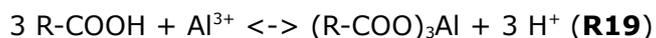


Enfin, un troisième plateau tampon de neutralisation par la chaux se situe au-dessus de pH 6. Il est attribué notamment aux groupements faiblement acides de la matière organique humifiée (R-OH + OH<sup>-</sup> -> R-O<sup>-</sup> + H<sub>2</sub>O). Ces groupements constituent des charges négatives dépendantes du pH (et qui augmentent artificiellement la CEC des sols acides lorsqu'elle est mesurée à pH 7 avec l'acétate d'ammonium).

SHAMSHUDDIN et al. (1986) mettent en évidence la formation de jarosite [KFe<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>] et de natrojarosite [NaFe<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>] en couplage avec l'oxydation de la pyrite (**R11**) dans deux sols littoraux de la péninsule de Malaisie. Une forte aluminisation physico-chimique y est mesurée à des pH inférieurs à 4,0. La gibbsite est présente ainsi que de la kaolinite, du mica et de la smectite. La titration avec du KOH montre un pouvoir tampon à pH-3-4 attribué à l'aluminium et pas au fer dont la teneur est très faible. La jarosite et natrojarosite ne participent pas au pouvoir tampon, ces minéraux étant stables.

ELISA et al. (2016) indiquent une large extension de sols sulfatés acides et pyritiques de pH<3,5 en Malaisie. Ces sols sont presque exclusivement situés sur le littoral de la péninsule. Les auteurs font état d'une aluminisation physico-chimique dans les HP rizicoles. Ce qui est remarquable c'est qu'ils présentent un échantillon de surface (0-15 cm) d'un tel HP dont le pH(H<sub>2</sub>O) est de 2,9 avec un taux d'aluminisation certes significatif (36%) mais qui reste modéré. Ce échantillon de sol développe en effet une CECe de 11,71 cmol<sub>c</sub>/kg et une concentration en aluminium échangeable de 4,26 cmol<sub>c</sub>/kg. Ni les résultats de SHAMSHUDDIN et al. (op. cit, 1986), ni ceux de ELISA et al. (2016) n'évoquent une intervention de

d'aluminium amorphe organique ou minéral dans l'aluminisation des sols sulfatés acides de Malaisie. Pourtant, des groupements carboxyles "-COOH" de la matière organique humifiée pourraient faire office de sites d'échange entre  $H^+$  et  $Al^{3+}$  dans les conditions très acides en cause selon la réaction **R19**:



Cette hypothèse fait ainsi intervenir  $Al_{org}$  et permet aussi d'expliquer le pouvoir tampon du premier plateau de neutralisation par une base citée par FRINK (op. cit.) et qui devrait pouvoir initier une (ré)hydroxy-polymérisation aluminique à bas pH (référence à une réaction **R15** inversée de type:  $n (COO)_3Al + s KOH \rightarrow Al_n(OH)_s^{(3n-s)+} + 3n -COO^- + s K^+ \dots$

### 3.4. Récapitulation et discussion

Les holons paysagéniques (HP) de terre haute et de terre basse en régime humide et subhumide ainsi que ceux des terres basses littorales en régime semi-aride ou aride évoluent sous forçage biologique d'acidification des sols par la respiration racinaire et microbienne, par la nitrification de l'azote ou encore par le développement de sols sulfatés acides potentiels via la microflore sulfato-réductrice dans les HP des littoraux maritimes. Ces derniers subissent une brutale acidification de quelques jours ou semaines en cas de drainage artificiel, notamment pour l'aménagement de HP rizicoles.

Les traits pédogénomiques des holons subissent alors de profondes modifications marquées par l'ameublissement de roches mères, l'accroissement du volume poreux et de la surface spécifique, l'altération des minéraux primaires ou pseudo-primaires, l'incorporation de matière organique humifiée, l'argilisation. Les argiles sont héritées par une réorganisation microcristalline et/ou néoformées à partir des éléments hydrolysés dans la solution du sol en évolution. L'aluminisation minéralogique et physico-chimique constituent des processus incontournables lors de l'acidification. L'aluminium amorphe " $Al_{am}$ " sous forme d'hydroxy-polymères ainsi que de l'aluminium organique " $Al_{org}$ " sous forme de complexes humifères sont les plus actives dès que l'acidification progresse en-dessous de pH ( $H_2O$ ) de 5,5-6,0. Ce sont les premières étapes probables de la règle d'OSWALD (op. cit.). Ces deux espèces d'aluminium pourraient hériter du phosphore primaire vis-à-vis duquel elles présentent une capacité d'adsorption particulièrement significative. Le fer amorphe aurait un comportement similaire mais son activité relative serait plus significative en terre basse humide où il est généré par ferrollyse. Au cours de l'aluminisation physico-chimique, l'espèce cationique de l'aluminium " $Al^{3+}$ " sature progressivement le complexe adsorbant aux détriments des cations de base ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  et  $Na^+$ ) emportés par lessivage vertical ou latéral. Ce dernier s'opère principalement avec les bicarbonates et nitrates produits par l'acidification biologique.

CHADWICK et CHOROVER (op. cit.) proposent une représentation graphique de l'évolution du pouvoir tampon du sol (ANC, Acid Neutralizing Capacity). C'est en quelque sorte une synthèse des processus d'altération et d'aluminisation selon un modèle de réaction acide-base. La [figure 3.7](#) en est une reproduction traduite et adaptée par l'ajout en rouge de la forme d'aluminium extractible à l'oxalate " $Al_{ox}$ ". Cette dernière regroupe la forme amorphe " $Al_{am}$ " et la forme organique " $Al_{org}$ ". Les auteurs précisent que l'allure de cette courbe peut varier d'un sol à l'autre selon la nature et la quantité des minéraux présents ainsi que selon les cinétiques de dissolution et d'hydrolyse. C'est pourquoi les pseudo-plateaux tampons sont ici différents de ceux cités par FRINK (op. cit.) dans un paragraphe antérieur. Les trois plateaux de CHADWICK et CHOROVER sont celui des carbonates à pH 8,3 d'abord, puis de l'aluminium hydroxylé (polymérisé) et enfin de fer hydroxylé (goethite  $FeOOH$  par exemple) ou de  $Al_{org}$ , comme suggéré dans les sols sulfatés acides (réaction **R19**). Les paysages de bauxite, composée de polymorphes d'hydroxydes " $Al(OH)_3$ " et d'oxyhydroxydes d'aluminium et fer, sont généralement miniers comme illustré à la [figure 3.8](#). Le plateau tampon de fer hydroxylé est plutôt rarement rencontré dans la nature à cause des conditions très acides qu'il suppose. Ces dernières existent dans les HP du littoral fluvio-marin où se forment la jarosite qui serait assez stable. Par contre, plutôt qu'un modèle de réaction acide-base les oxydes et oxyhydroxydes de fer sont produits par un modèle de réaction d'oxydoréduction passant par la ferrollyse que par

un modèle de réaction acide-base.

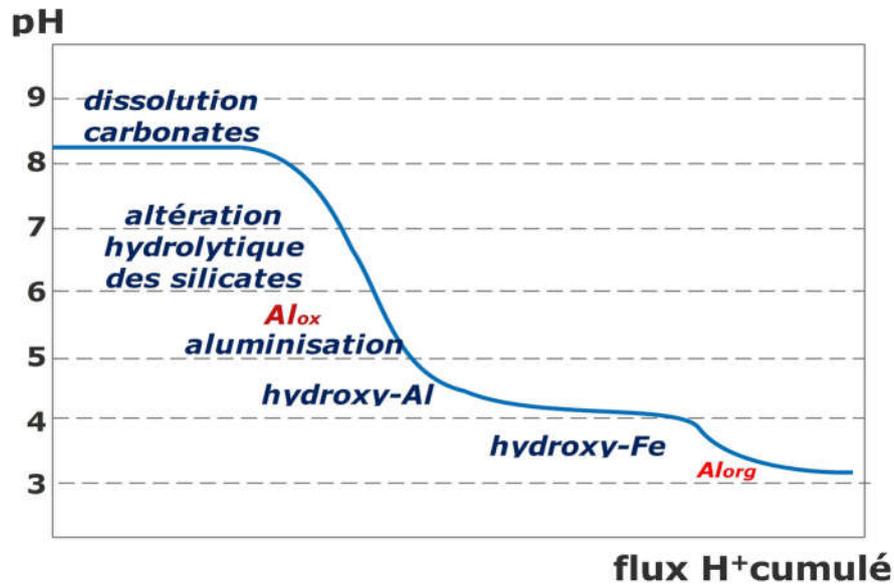


Figure 3.7: Évolution du pouvoir tampon et du profil d'altération du sol sous forçage d'un flux protonique cumulé, adapté d'après CHADWICK et CHOROVER (2001, op. cit.)

Enfin, rappelons que l'aluminisation n'est pas un processus d'évolution génomique des HP en terres hautes de régime aride ou semi-aride.



Figure 3.8: Ancienne carrière de bauxite à Otrante, Italie (Photo: Fotolia)4

## 4. Phytobiologie de l'aluminisation

### 4.1. Inductions physiologiques de l'aluminisation

L'aluminisation des sols dans les holons paysagéniques (HP) crée un important stress physiologique chez de nombreuses espèces de l'Ager. Ce stress peut aller jusqu'à des symptômes de toxicité lorsque la concentration en  $Al^{3+}$  de la solution du sol devient critique. KOCHIAN et al. (2005) passent en revue les principales manifestations et les mécanismes connus ou suspectés. Une concentration critique en aluminium provoque des effets rhizotoxiques plus ou moins graves lorsque le pH du sol descend en-dessous de 5,0 c'est-à-dire lorsque le taux d'aluminisation physico-chimique (m%) dépasse 50% selon l'échelle présentée au [tableau 2](#) du point précédent. Cependant, le degré de toxicité varie grandement selon les espèces, les conditions de croissance, la durée d'exposition et les concentrations en solution. La rhizotoxicité se manifeste par une inhibition de la croissance racinaire ainsi que de l'absorption d'eau et des nutriments minéraux du sol. Des effets morphologiques en résultent telles que le gonflement des extrémités et la réduction ou disparition des poils absorbants. Elle se marque au niveau de l'apex racinaire par le blocage de l'activité méristématique.

Plusieurs sites sont présumés comme cibles potentielles de l'aluminium tels que la paroi cellulaire, la membrane plasmique, le cytosquelette ou le noyau même de la cellule. Si une grande partie de l'aluminium associé aux racines se situe dans l'apoplasme (milieu extracellulaire formé par les parois pectocellulosiques et les vides intercellulaires), il est donc aussi reconnu que l'aluminium atteint des sites réactionnels dans le symplasme (milieu intracellulaire) tels que les microtubules et les filaments d'actine du cytosquelette. Des réactions biochimiques plus intimes encore sont également signalées notamment avec l'ADN du noyau cellulaire.

#### 4.1.1. Paroi cellulaire

La paroi cellulaire pectocellulosique présente des charges négatives qui en déterminent sa capacité d'échange cationique interagissant avec  $Al^{3+}$  de la solution du sol en périphérie des racines. Ainsi l'aluminium cationique peut déplacer le calcium de la paroi et modifier sa structure et ses propriétés mécaniques. La paroi peut alors devenir plus rigide au point de limiter ses possibilités d'élongation et d'expansion en général. Ce type d'interactions a été observé dans les racines de pois, de froment et de maïs.

#### 4.1.2. Membrane plasmique

Plusieurs mécanismes sont évoqués au niveau de la membrane plasmique dont un schéma de la structure est présenté à la [figure 4.1](#). Tout comme la paroi, cette membrane développe également une capacité d'échange cationique par une polarisation de la double couche phospholipidique qui la constitue. En cas d'exposition à  $Al^{3+}$  une dépolarisation instantanée a été observée chez la betterave sucrière et le froment. L'aluminium peut ainsi interférer de manière dommageable dans la composition ionique de surface et le processus de transfert ionique entre l'apoplasme et le symplasme. Par exemple, la synthèse de la callose dans l'apoplasme nécessite la présence de  $Ca^{2+}$  et si  $Al^{3+}$  le déloge de la membrane, une accumulation de callose est favorisée. C'est ce qui est observé chez le maïs et le haricot. La callose peut alors boucher les transferts intercellulaires via les plasmodesmes tel que cela a été mis en évidence chez un froment sensible.

Le transport actif de protons à travers la membrane plasmique permet de générer un gradient protonique actif dans le transfert d'ions secondaires. Cela consomme de l'énergie sous forme d'ATP (adénosine triphosphate), si bien que cette activité est assurée par une enzyme de la membrane plasmique appelée  $H^+$ -ATPase. L'aluminium peut inhiber cette activité et par conséquent altérer l'équilibre ionique des cellules racinaires. Un tel phénomène a été mis en évidence dans les racines du potiron et du froment.

Les canaux protéiques de la membrane plasmique participent à l'absorption racinaire de

cations tels que le  $\text{Ca}^{2+}$ , le  $\text{Mg}^{2+}$ , le  $\text{K}^+$  et le  $\text{NH}_4^+$ . Une interférence directe de plusieurs protéines servant de canaux de transport avec le cation aluminique est susceptible de bloquer ce mécanisme comme observé dans les poils absorbant et racines du froment et du maïs.

## Membrane plasmique

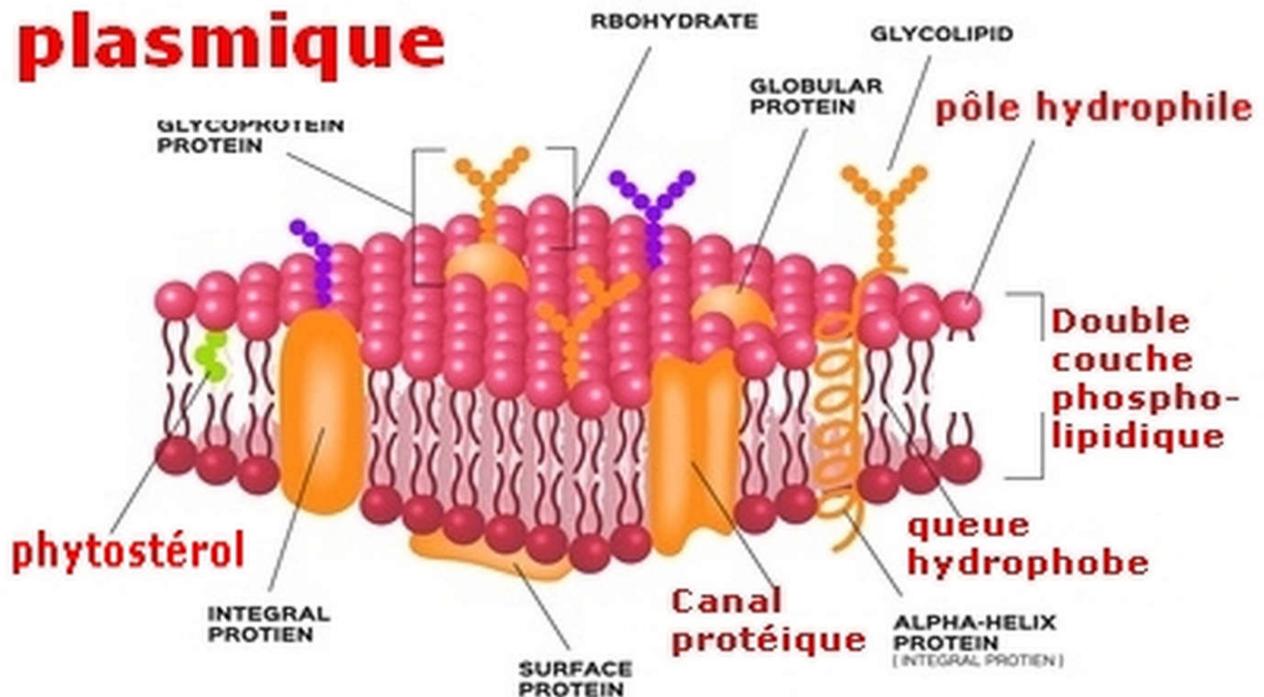


Figure 4.1: Schéma de structure de la membrane plasmique (Source: Fotolia)

L'aluminium est également associé à la production de dérivés réactifs de l'oxygène (DRO) ou radicaux libres. Ils sont dommageables à la membrane lipidique comme observé chez le soja. La peroxydation lipidique n'est pas instantanée après une exposition à l'aluminium mais peut déjà se produire après 24 heures, tel qu'observé chez le pois et le soja. Les radicaux libres peuvent aussi occasionner un dysfonctionnement mitochondrial.

### 4.1.3. Cytosquelette racinaire

L'aluminium induit des changements d'organisation structurale des cellules racinaires par interactions avec les filaments d'actine, les microfilaments et les microtubules, ce qui explique des malformations morphologiques tels que des gonflements déjà évoqués.

### 4.1.4. ADN du noyau

L'aluminium peut interférer également avec des structures du noyau cellulaire telles que les microtubules de sa membrane ou la chromatine. Il peut en résulter des erreurs dans la reconnaissance et le transport des protéines, une déstabilisation du cytosquelette et des dysfonctionnements dans les processus de divisions cellulaires. Les études de ces interactions ont été conduites notamment sur l'orge.

### 4.1.5. Discussion

Les nombreux mécanismes cellulaires qui s'enchaînent dans la croissance des racines et les interactions multiples possibles avec l'aluminium telles que revues par KOCHIAN et al. (2005) et brièvement évoquées ci-dessus, ne permettent pas de définir un processus universel unique pour expliquer le phénomène de toxicité aluminique. BRUNNER & SPERISSEN (op.cit.)

considèrent que les mécanismes avancés demeurent spéculatifs ou hypothétiques notamment du fait des différences de sensibilité des végétaux. Ils reconnaissent cependant comme indicateur écologique de toxicité aluminique potentielle une valeur de "m" supérieur à 50%, ou plutôt, ce qui est équivalent, un rapport inférieur à 1 entre la somme des cations de base et l'aluminium échangeables dans le sol. L'argument principal en faveur d'un tel indicateur reste l'interférence entre cations de base et aluminium au niveau de la membrane plasmique. Par ailleurs, ces auteurs signalent le peu de connaissances acquises sur les espèces natives, rejoignant en cela les remarques et observations de HARIDASAN (2008) pour le *cerrado* (savane boisée) du Brésil.

## 4.2. Résistance et tolérance à l'aluminisation

KOCHIAN et al. (2005, op. cit.) passent aussi en revue les deux mécanismes de résistance et de tolérance à l'aluminium que sont celui de son exclusion par exsudation racinaire de carboxylates pour le premier et celui de sa chélation dans le symplasme par des carboxylates également pour le second. HARDISAN (op. cit.) considèrent que les communautés d'espèces natives sont résistantes ou tolérantes à l'acidité des sols par les deux mêmes mécanismes d'exclusion ou d'accumulation de l'aluminium. Ce même auteur précise que les espèces accumulatrices d'aluminium peuvent en concentrer de 1.000 à 4.000 ppm dans leur feuilles. EVRARD et al. (1967) signalent même des concentrations qui peuvent atteindre jusqu'à 70.000 ppm dans les feuilles. BRUNNER & SPERISSEN (op.cit.) s'accordent également sur les mécanismes d'exclusion par exsudation de carboxylates et d'accumulation par chélation avant transport puis séquestration dans les parties moins sensibles des plantes ou dans des compartiments subcellulaires. Ils considèrent cependant qu'à part l'exsudation d'acides organiques la plupart des mécanismes évoqués ne bénéficient pas d'une évidence physiologique ou d'un support génétique. Ils émettent aussi la remarque que la plupart des études se sont focalisées sur des espèces cultivées (de l'Ager) ou sur la plante modèle *Arabidopsis (thaliana)*.

### 4.2.1. Résistance par exclusion de l'aluminium

D'après KOCHIAN et al. (2005, op. cit), il est apparu dans plusieurs études que les complexes de carboxylates d'aluminium ne sont pas absorbés par les racines. Mais cela est infirmé par DEKOCK P. C. & MITCHELL R. L. (1957), cité par SIVASUBRAMANIAM & TALIBUDEEN (1971), qui observent une absorption de chélates d'aluminium par les racines de moutarde, une espèce tolérante à l'aluminium. L'exsudation de carboxylates au niveau de l'apex racinaire est cependant plus importante chez des cultivars réputés résistants de plusieurs espèces cultivées par rapport à des génotypes sensibles: citrates (riz, maïs, sorgho, haricot, soja, Miscanthus), malates (froment, *Arabidopsis thaliana*), citrates & malates (avoine, seigle, triticale, tournesol, radis), oxalate (colocase ou taro, sarrasin). L'ordre décroissant suivant d'efficacité de chélation de l'aluminium est établi: citrate > oxalate > malate. Les mêmes carboxylates sont excrétés par diverses espèces ligneuses et essences forestières. Pour les racines mycorhizées, les espèces suivantes sont notamment citées *Pinus densiflora* (citrates), *Pinus sylvestris* (oxalate), *Picea abies* (succinate). Pour les racines non mycorhizées d'arbres et arbustes sempervivents: *Camellia sinensis* -théier- (oxalate), *Citrus sinensis* - oranger - (citrates, malates), *Cinnamomum camphora* - camphrier - (citrates), les Eucalyptus (citrates, malates, oxalates), etc. Citrates et oxalates sont aussi excrétés pour plusieurs espèces de peuplier et de conifères.

Une surexpression de gènes codant des enzymes comme la citrate synthase ou la malate déshydrogénase a pu être observée dans certains cas. Un délai d'activation de gènes de résistance semble nécessaire suite à une exposition à l'aluminium chez certaines espèces telles que le seigle ou le triticale tandis que chez d'autres espèces l'exsudation de carboxylates reste constante. Le premier gène de résistance à l'aluminium a été identifié chez le froment. C'est le "*TaALMT1*" qui encode pour une protéine de la membrane plasmique responsable de l'exsudation de malate (SASAKI et al., 2004). Les canaux protéiques d'anions (carboxylates) dans la membrane plasmique sont rapidement activés par une exposition à l'aluminium. Suite à l'exclusion symplastique, une accumulation apoplastique d'aluminium au niveau de la paroi cellulaire a été observée en relation avec sa teneur en pectine et son degré de

méthylation (pectine et pectine méthyl-estérase). Un potentiel d'accumulation d'aluminium existe tant chez les espèces cultivées non ligneuses que chez les espèces arbustives et forestières.

#### 4.2.2. Résistance par augmentation du pH dans la rhizosphère

A titre documentaire, BRUNNER & SPERISSEN (op.cit.) évoquent l'activation d'un influx protonique dans l'apex racinaire de mutants d'*Arabidopsis* comme une option d'exclusion de l'aluminium. Ce processus provoque une augmentation du pH dans la rhizosphère ce qui y réduit l'activité de l'aluminium. Ces auteurs signalent cependant qu'il n'y a pas d'évidence pour le déroulement d'un tel processus chez des écotypes d'*Arabidopsis* ni dans les racines d'espèces ligneuses forestières.

#### 4.2.3. Tolérance par accumulation de l'aluminium

Les fleurs d'Hortensia (*Hydrangea macrophylla*) sont rouges au bleues suivant le pH du sol. En sol, acide elles sont bleues par accumulation d'aluminium dans les sépales sous forme d'un complexe de l'aluminium avec un pigment d'anthocyane. KOCHIAN et al. (op. cit.) rapportent que cette plante peut aussi accumuler dans ses feuilles jusqu'à 3.000 ppm d' $Al^{3+}$  sous forme d'un complexe 1:1 avec du citrate. De même ces auteurs précisent que le sarrasin (*Fagopyrum esculentum*) peut accumuler dans ses feuilles jusqu'à 15.000 ppm de  $Al^{3+}$  sous forme d'un complexe 1:3 avec l'oxalate. Les complexes Al-carboxylate 1:3 sont stables et assurent donc une neutralisation durable de l'aluminium équivalent à un processus de détoxification. Les complexes 1:1 ou 1:2 restent potentiellement toxiques. Le stockage du complexe 1:3 avec l'oxalate se réalise à 80% dans les vacuoles. S'il se forme dans les racines du sarrasin, le transport de l'aluminium dans le xylème se fait sous forme de citrate ce qui suggère un double échange de ligand (chélateur du cation) d'abord au niveau racinaire et puis au niveau foliaire. Des échanges de ligands sont également apparents chez le théier par exemple. De plus d'autres agents complexant l'aluminium sont détectés chez le théier comme des flavonols. Des complexes de l'aluminium avec des flavonols est aussi démontrée dans les apex racinaires du camphrier.

SILVA et al. (2004) concluent en la tolérance à l'aluminium de plusieurs espèces de *Eucalyptus* par complexation interne avec du malate au niveau racinaire.

HARIDASAN (1982) identifie la présence significative d'espèces accumulatrices d'aluminium dans le *cerrado* du Brésil et leur appartenance aux principales familles que CHENERY (1948) avaient déjà identifiées auparavant et que EVRARD et al. (op. cit.) ont aussi confirmées au moins partiellement au sein de la flore congolaise: Vochysiacees (toutes les espèces de cette famille sont accumulatrices d'Al), Rubiacées (647 espèces accumulatrices réparties dans 91 genres), Mélastomatacées (441 espèces accumulatrices réparties dans 105 genres). Il faut y ajouter les Théacées (famille du théier et du Camélia).

#### 4.2.4. Tolérance par activation de voies métaboliques particulières

BRUNNER & SPERISSEN (op.cit.) indiquent que des concentrations modérées en aluminium ne sont pas fatales et que la croissance des racines peut reprendre grâce à l'activation de nouvelles voies métaboliques. Ainsi, ils citent notamment GRISEL et al. (2010) qui ont exposés de jeunes plants de *Populus tremula* (peuplier tremble) à des concentrations croissantes de 100, 250, 500 et 1000  $\mu M$  de  $AlCl_3$ . A 100  $\mu M$ , il n'ya pas d'effet. A 250, 500 et 1.000  $\mu M$ , une inhibition de la croissance racinaire après 6 h d'exposition. A plus de 2 jours d'exposition, il y a une récupération de la croissance avec 250 et 500  $\mu M$  mais pas de récupération avec 1.000  $\mu M$ . Lors d'un essai réalisé avec 500  $\mu M$  de  $AlCl_3$  en stress permanent, on observe 68% d'inhibition de la croissance racinaire après 6 h; une récupération de 68 à 50% après 2 jours d'exposition et une récupération de 68 à 36% après 10 jours, par rapport au témoin sans stress.

Lors du stress d'exposition constante à une concentration de 500  $\mu M$  d' $AlCl_3$ , les mêmes auteurs explorent l'activité génétique du peuplier. Ils observent une régulation à la baisse d'expression de 202 à 27 gènes réactifs entre 6 h et 2 jours tandis que d'autres gènes réactifs sont régulés à la hausse. La régulation rapide des gènes réactifs concernent le contrôle de trois

processus principaux: (1) l'assouplissement de la paroi cellulaire par des agents enzymatiques (2) le transport actif de cations comme le  $K^+$  et particulièrement le  $Mg^{2+}$  et (3) une expression à la hausse de gènes contrôlant les dérivés réactifs de l'oxygène (DRO) et en particulier le gène contrôlant une oxydase alternative pour abaisser la production de DRO au niveau mitochondrial.

#### 4.2.5. Discussion

BRUNNER et SPERISSEN (op. cit.) proposent un schéma récapitulatif des mécanismes de résistance et tolérance dont la [figure 4.2](#) est une représentation légèrement modifiée. Il faut préciser que ces mécanismes restent en partie spéculatifs et qu'ils sont basés essentiellement sur des expérimentations en laboratoire de physiologie végétale. Ils se déroulent à des échelles nano- et micrométriques à l'instar des réactions d'acidification et d'aluminisation revues précédemment. Le couplage entre l'aluminisation des sols et les adaptations phytobiologiques au stress qu'elle induit est cohérent. Il est même assez évident lorsque l'on se rend compte que l'aluminisation des sols est soumise au forçage biologique via la bio-acidification. La co-évolution intime de la biosphère et de la lithosphère terrestres est ainsi illustrée. Ce qui mérite d'être remarqué par ailleurs c'est que le processus d'exclusion de l'aluminium par l'exsudation d'acides organiques serait assez répandu, même chez des génotypes ou cultivars réputés non résistants mais à des intensités simplement plus faibles. Les auteurs cités s'accordent sur l'acceptabilité du taux d'aluminisation "m" de 50% comme indicateur écologique de toxicité aluminique potentielle d'après la littérature scientifique qu'ils ont passé en revue. Ils s'accordent également pour reconnaître une variabilité importante dans la sensibilité à l'aluminium cationique parmi les espèces du règne végétal et en particulier entre espèces natives et espèces cultivées.

Le génotype du peuplier tremble (*Populus tremula*) est représentatif d'une résistance & tolérance à l'aluminium induite par régulation d'un nombre élevé de "loci de traits quantitatifs" (LTQ, "locus quantitative traits" soit LQT en anglais). Si une telle résistance chez le froment, l'orge ou le seigle est pratiquement dominée par un seul trait majeur en un locus chromosomique particulier, le riz présente lui une régulation complexe de 27 LTQ comme le rapportent KOCHIAN et al. (2005, op. cit). Et la métaphore opérée avec un tel système de contrôle génétique par LTQ à la [figure 2.3](#) (point 2) pour la paysagénie territoriale en trouve donc ici une double illustration concrète.

L'importante adaptation génétique des espèces natives devrait constituer un objet majeur de recherche-développement. Mais il faudrait pouvoir quantifier des seuils de résistance et de tolérance au degré d'aluminisation des sols pour chaque génotype ou cultivar sélectionné pour remodeler le cas échéant et en connaissance de cause les holons et facettes paysagéniques (HP et FP).

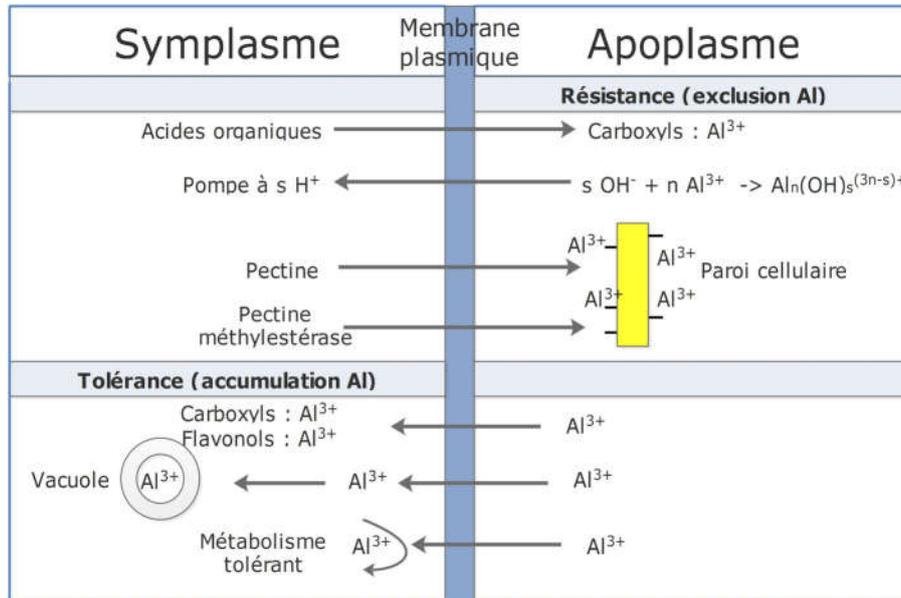
Enfin, les espèces fourragères du Saltus ne semblent pas encore avoir été l'objet d'investigations particulières pour les processus de résistance et de tolérance de l'aluminium.

### *4.3. Sensibilité de la croissance à l'aluminisation*

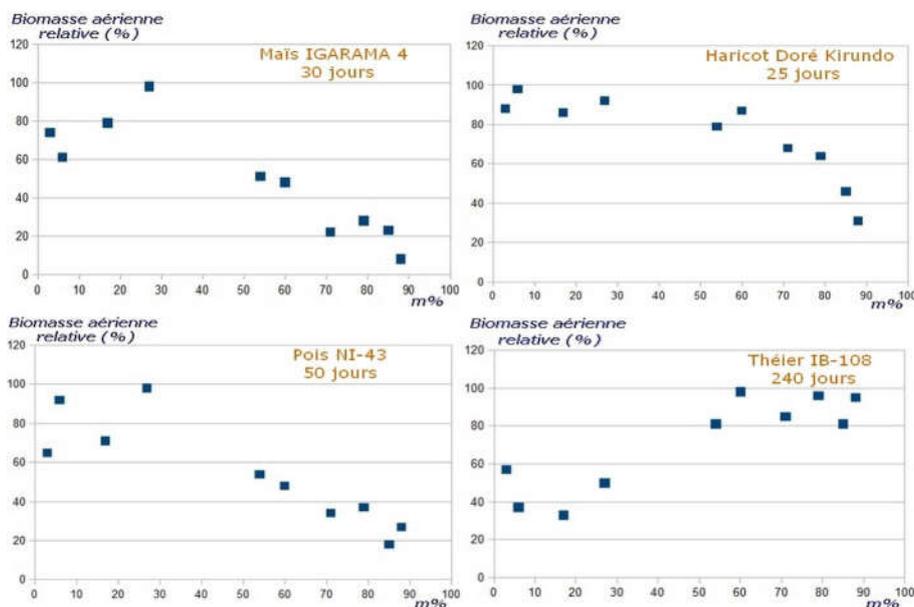
#### 4.3.1. Sensibilités des espèces en vases de végétation

Comme indiqué au cinquième sous-paragraphe 3.3.3, la séquence d'aluminisation constituée de dix sols à Gisozi au Burundi a fait l'objet d'un macro-échantillonnage en 1986 d'environ 500 kg de terre prélevés entre 0 et 15 cm de profondeur afin d'explorer la sensibilité de plusieurs espèces et cultivars de l'Ager en vases de végétation. Le dispositif comprend pour chaque espèce ou cultivar des vases PVC de 5 dm<sup>3</sup> remplis de sol. Dans chacun d'eux sont plantés plusieurs graines en quatre répétitions, c'est-à-dire 40 vases par génotype. Un démarriage est effectué peu après la levée pour conserver de 2 à 15 plants/vase suivant les espèces. Aucun traitement particulier n'est appliqué si ce n'est des arrosages bihebdomadaires. Les biomasses aériennes sont récoltées, séchées et pesées après des durées de croissance très variables selon les espèces, de 25 à 240 jours. Le matériel végétal s'étend sur 23 génotypes dont 11 de céréales, 4 de légumineuses vivrières, 2 de pomme de terre, 4 de légumineuses fourragères, 1

de graminée fourragère et enfin 1 cultivar de théier. Les résultats sont publiés par OPDECAMP et al. (1988) sous forme d'une note technique de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU). La figure 4.3 en présente un échantillon représentatif pour 4 génotypes dont le théier (*Camelia sinensis*).



**Figure 4.2:** Schéma des mécanismes de résistance et tolérance à l'aluminisation d'après BRUNNER et SPERISSEN (op. cit.)



**Figure 4.3:** Biomasses aériennes moyennes et relatives produites en vases de végétation à partir de graines de quatre cultivars et espèces en fonction du taux d'aluminisation du sol, d'après les résultats de OPDECAMP et al. (1988)

La croissance juvénile des plantes semble d'abord stimulée par l'aluminisation puis progressivement inhibée au-delà d'un seuil optimal d'aluminisation. Pour le théier, ce seuil optimal n'est pas bien marqué, sa croissance semblant se stabiliser à un optimum dès 55-60% d'aluminisation. Les seuils optimaux calculés à titre indicatifs par une régression multiple de type parabole varient pour les autres génotypes de 0% (*Vicia sativa*) à 39% (*Arachis hypogea* et *Panicum maximum*). La variabilité interspécifique de la sensibilité à l'aluminisation du sol est

de prime abord plus importante que la variabilité intraspécifique. Le dispositif expérimental assez sommaire ne permet guère que de dégager des allures assez grossières ou des tendances, mais celles-ci sont tout de même obtenues avec une dizaine de taux d'aluminisation croissants. Ils sont assez progressifs si l'on excepte une lacune entre 30 et 55%.

SIVASUBRAMANIAM & TALIBUDEEN (1971) ont réalisé une double expérimentation avec le théier, également en vases de végétation mais avec un seul échantillon de sol de pH initial égal à 3,95. Des petits et grands plants y ont été cultivés pendant 6 mois avec des apports tous les 2 jours de solutions combinant 2 concentrations de  $K_2SO_4$  (20 et 400  $\mu M$ ) avec 4 concentrations de  $Al_2(SO_4)_3$  (0, 50, 125 et 250  $\mu M$ ) et un apport général hebdomadaire de 10 mg d'azote par vase sous forme de  $(NH_4)_2SO_4$ . Des effets négatifs hautement significatifs se manifestent sur la biomasse produite avec les apports les plus élevés en  $Al^{3+}$ . Un effet positif d'apport de potasse est alors observé. Une tendance bénéfique de l'apport d' $Al^{3+}$  se dégage cependant pour les concentrations plus faibles dans le groupe des petits plants, ce qui pourrait signifier qu'un seuil optimum existerait aussi chez le théier. Les mesures des teneurs en Al et K de la première feuille indiquent une compétition dans l'absorption de ces 2 éléments. Après les 6 mois de culture sans apports extérieur de phosphore, les auteurs observent par contre une corrélation hautement significative entre l'absorption de P et Al chez les petits plants.

Une deuxième expérimentation prolonge ensuite la première pendant 4 mois avec cette fois un apport extérieur de 0,5 gr de P/vase soit sous forme de phosphate d'inositol (phosphate organique cyclique à 6 atomes de carbone) soit sous forme de monophosphate de sodium ( $NaH_2PO_4$ ). Aucun effet particulier n'est obtenu avec le phosphate d'inositol, mais le monophosphate produit une forte augmentation de l'absorption d'aluminium dans la première feuille mature. Les auteurs suggèrent l'absorption d'un complexe moléculaire Al-P avec un rapport Al/P de 1, de charge faible ou nulle. L'aluminium serait ensuite chélaté par des acides organiques et des flavonols comme déjà signalé dans les mécanismes de résistance.

L'effet stimulant de l'aluminisation des sols sur la croissance pourrait donc être attribuée à une amélioration indirecte de l'absorption du phosphore. Une remarque importante s'impose alors, à savoir que la réduction des teneurs en phosphore total et "Olsen-Dabin" dans la séquence Gisozi aux taux d'aluminisation les plus élevés (figure 3.6) ne signifie aucunement sa moindre disponibilité pour le théier. Les dosages du phosphore dans le sol en perdraient alors beaucoup de leur valeur indicative en matière de nutrition minérale.

PAVAN et al. (1982) explorent la sensibilité du caféier (*Coffea arabica*) sur base d'une expérimentation de la croissance durant 7 mois de plantules germées. Le dispositif porte sur 6 sols échantillonnés entre 0 et 30 cm de profondeur dans le Sud brésilien et placés en vases de végétation. Un chaulage est également opéré avec du calcaire ( $CaCO_3$ ) en plusieurs doses ainsi que des traitements avec du  $MgCO_3$  et du gypse ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ). Un apport NPK complète ces traitements. Une analyse foliaire et des sols est également réalisée au terme de l'expérience. Les 6 sols utilisés ont des pH ( $H_2O$ ) au départ compris entre 4,0 et 4,3. Leur taux d'aluminisation varie entre 37 et 79%. Leur texture est argileuse pour 4 d'entre-eux. Un sol est constitué d'un sable limoneux et le dernier d'un limon sablo-argileux (triangle textural USDA). Du point de vue minéralogique, la kaolinite est largement dominante tandis que l'hématite et la gibbsite sont également présentes.

Au niveau des résultats sur les sols, des augmentations de pH, des réductions de l'aluminium et des augmentations de calcium ou magnésium échangeables sont évidemment enregistrées suite aux traitements de  $CaCO_3$  et  $MgCO_3$ . Mais le traitement au gypse réduit aussi l'aluminium échangeable et induirait une formation d'une paire d'ions avec le sulfate, à savoir  $AlSO_4^+$ . Quant aux effets sur la croissance du caféier, des seuils critiques d'aluminisation compris en 3 et 25% après traitements sont calculés sur base statistique. Ces seuils varient d'un sol à l'autre mais si ils sont rapportés à la concentration correspondante de l'aluminium en solution du sol, ils se rapprochent dans une fourchette comprise entre 7,0 et 12,7  $\mu M$ . Il se dégage par ailleurs une excellente corrélation positive (0,98\*\*\*) entre l'activité (fonction de la concentration selon le degré de dilution) de l'aluminium en solution du sol et sa concentration foliaire mesurée à la fin de l'expérience. Cette concentration atteint 225 ppm pour l'activité la

plus élevée d' $Al^{3+}$  et entre 62 et 100 ppm pour le seuil critique. S'il existe un seuil critique au-delà duquel la croissance est significativement inhibée, sa stimulation en-deçà de ce seuil n'est cependant pas diagnostiquée. La formation d'un complexe Al-P en solution est cependant prédite d'après les calculs du programme GEOCHEM de spéciation de l'ion  $Al^{3+}$ . Le caféier *arabica* apparaît ainsi comme une espèce assez sensible surtout en comparaison avec le théier qui est une plante carrément accumulatrice.

#### 4.3.2. Sensibilités des espèces en solutions de culture

KONISHI et al. (1985) ont également étudié en solutions de culture les interactions Al-P avec des boutures de plants de théier âgés d'un an. Les plants sont soumis durant près de 4 mois aux 4 niveaux de concentration en aluminium de 0, 200, 400 et 800  $\mu M$  avec un niveau de 100  $\mu M$  de P et à 5 niveaux d'aluminium de 0, 800, 1.600, 3.200 et 6400  $\mu M$  avec un niveau de 800  $\mu M$  de P. A la fin de l'expérimentation les feuilles, tiges, racines et jeunes pousses de feuille sont récoltées séparément pour analyse. Une croissance optimale est obtenue avec une concentration de 400  $\mu M$  en Al à 100  $\mu M$  de P et de 1.600  $\mu M$  en Al à 800  $\mu M$  de P. Un effet stimulant de l'aluminium sur la croissance est diagnostiqué ainsi qu'une interaction positive entre P et Al. L'aluminium accroît également l'absorption de l'azote dans les jeunes pousses et celle du potassium dans les racines. Mais un antagonisme est observé entre Al d'une part et Ca et Mg d'autre part. TSUJI et al. (1994) ont travaillé avec des repousses racinaires stérilisées de boutures de plants de théier en solutions de culture sur la synergie Al-P dans la croissance racinaire. Celle-ci est confirmée et les auteurs l'attribuent à l'exsudation de protons favorisant la dissolution d'un précipité aluminophosphaté apparu à la surface des racines. Un intéressant complément d'information est apporté par les travaux de TOLRA et al. (2011) qui démontrent l'accumulation préférentielle d'aluminium dans la paroi cellulaire de l'épiderme foliaire du théier par fluorescence de rayons X à faible énergie. Ils constatent aussi son passage possible dans le symplasme par sa présence détectée en faible quantité dans le phloème. La translocation de l'aluminium des racines aux feuilles se ferait par le flux évapotranspiratoire via le xylème sous forme chélatée avec le citrate.

Un article clé pour d'autres espèces est celui de OSAKI et al. (1997) qui travaillent avec des solutions de culture contenant de l'aluminium sous forme de sulfate et du phosphore sous forme de monophosphate de sodium à saturation réciproque pour qu'un précipité Al-P apparaisse, retiré de la solution par filtration. Ces chercheurs font croître en aquaculture durant 2 à 4 semaines 13 espèces de plantes au départ de graines germées avec 3 concentrations en  $Al^{3+}$ : nulle (0 ppm), faible (3 ppm) et élevée (15 ppm). D'après les résultats obtenus, les 13 espèces sont classifiées selon leur sensibilité à  $Al^{3+}$ .

L'orge (*Hordeum vulgare*) s'avère très peu résistant (faible potentiel d'exclusion), sa croissance étant inhibée à faible concentration d'aluminium. Quatre espèces s'avèrent moyennement sensibles dont le sarassin (*Fagopyrum esculentum*) à potentiel modéré d'accumulation. Les trois autres sont reconnus pour leur potentiel modéré d'exclusion, à savoir *Stylosanthes guianensis*, *Leucaena leucocephala* et *Ischaemum barbatum*.

Les huit autres espèces testées sont considérées comme insensibles à l'aluminium et même pour la plupart stimulées par celui-ci. Trois de ces espèces agiraient par exclusion assez forte: le riz (*Oryza sativa*), le cajepulier (*Melaleuca cajuputi*) et *Acacia mangium*. Trois autres par accumulation dans les racines, sans pouvoir en préciser la localisation: la canneberge d'Amérique (*Vaccinium macrocarpon*), l'herbe du Congo (*Brachiaria ruziziensis*) qui est tolérante mais pas vraiment stimulée et *Polygonum sachalinense*. Enfin, deux espèces accumulatrices à la fois dans les racines et les feuilles: l'hortensia (*Hydrangea macrophylla*) et le Rhododendron de Singapour (*Melastoma malabathricum*). Les auteurs observent que la plupart des espèces stimulées par l'aluminium bénéficient d'une absorption accrue de N, P et K avec une mention particulière pour le phosphore. C'est remarquable pour le Rhododendron de Singapour dont la teneur en phosphore des organes d'avère extrêmement faible en absence d'aluminium. Cette dernière espèce a fait l'objet également d'une étude comparative avec l'orge par WATANABE et al. (2005) et toujours en solution de culture. Ils observent chez le Rhododendron de Singapour une stimulation de la croissance et de l'absorption du phosphore mais pas de l'azote ou du potassium. Par contre, chez l'orge l'aluminium inhibe sa croissance de même que l'absorption de N, P et K.

Pour toutes les espèces de *Eucalyptus* étudiées par SILVA et al. (op. cit.), un effet bénéfique sur l'élongation racinaire est observé pour des concentrations faibles à modérées d'aluminium en solution de culture mais sans rechercher un lien éventuel avec l'absorption du phosphore.

Le Rhododendron de Singapour et le roseau de Chine (*Miscanthus sinensis*) sont deux espèces adaptées aux sols sulfatés acides. Des illustrations photographiques en sont représentées dans la [figure 4.4](#). Ces espèces ont été cultivées avec des solutions en présence non seulement de concentrations croissantes en aluminium mais également en fer par WATANABE et al. (2006). Il s'avère que si le Rhododendron est sensible au fer ferreux en l'absence d'aluminium, il y devient tolérant en sa présence en forte concentration. Ce dernier agirait de manière antagoniste mais les mécanismes restent méconnus. Par contre, le roseau de Chine tolère à la fois de hautes concentrations en fer ferreux et en aluminium.

Pour le riz cultivé en sols sulfatés acides, ALIA et al. (2015) démontrent que durant une croissance hydroponique de plantules de 14 jours, à concentration croissante (0, 20, 40, 60, 80 and 100  $\mu\text{M}$ ) de  $\text{Al}^{3+}$  ou de  $\text{Fe}^{2+}$  et sans ajout de nutriments, une toxicité aluminique et ferreuse se marque ainsi qu'une conjugaison des deux. Elles s'expriment par une nette inhibition de la croissance racinaire et est réduite si l'on augmente le pH de la solution hydroponique. Le mécanisme de résistance du riz est cependant mis en évidence par l'exsudation d'acides organiques (citrique, oxalique, malique). Cet effet est confirmé lorsque la solution hydroponique est constituée par de l'eau prélevée (pH de 2,98) dans un sol sulfaté acide de riziculture au Nord-Est de la péninsule Malaise et qui est fortement aluminisé ( $m > 95\%$ ) sur une profondeur de plus de 65 cm.

Chez le riz toujours, l'effet de l'aluminium sur sa nutrition minérale et sa production de biomasse a été étudiée par TANG VAN HAI et al. (1989). Ils utilisent des solutions de culture très diluées pour simuler au mieux les conditions de la solution du sol. Des plantules de riz de 3 cultivars obtenus après germination sont placés par groupes de 5 dans un dispositif de culture en phytotron avec 8 concentrations croissantes en Al de 0 - 1 - 2 - 3 - 5 - 10 - 20 et 40 ppm qui produisent respectivement des biomasses sèches de 3,25 - 3,8 - 4,4 - 4,5 - 4,5 - 3,8 - 2,1 et 1,4 en gr par 5 plants pour le cultivar B6044 après 65 jours de croissance. Une stimulation est clairement observée jusqu'à une concentration comprise entre 3 et 5 ppm d' $\text{Al}^{3+}$ , suivie d'une inhibition au-delà de cet optimum qui devient forte dès qu'on atteint 20 ppm. Cette même allure est reproduite quant à l'absorption du phosphore. Trois niveaux de phosphate de 1, 3 et 5 ppm sont également testés. Ces 3 concentrations ne modifient pas l'allure de la réponse à l'aluminium sauf un élargissement du "pic" optimum et une augmentation significative des biomasses produites. L'absorption du phosphore par les plants de riz s'en trouve également nettement augmentée ainsi que celle du potassium. Un effet plus surprenant est la nette augmentation de l'absorption de l'aluminium à dose croissante de phosphore. Les auteurs citent nombre d'études antérieures sur de nombreuses espèces relatant un effet physiologique stimulant de l'aluminium avant que ne se manifeste sa toxicité. La stimulation concomitante de l'absorption du phosphore jusqu'au seuil critique est aussi rapportée dans la littérature citée par ces auteurs et suggère que l'aluminium et le phosphate entrent passivement dans les racines sous forme d'un complexe de faible charge tel que l'avaient suggéré déjà SIVASUBRAMANIAM & TALIBUDEEN (op. cit.) pour le théier.

Le riz a fait aussi l'objet d'une étude récente et assez pointue de MORENO-ALVARADO et al. (2017) en utilisant 4 cultivars mexicains. L'étude comporte d'abord une germination des graines sur milieu de culture artificiel puis le transfert des plantules dans une solution de culture (pH 5,5) pendant 13 jours. Ensuite, la culture des plants en solution se poursuit avec ou sans exposition à l'aluminium à 200  $\mu\text{M}$  (pH 4,2) pendant 20 jours. Cette concentration est choisie en fonction des résultats d'un test préliminaire d'exposition à des concentrations croissantes de 0, 25, 50, 100, 200 et 400  $\mu\text{M}$  qui a révélé un effet stimulant systématique sauf pour deux cultivars inhibés à 400  $\mu\text{M}$ . Un échantillonnage de plants pour profilage des gènes NAC est opéré avant l'exposition ainsi que 24h après cette exposition à l'aluminium. NAC est un acronyme qui désigne 3 facteurs de transcription impliqués dans les processus de croissance et de développement en réponse à des signaux environnementaux biotiques ou

abiotiques. Les facteurs de transcription sont des protéines qui se lient de manière spécifique à des séquences d'ADN et contrôlent ainsi le degré de transcription de leur information génétique vers l'ARN messager. Ces protéines agissent seules ou en groupe complexe par activation ou inhibition du recrutement de l'ARN polymérase au niveau de certains gènes.



*Figure 4.4: Illustrations de deux espèces tolérantes à de fortes concentrations simultanées d'aluminium et de fer ferreux dans les sols sulfatés acides (Photos: Fotolia): Miscanthus sinensis ou Roseau de Chine (A & B), Melastoma malabathricum ou Rhododendron de Singapour (C & D)*

Après les 20 jours de culture avec ou sans exposition, la croissance et la biomasse est mesurée ainsi que notamment les teneurs des tissus en Al, P, K, Ca et Mg, en chlorophylle a et b, en acides aminés totaux, en proline et en sucres solubles totaux. La stimulation de la croissance du riz par la concentration choisie est bien confirmée et statistiquement significative tant sur la taille que sur la biomasse des racines et des parties épigées où le tallage est favorisé. La stimulation de croissance s'avère particulièrement forte (>90%) pour les racines des 4 cultivars. Les concentrations en chlorophylles a et b sont également plus élevées grâce à l'aluminium à l'exception d'un cultivar sur les quatre. Aucun effet stimulant n'est détecté sur les teneurs en acides aminés, alors que celles des sucres libres totaux augmentent. Au niveau racinaire, les concentrations en Al sont toutes nettement marquées (de l'ordre de 600 ppm dans ces racines) par l'exposition alors qu'elles sont quasi nulles sans ce traitement. Les teneurs en azote ne sont pas modifiées. Les concentrations en P et K sont augmentées, celles en Ca et Mg sont peu ou non affectées.

Au niveau des pousses aériennes, une tendance à l'augmentation de l'aluminium se marque mais elle reste non significative du point de vue statistique: de l'ordre de 600 ppm dans les racines, on tombe à 30-50 ppm. La présence d'aluminium dans les parties aériennes sans exposition peut être due à sa présence en traces dans la solution de culture ou dans les graines. Il n'y a pas non plus à ce stade de développement juvénile du tallage d'effet significatif sur N, P, K et Ca. Seule la teneur en Mg est significativement plus élevée pour 2 cultivars sur 4 après une exposition à l'aluminium. Pour les nutriments, les auteurs confirment la synergie Al-P et l'effet positif de  $Al^{3+}$  sur l'absorption de P au niveau racinaire sans qu'il ne se répercute sur les pousses aériennes. Enfin, la modification de l'expression de 25 gènes NAC sur 57 est observée suite à l'exposition de 24h à l'aluminium et semblent donc influencés par cet élément.

Une revue récente par BOJÓRQUEZ-QUINTAL et al. (2017) des effets de l'aluminium sur la croissance des plantes mérite enfin d'être citée. Elle confirme et complète plus avant les informations et données évoquées dans ce point et notamment ceux relatifs aux effets stimulants de l'aluminium sur la croissance d'arbres comme *Tabebuia chrysantha* (arbre

national du Venezuela), *Betula pendula* (bouleau blanc) et *Quercus serrata* (Chêne japonais).

### 4.3.3. Discussion

Les résultats des travaux passés en revue peuvent s'interpréter de manière cohérente. L'aluminisation provoque une co-précipitation du phosphore avec l'aluminium dans le sol et est aussi observée en solution de culture. La plupart sinon toutes les espèces peuvent dissoudre ce précipité Al-P par exsudation d'acides organiques et favoriser ainsi indirectement l'absorption du P solubilisé parallèlement avec l'aluminium sous forme d'un complexe Al-P. Lorsque la concentration de ce dernier devient critique, un effet toxique réduit alors la croissance. Ce phénomène phytobiologique est sous contrôle génético-cellulaire et connaît des expressions d'intensité très variables d'abord selon les espèces et ensuite selon les variétés via des facteurs de transcription sensibles à des signaux biotiques et abiotiques (NAC) et agissant au niveau de "loci de traits quantitatifs". La variabilité phénotypique du taux critique d'aluminisation sur la croissance des espèces et variétés observées se trouve ainsi assez simplement expliquée.

Il faut cependant considérer la critique générale du dogme faisant correspondre un trait à un caractère, telle que réalisée par SUING (op. cit., p. 27) : *"Les facteurs de transcription censés réguler l'expression des gènes, soit sont introuvables, soit s'accrochent en fait partout sur l'ADN sans aucune sélectivité pour tel ou tel gène"*.

Il faut aussi rester prudent sur toute vision disjonctive entre exclusion et accumulation, entre concentration apoplastique ou vacuolaire d'une part et chélation symplastique ou translocation des racines aux feuilles d'autre part. Au même titre, il faudrait garder la possibilité d'absorption directe de complexes Al-P cationique telles que  $[\text{AlH}_2\text{PO}_4]^{2+}$  et  $[\text{Al}(\text{OH})(\text{HPO}_4)]^+$  suggérées par SIVASUBRAMANIAM & TALIBUDEEN (op. cit.) parallèlement à celle d'une absorption séparée d'espèces ioniques telles que  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et  $\text{HPO}_4^{2-}$  via des canaux protéiques cationiques pour les uns et anioniques pour les autres.

Les espèces accumulatrices concentrent l'aluminium pour une partie dans les feuilles. Un changement de ligand dans le symplasma racinaire peut s'opérer lors de la translocation vers les feuilles: c'est le cas du sarrasin où le chélate Al-oxalate racinaire se transforme en chélate Al-citrate lors de la translocation puis à nouveau en chélate Al-oxalate pour se concentrer alors dans les vacuoles de ses cellules foliaires. Chez le théier, plusieurs ligands sont aussi évoqués mais la concentration s'opère principalement dans la paroi cellulaire de l'épiderme foliaire. Le riz présente des mécanismes assez efficaces de résistance par exclusion non seulement à l'égard de l'aluminium mais aussi du fer ferreux, ce qui lui permet d'être cultivé en régime hydromorphe et en sols sulfatés acides des littoraux.

## 5. Dynamiques écologiques de l'aluminisation

### 5.1. Niveaux d'espace-temps écologiques

#### 5.1.1. Changement d'échelle spatio-temporelle

Passer d'une étude de phytobiologie de l'aluminisation au laboratoire ou sous abri de serre à des habitats naturels et paysages géomorphologiques, c'est accomplir un changement d'échelle considérable dans le niveau d'organisation des interactions systémiques.

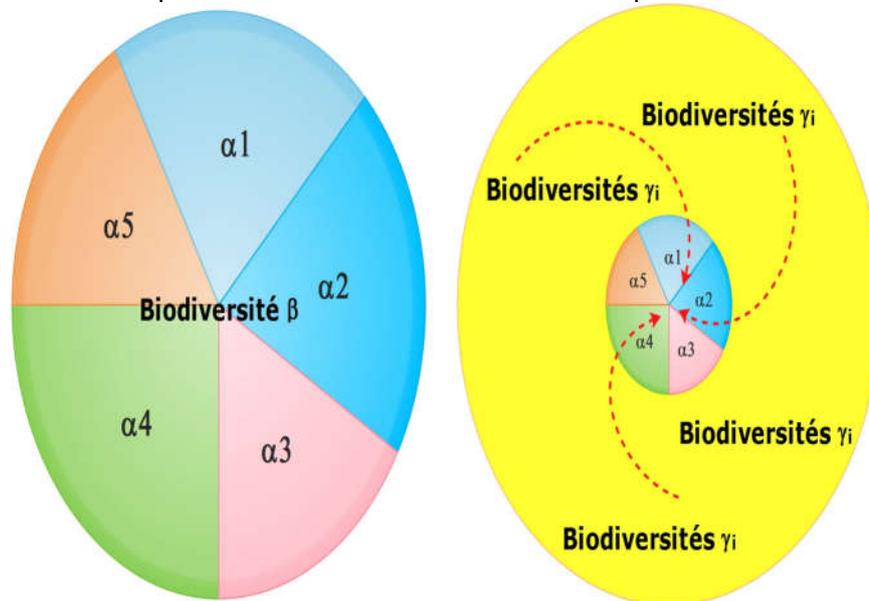
Dans le temps d'abord, car l'aluminisation dans les biotopes et l'évolution des espèces selon leurs niches sont plus ou moins synchrones mais leurs vitesses ne sont pas constantes et varient selon les populations, les communautés, les conditions géomorphologiques et climatiques. Elles exigent la prise en compte de temporalités tantôt géologiques sur des millions d'années (Ma) ou tantôt morphoclimatiques sur des milliers d'années (Ka). Elle peuvent revêtir un caractère soudain suite à des catastrophes ou cataclysmes telles que des éruptions volcaniques ou des chutes de météorites. Tout comme l'évolution des espèces et des communautés, l'acidification et l'aluminisation des sols ne se déroulent pas de manière linéaire. Des accélérations et ralentissements ont lieu au gré de l'orogénèse, des cycles d'érosion et des pulsations climatiques qui y sont associées.

Dans l'espace ensuite, car d'un système fermé au laboratoire, l'écologie de l'aluminisation nous fait passer à un système largement ouvert. Le volume de quelques dm<sup>3</sup> de sol utilisé en vases de végétation s'accroît considérablement jusqu'à plusieurs milliers de m<sup>3</sup> dans le moindre petit biotope. Ce volume acquiert de la sorte des traits et caractères topographiques et climatiques dont la variabilité induit une hétérogénéité dans la géométrie tridimensionnelle des biotopes et à fortiori des écozones encore beaucoup plus vastes. De quelques individus en serre on passe aussi à des populations et à des communautés d'espèces qui amènent à prendre en considération la biodiversité dont la tendance naturelle est de s'accroître tant dans l'espace que dans le temps. La dynamique de la biodiversité " $\gamma$ " (gamma) en tant que réservoir biogéographique d'espèces potentiellement disponibles en dehors d'un biotope ou habitat donné, peut interférer avec sa biodiversité " $\alpha$ " (alpha) propre à la communauté d'espèces du biotope considéré. Enfin et conformément aux sens donnés notamment par HAINZELIN et NOUAILLE (2013) ainsi que par JAMONEAU (2010), on doit également impliquer la biodiversité " $\beta$ " (bêta) en tant que nombre de communautés c'est-à-dire aussi de biotopes d'une zone donnée. Ce sont donc des notions relatives du point de vue géographique. Une représentation schématique de ces trois types de biodiversités est présentée dans la [figure 5.1](#). MARCON (2015) précise qu'il n'existe pas d'échelle stricte d'observation des biodiversités  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ .

#### 5.1.2. Niche et biotope

Aux niveaux d'organisation systémique de la complexité écologique, la notion de "hypervolume" est introduite par HUTCHINSON (1957), en référence à la théorie de la niche écologique. COLWELL & RANGEL (2009) discutent de la conceptualisation de la dualité de HUTCHINSON entre espace de niche et espace de biotope. Pour HUTCHINSON, à chaque espèce ou population ne correspond qu'une seule niche dans l'espace des niches (sauf polymorphisme évolutif). La dynamique d'évolution et la diversité des valeurs abiotiques de l'hyperespace écologique offrent par ailleurs des opportunités de conditions environnementales, de ressources et de gradients d'adaptation telles qu'aucune niche vide ne devrait exister. JAMONEAU (2010) formule la définition d'une niche comme "*un hypervolume au sein d'un espace multidimensionnel, dont les axes représenteraient autant de gradients d'une variable abiotique (ou ressource)*". La niche est délimitée ainsi par des intervalles de valeurs de " $n$ " variables abiotiques et définit ainsi un hyperespace écologique particulier. COLWELL & RANGEL (op.cit.) précisent que pour HUTCHINSON chaque point d'espace de niche

peut être associé à plusieurs points d'espace d'un biotope. Une même zone de niche peut ainsi être présente en divers emplacements d'un biotope. Par ailleurs, tous les points d'une niche ne sont pas forcément représentés dans un biotope donné. Une même espèce peut donc se retrouver dans plusieurs biotopes, mais au sein de chaque biotope il peut subsister des espaces de niche libres. Tout l'hyperespace écologique ou hypervolume d'une espèce n'est donc pas forcément occupé au sein de l'ensemble constitué par tous les biotopes de la planète.



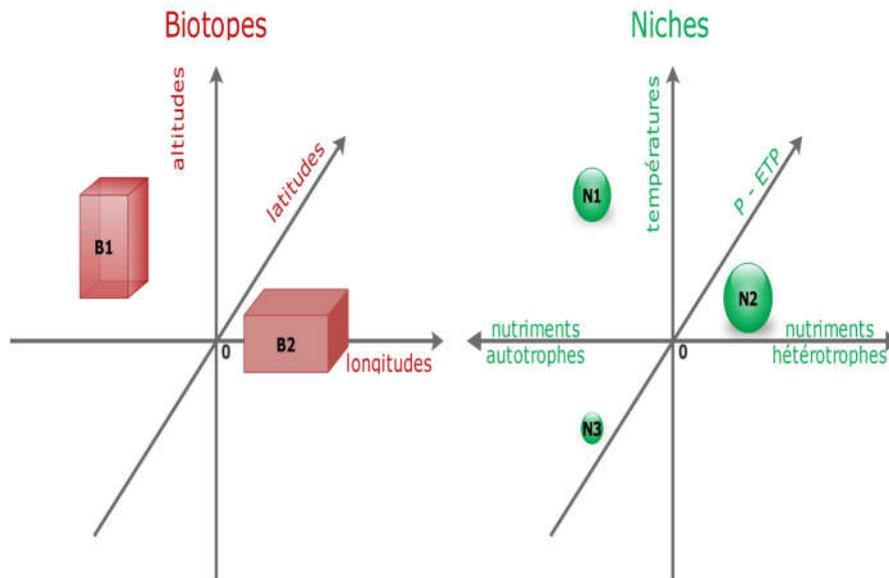
*Figure 5.1: Présentation schématique des trois types de biodiversités dans une zone de biodiversité  $\beta$  à 5 biotopes de biodiversités  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  et  $\alpha_5$  (à gauche) au sein d'une écozone réservoir régionale des biodiversités  $\gamma_i$  correspondantes (en jaune, à droite)*

La [figure 5.2](#) représente les axes dimensionnels des biotopes et ceux volontairement réduits et simplifiés des niches (des "n" variables") à un temps donné. L'évolution interactive des biotopes et des niches constitue alors un fait fondamental de la dynamique évolutive.

HUTCHINSON distingue, au sein de l'espace de niche, la niche-R avec interactions entre les espèces (niche réalisée) et la niche-F sans interactions (niche fondamentale). La prise en compte des interactions interspécifiques dans la niche-R est celle des facteurs dits "bionomiques" qui œuvrent au sein de l'espace physique des biotopes: relations producteurs primaires et consommateurs secondaires, prédateurs et proies, partenariats mutualisés, compétition interspécifique, etc. Ces interactions bionomiques sont captées dans des biotopes dans l'espace de niche-R. Mais, il n'y a pas de réciprocity complète dans la dualité entre la niche-F et les biotopes. La niche-R contient l'ensemble des biotopes où l'espèce envisagée est présente. La niche-F est plus vaste et correspond à un potentiel de réalisation qui n'est sans doute jamais atteint d'après les trois causes citées par COLWELL & RANGEL (op.cit.): (1) il existe des barrières physiques (reliefs, océans, zones climatiques, etc.) à la dispersion des espèces, (2) certaines zones d'une niche fondamentale ne se retrouvent à aucun endroit de biotope contemporain, (3) l'espace géographique potentiel d'une niche est tronqué par des facteurs bionomiques (exclusions interspécifiques).

REINEKE et al. (2016) ont étudié la variation géographique de la configuration des niches-R selon leur axe du pH(KCl) du sol entre 0 et 10 cm de profondeur et dans un intervalle expérimental de 2,8 à 6,0 établi au niveau de 1458 parcelles forestières. Cet intervalle de pH devrait s'étendre de sols fortement aluminisés jusqu'à des sols neutres à calcaires. En effet, à défaut d'avoir des données permettant d'établir le taux d'aluminisation, il faut tenir compte que le pH(KCL) est inférieur au pH(H<sub>2</sub>O) d'environ une unité et cette différence s'amenuise normalement pour les pH les plus acides. L'aire biogéographique concernée s'étale selon un gradient latitudinal sur 4 zones comprises entre le nord de la France et la limite boréo-némorale suédoise correspondant à peu près au biome des forêts tempérées caducifolées. Les niches-R sont celles de 42 espèces sélectionnées dans le sous-étage herbacé. La configuration d'une niche-R est déterminée par sa position qui est le pH<sub>optimum</sub> auquel se mesure la fréquence maximale d'occurrence de l'espèce. La configuration dépend aussi de la

largeur qui est l'intervalle des pH situés de part et d'autre du  $pH_{optimum}$  et où cette occurrence tombe en-dessous de 25% des parcelles dans chaque zone. Les auteurs ont distingué des plantes "acidophiles" ( $pH_{optimum} < 4$ ) et des plantes "neutrophiles" ( $pH_{optimum} > 5$ ), ainsi que des espèces intermédiaires ( $pH_{optimum}$  compris entre 4 et 5). Les analyses des données montrent un retrait des espèces neutrophiles des biotopes acides à latitude croissante c'est-à-dire lorsqu'elles se rapprochent de la marge environnementale Nord, mais sans avoir pu établir leur extension vers les biotopes basiques de  $pH(KCl) > 6$  vers le Sud, faute de données appropriées. Les résultats établissent aussi une expansion des espèces acidophiles vers les biotopes basiques à latitude croissante due sans doute à une cause bionomique de moindre compétitivité avec les espèces neutrophiles.



*Figure 5.2: Axes dimensionnels des biotopes et des niches (axes limités). Les biotopes B1 et B2 sont délimités par deux espaces géographiques. B1 est limité par deux latitudes Nord (positives), deux longitudes Ouest (négatives) et se déploie entre deux altitudes positives correspondant sans doute à des collines tropicales de moyenne altitudes telles qu'on pourrait en trouver dans les îles des Caraïbes comme Cuba ou Haïti et la République Dominicaine. Le deuxième biotope B2 se situe dans l'hémisphère Sud entre de faibles latitudes (négatives), dans un intervalle de longitudes Est assez conséquent mais de faibles altitudes en partie négatives (sous le niveau de la mer). Il s'agirait des parties les plus basses de la cuvette centrale congolaise de RDC et de l'estuaire du fleuve Congo incluant certaines zones inondées par l'Atlantique. Le parc marin des Mangroves fait partie intégrante de ce biotope B2. Les niches N1, N2 et N3 sont représentés dans un hyperespace écologique selon les variables de températures, de bilans hydriques entre les précipitations annuelles (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP), et de composition en nutriments minéraux (autotrophes) ou organiques (hétérotrophes). L'espèce ou la population autotrophe N3 survit dans des conditions glaciales polaires ou boréales probablement dans le pergélisol ou permafrost et avec un intervalle assez précis d'éléments minéraux nutritifs. La population de la niche N1 est un producteur primaire autotrophe qui vit en conditions subtropicales humides. Quant à celle de la Niche N2, elle se constitue d'individus consommateurs secondaires (hétérotrophes) sous des climats tempérés semi-humides.*

### 5.1.3. Temporalités ante-préhistoriques de l'écosphère

La biosphère et les sols interagissent en permanence et de manière indissociable. La macroévolution biologique s'est déroulée de manière parfois spectaculaire à l'échelle de temps géologique de quelques millions à plusieurs milliers de millions d'années (Ma). Cette évolution devient déjà plus discrète à l'échelle des cycles morphoclimatiques qui se déroulent selon une temporalité plus courte, de l'ordre de milliers d'années (Ka). L'édification des grands reliefs lors des orogénèses liées aux rencontres des plaques continentales et les grands changements climatiques sont associées ainsi à des phénomènes macro-évolutifs de la biosphère tels que les

extinctions massives brièvement rappelées au tableau 4. La tectonique des plaques et les changements profonds qu'elle induit dans les courants maritimes sont reconnus comme étant à la base de grands bouleversements climatiques et géomorphologiques (BERGOEING, 2004). Le volcanisme est généré également par la tectonique des plaques et les mouvements convectifs du magma dans le manteau sous la croûte terrestre continentale ou océanique. Pour les éruptions de super-volcans, une extinction d'espèces aboutit à une disparition de niches écologiques compensée ensuite par une apparition de nouveaux règnes vivants, classes, ordres, familles, genres et espèces et donc aussi de nouvelles niches. Les biotopes distants de l'éruption peuvent être temporairement modifiés par chute de luminosité tandis que les biotopes proximaux sont durablement modifiés par l'épaisseur des dépôts de cendres ou de lave. Ces manifestations sont cependant brutales de même que la chute de météorites de grande masse comme le *Chicxculub* à l'endroit de ce qui correspond aujourd'hui au Golfe du Mexique. BERGOEING (op. cit.) précise que son diamètre dépassait les 10 km et que sa vitesse à l'impact était de 10 km/sec. Selon cet auteur, la cinquième extinction massive qui en résulta se serait quand même déroulée sur plusieurs millions d'années au cours desquelles survécurent les mammifères.

*Tableau 4. Géochronologie de l'apparition de la biosphère et de ses cinq extinctions massives, adapté de BARNOSKY et al. (2011), conventions de sigles: BP = before present (avant aujourd'hui), Ma = millions d'années*

Ère géologique	Datation	Événements
Précambrien	4.000 Ma BP	Émergence marine de la vie sous forme bactérienne
Primaire	440 Ma BP	Extinction massive n°1 (marine) du fin Ordovicien
	360 Ma BP	Extinction massive n°2 (marine animale) du fin Dévonien
	250 Ma BP	Extinction massive n°3 (marine et terrestre) du fin Permien
Secondaire	200 Ma BP	Extinction massive n°4 (marine et terrestre) du fin Trias
	65 Ma BP	Extinction massive n°5 (dinosaures + marine) du fin Crétacé

Au Tertiaire se déroule l'orogénèse alpine qui préside notamment à la formation des Pyrénées, des Alpes, de l'Oural et de l'Himalaya. La configuration actuelle des continents s'acquiert également. La macro-évolution durant cette ère comporte la radiation évolutive des mammifères et l'émergence africaine des hominidés australopithèques. Au Tertiaire des oscillations morphoclimatiques de grande amplitude ont eu lieu dont on a peu de traces en Europe. Elles sont rapportées dans les conclusions générales de ALEXANDRE-PYRE (1971) sous forme d'un cycle morphoclimatique de cuirassements latéritiques dans le haut plateau des savanes actuelles du Katanga méridional (RDC) recouverts d'un matériau sableux. La médiane du cycle évoqué est un climat semi-aride de steppe sous lequel dominant des phénomènes érosifs d'aplanissement. Il évolue dans le cycle vers un climat aride désertique où prédominent les apports éoliens de sable dunaire, un dépôt ferrugineux cuticulaire sur les cuirasses, une possible silicification en grès polymorphes et un ennoyage sédimentaire. Le retour du climat semi-aride de steppe poursuit l'aplanissement et évolue alors toujours le cycle précité vers un climat sub-humide de savane où se produit une altération d'épaisseur modérée. Remarquons enfin qu'une hydromorphie temporaire est nécessaire à l'individuation du fer.

Mais, c'est dans la temporalité pédologique que se différencient les profils d'altération des roches dures ou meubles à des vitesses très variables de l'ordre de plusieurs milliers d'années (Ka). Il a été convenu que l'aluminisation des sols ne s'enclenche que lorsque le pH (H<sub>2</sub>O) descend en-dessous de 5,5. Pour rappel, elle s'inscrit dans une trajectoire d'acidification sous un régime éoclimatique humide ou semi-humide en terre haute ainsi qu'en terre basse sous un régime d'hydromorphie temporaire ou permanente et à la condition que le milieu ne soit pas confiné du point de vue hydrologique. Selon l'âge initial d'un sol et son pouvoir tampon ainsi que selon le type de végétation, l'acidification jusqu'à pH 5,5 peut être relativement lente ou rapide. Il faut signaler cependant que le pH des sols sulfatés acides potentiels peut s'effondrer de plusieurs unités en quelques jours ou semaines suite à un drainage. Mais plus généralement, le temps qui s'écoule avant que l'aluminisation ne débute en surface et se

propage sur plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur peut se compter jusqu'à plusieurs dizaines de Ka en fonction notamment de l'amplitude spatio-temporelle des oscillations climatiques.

## 5.2. Hasards et nécessités de l'évolution

### 5.2.1. Le couple darwinien hasard/sélection

Au cours du point 3, l'intégration des processus biotiques et abiotiques au cours de l'acidification des sols et de leur aluminisation subséquente a été exposée. SUING (op. cit., p. 56) rappelle que Darwin désigne le couple hasard/sélection comme une loi descriptive de l'évolution. C'est le néodarwinisme qui en a fait le moteur de l'évolution et non Darwin lui-même. SUING dépasse ce couple avec les interactions entre matière vivante (biotique) et matière non-vivante (abiotique) pour expliquer une évolution nécessaire et réciproque de ces deux "matières". Cette idée s'inscrit parfaitement dans le cadre de cet ouvrage et peut s'étayer par de nouveaux développements.

SUING (op. cit., p.33 et suivantes) fonde le mouvement évolutif de la matière vivante d'abord sur une tendance à conserver sa structure dans le temps. Cette tendance est néguentropique en ce qu'elle s'oppose au mouvement désorganisateur de la matière en général selon la deuxième loi de la thermodynamique. Il existe donc un mouvement auto-correcteur permanent. Pour survivre et donc conserver sa structure "existentielle", il faut dès lors aussi changer à tous les niveaux et ce de manière de plus en plus efficace.

Au niveau cellulaire, lorsqu'un stress environnemental survient, les systèmes génétiques de correction des mutations accidentelles (SOS, SRM, etc, p.53) sont désorientés. Il y a alors opportunément une explosion de la variabilité, rendant opérationnel le couple darwinien hasard-sélection. Au niveau de l'organisme pluricellulaire, la conservation structurale est assurée par de nombreuses fonctions physiologiques: homéostasie, hémostasie, régénérations, immunité, etc. Elles œuvrent contre "*les morts cellulaires et les proliférations anarchiques en favorisant d'autres proliférations cellulaires mais aussi des morts cellulaires programmées.*" Ce sont ces mêmes mécanismes qui font changer la structure de l'organisme au cours de l'embryogenèse. La reproduction sexuée conserve aussi en quelque sorte la structure puisqu'elle est à l'origine des populations coexistant dans un même biotope. La coopération entre individus d'une population dans une superstructure ou charpente sociale favorise aussi l'intégrité structurale et la longévité de chacun.

Au niveau de la population enfin, il y a un polymorphisme des individus qui est à la base d'une *micro-évolution éloignant progressivement les populations successives du type moyen vers l'apparition de nouvelles espèces*. Ce polymorphisme qui pourrait conduire à l'apparition de formes trop différenciées est tempéré par la reproduction sexuée qui instaure une barrière reproductrice. Cependant, il existe des différenciations phénotypiques avantageuses (dimorphisme sexuel, castes des insectes sociaux, division du travail, etc.) ainsi que des macromutations profondes tels que les phénomènes de néoténie (conservation de caractères juvéniles, acquisition de la maturité sexuelle au stade larvaire) ou d'apomorphose, liés aux remaniements chromosomiques qui aboutissent à des bouleversements ontogénétiques dans le plan d'organisation du genre (niveau supérieur à l'espèce).

La variabilité des caractères phénotypiques se traduit par du "bruit" dans les populations qui peut constituer un avantage évolutif en cas de stress environnemental tel que rapporté par FRASER & KÆRN (2009). WEINSTEIN & PAVLIC (2017) rapportent que le bruit peut d'ailleurs constituer une clé pour assurer des transitions évolutives dans d'autres systèmes naturels dynamiques comme le climat et qu'il peut se manifester également comme facteur clé de changement social au niveau par exemple du comportement des individus d'une colonie de fourmis.

L'essentiel du mouvement évolutif de la matière vivante telle que conçue par SUING paraît ainsi résider dans le fait qu'un stress "environnemental" accélère la mutagenèse et amplifie le

polymorphisme. L'une des nouvelles formes (phénotype) s'avère adaptée à ce stress et ce n'est qu'ensuite que cette forme est sélectionnée. Les mutations s'amplifient en fonction de changements adverses dans les conditions du milieu mais elles ne sont pas orientées en soi. Les mutations s'avèrent alors nécessaires et non de simples fruits du hasard! Les mutations partiraient en quelque sorte dans tous les sens parce que la machinerie cellulaire est désorganisée. L'une ou l'autre des mutations induites peut s'avérer adaptée au stress en cause et sera ainsi sélectionnée à condition que ce stress soit durable!

On pourrait ajouter que la mutation pourrait passer par un stade épigénétique de régulation dans l'expression des gènes, un stade intermédiaire d'écotype avant de devenir à proprement parler "héréditaire". La [figure 5.3](#) est dès lors proposée comme schéma du moteur évolutif.

On peut comprendre alors que KUPIEC et SONIGO (2000, p.110) relativisent le rôle du génome en tant qu'essence ou programme de la matière vivante par rapport au phénotype qui formaliserait son existence. Ils citent à ce propos la critique de ATLAN (1972) qui "*consiste à mettre le maximum de causalité sur le deuxième terme...*". ATLAN considère ainsi que le "programme" serait situé en fait dans le cytoplasme et non dans l'ADN du noyau de la cellule. "*Sa théorie de l'auto-organisation par le bruit intègre le hasard, mais cet hasard provient de l'environnement*". Il est ainsi possible de concevoir que "*l'information de l'ADN ... correspondrait aux données, au contenu non aléatoire, fournies à ce programme cytoplasmique*" (ATLAN, 1995).

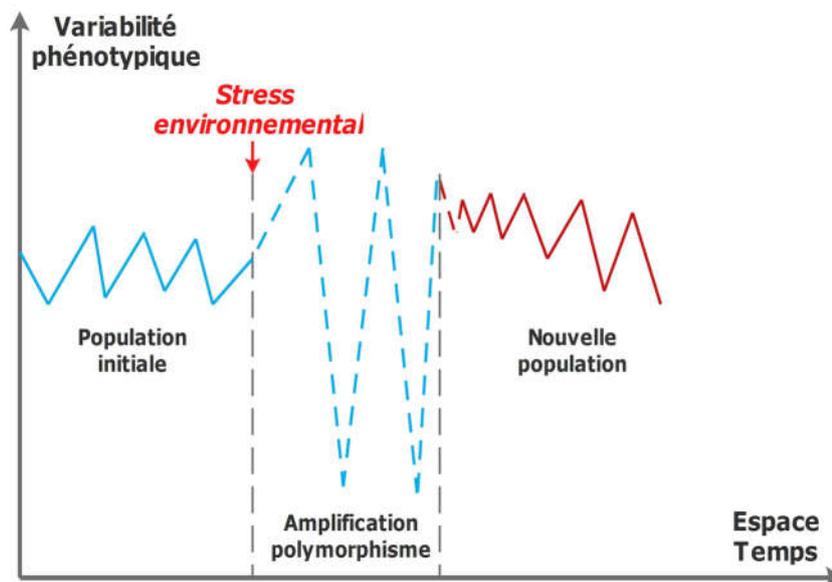


Figure 5.3: Schéma du moteur de la dynamique évolutive

Quant aux vitesses de l'évolution des espèces, elles peuvent être très variables et pas nécessairement très lentes. Ainsi, LALLENSACK (2018) rappelle que les écologues ont observé récemment des vitesses de spéciation très rapides, sur quelques générations, par interactions avec l'environnement, dans les niches réalisées ou simulées d'espèces comme les phasmes (*Timema cristinae*), les algues et leurs prédateurs rotifères lorsque les premières augmentent en diversité génétique, les pucerons, les puces d'eau, des poissons comme les épinoches, le petit poisson d'aquarium guppy (*Poecilia reticulata*), etc.

### 5.2.2. Dynamique spatiale de l'évolution

Si l'on agrée avec ATLAN que le hasard provient de l'environnement, considérer le biotope comme l'environnement du biote serait abusivement réducteur. Le biote et le biotope sont tous deux constitutifs de l'écosystème, s'y intriquent, y interagissent et y évoluent ensemble. Le stress évolutif ne peut donc provenir que d'une modification brutale adverse et durable du biotope pour le biote, ou lors de l'envahissement d'un autre biotope par une espèce qui y rencontrerait des conditions adverses via le flux migratoire et colonisateur de ses diaspores c'est-à-dire à la marge de sa niche-R (réalisée) ou en dehors de sa niche-F (fondamentale)

constituée par son hyperespace.

L'importance des flux migratoires des diaspores peut être illustrée par la recolonisation forestière des îles Krakatoa après l'éruption volcanique de 1883 et dont les diverses phases chronologiques sont décrites dans l'encadré 6. Il est toutefois probable que le transport involontaire de diaspores par l'homme ait perturbé ou accéléré cette recolonisation et qu'elle ne puisse pas être totalement qualifiée de "naturelle" comme aux temps ante-préhistoriques. Par ailleurs, la recolonisation lacunaire en Diptérocarpacées peut être expliquée par leur faible pouvoir de dispersion tel que signalé par BLANC (1997).

L'hétérogénéité des écosystèmes dans l'espace est incontestable non seulement du fait de l'existence de vastes zones et régions ou provinces biogéographiques au niveau mondial et continental mais aussi de multiples biotopes de tailles diverses au sein de chaque région. Ces derniers se différencient par les effets conjugués des irrégularités du relief et du climat, de l'érosion éolienne, hydrique ou glaciaire, du battement saisonnier des nappes phréatiques, de la résistance différentielle des roches et dépôts à l'altération physique et chimique et donc aussi de leurs pouvoirs tampons à l'égard de l'acidification et de l'aluminisation induites par les biotes, etc. La diversité spatiale des biotopes et des biotes se traduit bien entendu par des contrastes entre les sols qui composent les pédopaysages.

Les flux de diaspores s'inscrivent dans la réalisation de la niche fondamentale des espèces et sont entretenus par les agents de dispersion tels que le vent et l'eau de mer, des fleuves et des rivières, les animaux et notamment les oiseaux frugivores, etc. Ces flux sont une source d'évolution des espèces par stress environnemental lorsque les plantules germées colonisatrices rencontrent des conditions adverses telles que sécheresse, excès d'humidité, salinité, roche brute, feux, acidité, concentrations d'aluminium ou de fer dans les solutions, etc. Une amplification des mutations peut alors augmenter le polymorphisme des populations et produire à la longue de nouvelles espèces "natives" comme évoqué au paragraphe précédent. Il n'est alors point besoin d'évoquer une brutale modification temporelle de biotope car l'évolution s'avère nécessaire au hasard de la rencontre de conditions "environnementales" défavorables lors du processus dispersif des diaspores.

L'apparition de nouvelles espèces ou de nouveaux écotypes est cependant bien plus difficile à détecter que leur extinction. Mais les deux phénomènes ont en commun un faible effectif de population, le premier en décroissance et le second en croissance. Cependant la différenciation rapide d'écotypes, en 40 ans, de la poacée "flouve odorante", *Anthoxanthum odoratum*, en relation avec des variations de pH du sol a été mise en évidence par SNAYDON (1970) dans le parc expérimental herbager de la station de Rothamsted en Grande-Bretagne. Une revue plus récente de la dynamique évolutive dans ce parc herbager a été réalisée par SILVERTOWN et al. (2006). Une forte différenciation entre écotypes pour les traits d'adaptation au milieu a aussi été observée par plusieurs auteurs cités par POOZESH (2007, p.93) tels que CHARMET & BALFOURIER (1994) chez le ray-grass, *Lolium perenne*, SAMPOUX (2006) chez les fétuques, *Festuca*, ou encore LIU et al. (1997) chez les *Agrostis*.

### 5.2.3. Évolution de la biodiversité avec l'aluminisation

Plusieurs articles cités par OPDECAMP (1998) indiquent une relation inverse entre le pH des sols et la biodiversité au moins dans les régions tropicales humides. FITTKAU (1973) émet ainsi l'hypothèse que la rareté des cations de base dans les sols acides conduit à leur recyclage maximum dans la végétation grâce à une abondance d'espèces, notamment en Amazonie centrale. Peut-être qu'il se développe une certaine complémentarité ou coopération plutôt qu'une compétition entre les espèces lorsque les conditions de nutrition minérale deviennent adverses.

HUSTON (1980) soutient qu'en situation d'abondance de nutriments minéraux dans les sols, la vitesse de croissance est plus élevée et favorise plutôt la compétition entre espèces, ce qui conduit à une plus faible biodiversité. Cet auteur examine dans ce cadre les résultats de 46 sites de forêts matures du Costa Rica pour lesquels des données détaillées de la littérature existent en termes de nombre d'essences forestières et de caractéristiques analytiques moyennes des sols sur une épaisseur de 100 cm.

Encadré 6.: Chronologie des observations de la régénération forestière de l'île principale à Krakatoa suite à une éruption volcanique d'après RICHARDS (1996, p.341 et suivantes)

La violente éruption volcanique du mois d'août 1883 dans les îles KRAKATOA coupa l'île principale PULAU RAKATA (9 km sur 5 km avec un pic de 822 m d'altitude) en deux, à 40 km de JAVA et SUMATRA (Indonésie). Une moitié disparu dans l'océan et l'autre fut couverte de dépôts volcaniques sur une épaisseur de 60 à 80 m: ces dépôts allongèrent l'île vers le sud sur 4,6 km.

Synthèse chronologique des observations:

- avant l'éruption: la végétation devait être similaire à la forêt actuelle couvrant certaines parties de JAVA et SUMATRA;

- éruption d'août 1883 (t0): il est généralement admis que toute forme de vie disparaît;

- juin 1886 (t0+3ans): 9 espèces d'angiospermes (plantes à fleurs) identifiées sur le littoral (+ graines et fruits d'autres espèces); à l'intérieur de l'île, croûtes de cyanobactéries (Algues bleues, dont le genre *Anabaena* par exemple) et étage supérieur dominé par des fougères, très localement quelques espèces d'angiospermes;

- 1897 (t0+14ans): au littoral, développement d'une communauté typique de plages sableuses tropicales dont des espèces forestières comprenant "*Casuarina equisetifolia*"; à l'intérieur de l'île, dominance d'une formation herbacée bio-diversifiée, parfois haute (type savane), dont "*Imperata cylindrica*", tandis que sur les plus fortes pentes les cyanobactéries et les fougères restent dominantes;

- 1906 (t0+23ans): différenciation et élargissement de la colonisation forestière littorale -> 2 formations distinctes, dont la plus dense dominée par "*Casuarina equisetifolia*" et l'autre, plus intérieure, par "*Barringtonia asiatica*" fort similaire à celle de la côte de JAVA. Sont dénombrées aussi des espèces grimpantes, buissonnantes et herbacées diverses. Quelques espèces typiques mais plutôt isolées de la forêt secondaire malaisienne sont identifiées plus à l'intérieur ("*Macaranga-Ficus*"). A l'intérieur de l'île est développée une savane de "*Saccharum spontaneum*" qui constitue l'essentiel de la formation herbeuse identifiée en 1897. Explorée plus à l'intérieur, une colonisation forestière très peu diversifiée caractérise des ravins d'érosion. L'arbuste "*Cyrtandra sulcata*" est nouvellement identifié, qui deviendra plus tard très abondant. Au-delà de 400 m d'altitude les fougères resteraient dominantes, qui semblent donc être "repoussées" par la formation savano-herbeuse;

- 1919 à 1932 (t0+36 à 49ans): les 2 formations "*Casuarina*" et "*Barringtonia*" régressent spatialement par érosion littorale, il est observé qu'elles n'incluent pas toutes les espèces des formations correspondantes de JAVA et SUMATRA; de plus la formation à "*Casuarina*" fait localement place à "*Barringtonia*" ou à "*Macaranga-Ficus*". Cette dernière formation (forêt secondaire malaisienne typique) se développe aussi vers l'intérieur dans la savane herbeuse à "*Saccharum* et "*Imperata*" et la remplacera complètement. Des espèces d'ombre apparaissent sous les arbres, telle que l'orchidée "*Nervilia aragoana*". La tendance forestière est plus accentuée dans les ravins. La plus haute partie de l'île est envahie presque exclusivement par l'arbuste "*Cyrtandra sulcata*", mais "*Neonauclea calycina*" qui l'accompagne se développe abondamment. Une forêt tropicale humide de montagne commence à prendre forme;

- 1951-1952: (t0 +70ans): l'intérieur de l'île est devenue presque entièrement forestière et dominée par "*Neonauclea calycina*", 15 m de hauteur et commun dans d'autres parties de la Malaisie! Quatre zones altitudinales peuvent être distinguées: (1) altitude de 0 à 50 m, mélange de *Neonauclea* et "*Terminalia catappa*", quelques représentants de "*Macaranga-Ficus*"; (2) altitude de 50 à 200 m, *Neonauclea* représente pratiquement le seul arbre, mais son tronc est plus développé; (3) altitude de 200 à 500 m, *Neonauclea* et présence de "*Maranthes corymbosa*" et "*Ficus spp.*", avec luxuriant sous-étage de fougères et "*Selaginella*"; (4) altitude de 500 à 700 m, *Neonauclea* aux troncs les mieux développés couverts abondamment de Bryophytes (mousses), abondance de l'épiphyte "*Asplenium nidus*". A plus haute altitude: arbustes de "*Schefflera polybotrya*" et secondairement de "*Cyrtandra sulcata*" déjà détecté en 1906 à plus basse altitude et anciennement dominant à plus haute altitude entre 1919 et 1932, tout en étant en compétition avec *Neonauclea*. Cette stratification altitudinale est attribuée pour l'essentiel aux variations d'humidité et d'enneigement;

- plus tard, peu de changements de la couverture forestière si ce n'est en taille et extensions des strates précédentes: toujours les communautés littorales et la zone forestière intérieure dominée par *Neonauclea*. Il est toutefois établi que le stade de reconstitution de la forêt primaire n'a pas été atteint (pas de Diptérocarpacées identifiées).

Les sites forestiers de HUSTON varient de basse à haute altitude et comportent également des forêts marécageuses et des "forêts sèches". Les teneurs en cations de base  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  et  $Na^+$ , leur somme totale ( $Mg^{2+}$  y compris) et la teneur en phosphore s'avèrent négativement et significativement corrélés au nombre d'espèces d'arbres mais pas le pH. L'élimination des données des sites de forêt sèche, marécageuse et de montagne n'altèrent pas les corrélations.

A propos du pH, comme il s'agit aussi d'une moyenne sur la profondeur de 100 cm cette donnée n'a pas de sens réel du fait de son échelle logarithmique et de l'hétérogénéité des conditions physico-chimiques sur une telle épaisseur de sol car plusieurs "horizons" y sont alors verticalement différenciés. L'auteur reconnaît que corrélation ne signifie pas relation de cause à effet, mais il ne pense pas qu'il s'agisse ici de corrélations parasites et développe plusieurs arguments cohérents à cet égard. L'intérêt pour l'auteur est que les sites forestiers riches en espèces sont tous caractérisés par de faibles teneurs en cations de base et phosphore alors que dans les sols aux teneurs les plus élevées le nombre d'espèces d'arbres est toujours bien moindre.

PROCTOR et al. (1983) ont caractérisés les sols et la biodiversité  $\alpha$  en arbres, arbustes, lianes et herbes dans 4 sites de forêts en basse altitude (50 à 300 m) du parc national de Gunung Mulu, île de Bornéo (Sarawak, Malaisie). Il est remarquable d'observer dans leur figure 6 le contraste entre les biodiversités spécifiques élevées des sites de terre haute les plus acides (pH < 5,0 en DF et HF) et celles beaucoup plus faibles des terres hautes les plus basiques (pH > 6,0, sur calcaire en affleurement LF). Par contre, les teneurs en phosphore total de ces dernières sont bien plus élevées. De tels résultats vont donc dans le même sens que ceux de HUSTON (1980, op. cit.). Dommage qu'aucune de ces deux études ne fournissent de données sur les taux d'aluminisation des sols.

FABER-LANGENDOEN & GENTRY (1991) rapportent des taux d'aluminisation de 69 et 80% à des pH (H<sub>2</sub>O) inférieurs à 5,0 dans l'horizon superficiel (0-10 cm) de deux parcelles voisines de 1 ha de forêts évaluées comme primaires à Bajo Calima (Colombie). Les deux parcelles sont situées dans la partie supérieure d'un versant de pente assez forte (terre haute) à une faible altitude (50 m) dans une région de collines et sous régime éoclimatique particulièrement humide (P > 7.000 mm/an). Une très haute biodiversité  $\alpha$  avec présence dominante de Vochysiacees (accumulatrices d'aluminium) dans l'une des parcelles est observée. Les auteurs font notamment référence à HUSTON (1980, op. cit.) pour expliquer à nouveau cette biodiversité élevée dans de telles conditions physico-chimiques de sol.

LALIBERTÉ et al. (2013) tentent d'expliquer par quels processus la biodiversité peut augmenter avec une moindre disponibilité d'éléments nutritifs dans le sol en relation avec l'âge du sol et le degré d'évolution pédogénétique. La biodiversité suit une tendance générale d'augmentation entre les pôles et l'équateur. Les données disponibles citées par ces auteurs dans leur premier encadré font état d'une haute biodiversité  $\alpha$  dans les sols profondément altérés. Est citée notamment la haute biodiversité forestière de la région de "Yasuni" en Équateur où les sols sont très acides et fortement aluminisés.

L'augmentation générale de la biodiversité avec l'âge des sols est une tendance courante qui se dessine également dans les chronoséquences boréales, tempérées et subtropicales ou méditerranéennes.

La chronoséquence dunaire de Jurien Bay dans le Sud-Ouest australien, de type arbustive méditerranéenne est citée à titre d'illustration par ces mêmes auteurs et mérite un commentaire particulier grâce notamment aux données analytiques fournies par TURNER & LALIBERTÉ (2015). En effet, c'est une chronoséquence d'âge quaternaire qui s'étend depuis le début du pléistocène (2 Ma) jusqu'au mi-holocène (<6,5 Ka), en passant par le mi-pléistocène (120 à 500 Ka). Ses sols se décalcifient et s'acidifient avec l'âge en passant d'un pH de 9,1 à 5,6 (pH H<sub>2</sub>O). Mais le régime éoclimatique est semi-aride avec des phases plus sèches durant les glaciations du pléistocène. Toutefois, les minéraux primaires comme les feldspaths et amphiboles ont disparu et les sols sont aussi décarbonatés sauf dans ceux datés de l'holocène où ils restent présents même en surface. Il n'y a aucune aluminisation détectable ce qui est cohérent avec un pH qui reste supérieur à 5,5. Le matériau parental est essentiellement constitué de sable: les teneurs en argile restent inférieures à 3%. La CECe varie de 1 à 13 cmol<sub>c</sub>/kg et n'est guère attribuable qu'à la matière organique. ZEMUNIK et al. (2016) observent bien dans cette chronoséquence une croissance des biodiversités  $\alpha$ ,  $\gamma$  et même  $\beta$  avec l'âge des sols.

### 5.3. Progression et rétrogression des écosystèmes

PELTZER et al. (2010) attribuent aux changements induits par la pédogenèse un rôle prédominant dans les phases d'évolution des écosystèmes. Ces auteurs se concentrent principalement sur le phénomène de leur rétrogression caractérisée par un déclin de la biomasse globale après un passage par un maximum de production. Ils écartent de ce phénomène l'incidence négative d'un climat défavorable de même que le ralentissement des processus biologiques liés soit à l'âge de la végétation, soit au déclin du rapport entre la photosynthèse et la respiration, soit encore au ralentissement de la minéralisation de la matière organique, etc. Cette rétrogression ne peut pas être inversée par les effets temporaires d'une succession secondaire (quelques décades ou siècles) liée à un abattis-brûlis en forêt tropicale par exemple. Pour l'inverser il faut une véritable réjuvenation du sol avec des effets marqués sur le matériau parental (glaciation, dépôt sédimentaire ou alluvial, éruption volcanique, soulèvement géologique, décapage de tourbière par incinération, etc.). Les auteurs font jouer apparemment des rôles clé au phosphore et à l'azote. Ils s'accordent en tout cas pour inclure l'étude des processus pédogénétiques pour comprendre les causes et conséquences de la rétrogression.

WARDLE et al. (2004) qualifient de phénomène catastrophique une réjuvenation géomorphologique du sol comme étant à l'origine d'une nouvelle succession primaire conduisant dans une phase initiale à un maximum de production primaire. Mais en l'absence prolongée d'une nouvelle catastrophe, ils s'accordent à diagnostiquer également une phase de rétrogression dont les processus sont mal connus. Ils étudient l'évolution de six chronoséquences établies sur base des différents âges des matériaux parentaux des sols sous leur climat actuel, même si ces séquences ont connu avant la catastrophe de réinitialisation (réjuvenation) dans leurs passés plus lointains des climats différents. Ces séquences représentent des âges maximaux compris entre 6 Ka et 4 Ma. Elles sont développées sous diverses conditions macroclimatiques et se dénomment comme suit en relation avec leur localisation: (1) *Cooloola* (tropical - sables dunaires éoliens en Australie), (2) *Arjeplog* (boréale - réinitialisation d'une succession secondaire suite à des incendies sur une île lacustre en Suède du Nord), (3) *Glacier Bay* (boréale - retrait glaciaire en Alaska), (4) *Hawaiï* (tropicale - matériaux d'épanchement volcaniques), (5) *Franz Josef* (tempéré - retrait glaciaire en Nouvelle Zélande) et (6) *Witutu* (tempérée - terrasse de dépôt marin). A la [figure 5.4](#) sont reproduites quatre vues de la vallée glaciaire Franz Josef.



*Figure 5.4: Quatre vues de la vallée du glacier Franz Josef en Nouvelle-Zélande à une altitude d'environ 250 m ainsi que de la rivière Waiho qui y coule et de la végétation forestière tempérée humide à Podocarpaceés (Photos: Fotolia)*

Les auteurs observent une allure générale parabolique pour l'évolution de la surface terrière des arbres en tant que variable de substitut à leur biomasse (augmentation, maximum, diminution). Le déclin se produit après des Ka ou dizaines de Ka et s'exprime jusqu'à une disparition des arbres au stade le plus évolué. Pour les auteurs, la rétrogression serait due à des conditions de sol moins favorables et ils évoquent principalement de moindres disponibilités en phosphore et en azote et une tendance à l'augmentation du rapport N:P voire C:P dans les litières et les humus durant la rétrogression. Une diminution de la biomasse et de la respiration microbienne du sol est également suggérée. Malheureusement, ni le degré d'acidification, ni le taux d'aluminisation ne sont mesurés dans les deux articles précités.

ZEMUNIK et al. (op. cit.) constatent que si la rétrogression se manifeste bien dans des chronoséquences forestières à biodiversité de sous-étage relativement réduite, dans certaines chronoséquences la rétrogression peut aussi être associée à une augmentation générale de la biodiversité. Ces auteurs reprennent alors les trois causes postulées par WARDLE et al. (2008) pour l'expliquer: (1) la compétition avec les arbres diminue avec la rétrogression, (2) l'hétérogénéité spatiale augmente avec le déclin des nutriments et (3) la compétition pour la lumière se réduit de par la réduction du nombre de grands arbres.

Enfin, RICHARDSON et al. (2004) diagnostiquent une phase progressive jusqu'à ce que le couvert forestier atteigne son hauteur maximale lorsque le sol atteint un âge de 12.000 ans aux niveaux des terrasses alluviales de la vallée glaciaire dans la chronoséquence *Franz Josef* (figure 5.4). Une phase régressive y succède entre 12 et 120 ka. Ils constatent par ailleurs une diversité maximale d'espèces ligneuses à 5 ka. L'inflexion à 12 ka se localise dans les anciennes moraines du pléistocène tardif et est probablement attribuée selon les auteurs à un déclin du phosphore dans les sols. La phase progressive comporte cependant une acidification rapide du sol entre 0 et 10 cm avec un pH (H<sub>2</sub>O) qui passe de plus de 6,5 à moins de 5,5 en une centaine d'années seulement et qui descend ensuite en dessous de 5,0 dès 130 ans d'âge. Le pH se stabilise vers 4,0 au-delà de 1.000 ans alors que le sol serait alors déjà fortement aluminisé, bien avant la phase régressive. Mais, aucune donnée sur les cations de base et l'aluminium échangeables n'est fournie par les auteurs pour corroborer cette hypothèse.

## 5.4. Synthèse et conclusions

Avec les dynamiques écologiques on entre dans l'hyperespace des niches fondamentales (niches-F) et de leur réalisation (niches-R). Lorsqu'il s'agit plus concrètement d'examiner comment les niches-R se réalisent dans l'espace géographique terrestre, il convient d'envisager non seulement les interactions entre les facteurs biotiques et abiotiques, entre biotes et biotopes, mais aussi les interactions bionomiques (interspécifiques). Le modèle évolutif néodarwinien semble ignorer l'hétérogénéité géographique dans les mutagenèses, leur nécessité plutôt que qu'un simple hasard dans son cours. C'est particulièrement interpellant lorsqu'on arrive dans les marges d'une niche-F. Au travers de fenêtres dans l'hyperespace, comme celle pivotant sur l'axe du pH des sols, une instabilité s'observe dans la configuration des niches-R. Si cette instabilité devient critique face au changement de l'environnement, c'est-à-dire que le changement devient une source de stress croissant au niveau du métabolisme cellulaire (phénotype) d'une ou plusieurs espèces, alors une amplification des mutations serait induite et pourrait conduire à des modifications épigénétiques (écotype) et génétiques (génotype) dans les populations concernées. L'évolution des espèces induite par stress environnemental serait sous-estimée tandis que le rôle pilote de l'ADN serait surévalué en tant que "programme". L'ADN fonctionnerait plutôt comme banque de données.

L'évolution est un processus actuel, toujours en cours. Cependant, des stress draconiens de grande ampleur géographique et d'origines géotectoniques et/ou astro-climatiques sont reconnus pour avoir marqué les grandes étapes dans l'évolution de l'écosphère. Il s'agit essentiellement des cinq grandes extinctions massives et des radiations subséquentes génératrices chaque fois d'un vaste renouvellement des biodiversités et donc aussi des niches- F.

Les notions de biodiversités  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont des notions élastiques du fait que leur limites ne sont pas déterminées de manière absolue du point de vue géographique. Il est aussi quasi impossible de les mesurer de manière complète et exhaustive. Il en résulte des difficultés importantes d'identification qui conduisent à des caractérisations partielles des biotes, le plus souvent limitées aux espèces vasculaires ou même ligneuses d'un diamètre minimum de tronc d'arbre. Aux réductions dues à l'identification partielle de ceux-ci s'ajoutent celles d'identification tout aussi partielles des biotopes dans les pratiques des écologues et notamment au niveau hypogé qu'est celui des sols. De nombreuses interactions systémiques exigeraient cependant d'être étudiées et c'est normalement le propre et l'intérêt du concept d'écosystème où les sols constituent un compartiment clé. Ils y jouent un rôle non seulement dans la définition de ses frontières mais aussi dans l'intégration des facteurs biotiques et abiotiques qu'ils opèrent dans leur évolution.

Les tendances d'une augmentation de la biodiversité d'arbres avec le degré d'acidification et d'aluminisation des sols sont là pour en témoigner. Mais, si elles sont détectées par plusieurs auteurs, elles restent mal documentées au point qu'est évoquée plutôt une diminution des nutriments majeurs comme le phosphore voire l'azote pour expliquer le phénomène. L'augmentation de la biodiversité avec l'aluminisation pourrait se comprendre par une complémentarité des espèces dans l'exploitation de nutriments minéraux. Ceux-ci sont raréfiés particulièrement au taux d'aluminisation les plus élevés et où la croissance est généralement ralentie, ce qui réduirait la compétition interspécifique.

L'acidification superficielle des sols sous colonisation forestière primaire semble par ailleurs assez rapide et l'on peut supposer de même pour l'aluminisation subséquente, de l'ordre d'une centaine d'années dans des matériaux parentaux sans doute peu ou mal tamponnés même sous des conditions thermiques tempérées comme dans la fameuse chronoséquence *Frans Josef* de Nouvelle-Zélande.

L'évolution progressive des écosystèmes avec l'âge des sols en termes de production de biomasse est marquée par une inflexion régressive à un certain stade d'acidification que la littérature attribue le plus souvent à un déclin de nutriments minéraux comme le phosphore ou l'azote. Cette allure parabolique de l'évolution de la biomasse ou de la hauteur de la végétation rappelle cependant les courbes de croissance de nombreuses espèces en solution de culture ou en vases de végétation et où l'aluminium semble jouer un rôle clé, justement en interaction avec le phosphore. Il est donc ici aussi regrettable que les études disponibles sur le phénomène de régression ne fournissent pas le taux d'aluminisation des sols. Toutefois, l'évolution du pH du sol dans ces chronoséquences sont indicatrices d'un phénomène similaire, ce qui cantonnerait le phosphore dans un rôle annexe à celui de l'aluminium.

## 6. Traits et caractères paysagéniques d'aluminisation

### 6.1. Historique global des facettes paysagéniques

#### 6.1.1. Colonisation humaine préhistorique au pléistocène

Tout récemment, l'apparition de l'espèce *Homo sapiens* a été estimée à 315.000 ans par des fossiles découverts au Maroc (CALLAWAY, 2017), contre 200.000 auparavant en Afrique de l'Est. C'est donc à l'ère quaternaire et au cours du pléistocène que démarre la réalisation de la niche humaine alors que des périodes glaciaires tels que le "Riss" et le "Würm" se déroulent encore aux latitudes élevées. Pour TASSIN (2014), l'anthropisation de la planète est un mouvement qui démarre de l'Afrique il y a 70.000 ans. Des hommes quittent ce continent pour rejoindre l'Asie du Sud-Est. Le mouvement se prolonge il y a 30.000 à 50.000 ans jusqu'en Nouvelle-Guinée et en Australie. Les écosystèmes naturels sont progressivement modifiés par la végéticulture (multiplication végétative asexuée). L'igname et le taro se diffusent ainsi dans les climats tropicaux humides par le seul bouturage, ce qui est confirmé par ROBERTS et al. (2017). Les forêts tropicales soi-disant vierges sont en fait remaniées depuis longtemps par l'activité des essarteurs et la pratique itinérante de l'abattis-brûlis. Elles s'assimilent à des agroforêts à rotation très lente, c'est à dire à jachère forestière de longue durée où l'homme s'est inséré dans la nature (ROSSI, op. cit.). Le chien est la première espèce animale domestiquée il y a au moins 30.000 ans. L'habitat de l'homme est encore rudimentaire et intégré à la nature, constitué par des grottes et des huttes de structures et de formes très diverses selon les peuples. Elles sont cependant toutes identiques dans une même communauté (LAMING, 2015).

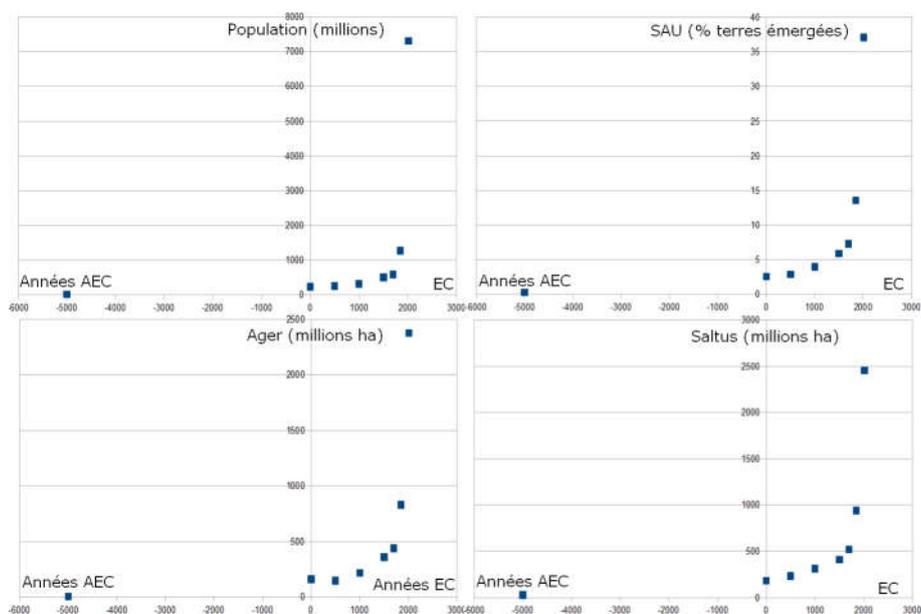
#### 6.1.2. Progression de Ager, Hortus et Saltus depuis l'holocène

TASSIN (op. cit.) décrit les grandes étapes chronologiques de la domestication et propagation des espèces végétales et animales par l'Homme. L'holocène démarre à 8 ka AEC (avant l'ère courante = av. J.C.) et se marque par la sédentarisation de l'agriculture et l'avènement de la céréaliculture par un mode de reproduction sexuée cette fois. Elle transforme des chasseurs-cueilleurs en cultivateurs au Néolithique: petit épeautre, amidonnier, orge et en parallèle lentille, pois, vesce et pois chiche rayonnent de la Syrie et Turquie vers l'Europe, l'Afrique du Nord et l'Asie orientale. Dans le sillage migratoire de *Homo sapiens*, se diffusent les insectes granivores, les pathogènes, les mauvaises herbes dont sont issus le seigle et l'avoine, de même que le riz favorisé par l'irrigation de plantes à tubercules comme la taro. Vers l'an 500 EC (ère courante = ap. J.C.), les Polynésiens affrontent l'immensité du Pacifique, colonisent plus de 500 îles et y propagent de nombreuses espèces comme la canne à sucre, le bananier et la patate douce rapportée après avoir touché l'Amérique. Parmi les espèces animales, après le chien c'est au tour de la chèvre (8 ka AEC) d'être domestiquée, puis du mouton (7 ka AEC), du porc (5,5 ka AEC en Syrie), du bœuf (4 ka AEC), du cheval (2,5 ka AEC), de l'âne (1,5 ka AEC) et du dromadaire (1 ka AEC). La réalisation géographique de la niche humaine et des niches végétales et animales qui lui sont associées suit l'histoire des peuples. Les Romains dans leur Empire: choux, fèves, bettes, poireau, céleris, lentilles, asperges, oignons, artichaut, olives, persil, coriandre, origan, sauge. Par le développement de l'Islam: plantes à épices, nombreux légumes, choux-fleur, épinard, carotte, artichaut, pastèque. Amplification des introductions par les grandes navigations maritimes du 15ème siècle: en Europe, la pomme de terre du Pérou, le maïs du Mexique; à Java, le caféier du Yemen; dans le Sud-Est asiatique, l'hévéa d'Equateur via Kew; en Afrique, le bananier d'Asie. Une sélection anthropique des espèces cultivées et domestiquées s'opère. Non seulement la réalisation de leurs niches se voit considérablement amplifiée mais l'évolution même de ces espèces est dirigée par des croisements et hybridations décidées par l'Homme.

GOLDEWIJK et al. (2017) évaluent en superficie l'évolution de plusieurs types d'utilisation des sols par les humains au cours de l'holocène au départ de l'occupation actuelle observée sur

scènes satellite à 300 m de résolution au sol. Ils modélisent alors l'évolution passée avec des données et estimations historiques de démographie et de densités de population. Leurs résultats ne comprennent cependant pas les superficies forestières (Silva) ou les terres inhabitées comme l'Antarctique, les déserts ou les affleurements rocheux. Saltus peut être déduit de leurs données de "rangeland" et Ager de celles relatives aux terres cultivées et prairies artificielles ou temporaires (Ager prairial). Pour distinguer Saltus, les auteurs précisent que les "rangelands" sont caractérisées par de faibles charges de bétail à l'hectare et comprennent les prairies naturelles, les zones arbustives, les terres humides, les terres arides. La végétation est native plutôt qu'implantée par l'homme. De plus, ils recourent aux critères suivants: un indice d'aridité inférieur à 0,5 (P/ETP) ou si cet indice est plus élevé que 0,5 une densité de population (humaine) inférieure à 5 hab/km<sup>2</sup>.

La surface agricole utile (SAU) s'obtient par la somme des superficies en Ager et en Saltus. Leurs résultats ainsi interprétés sont mis en graphique à la [figure 6.1](#), sachant que l'ensemble des terres émergées est estimée à environ 13.500 Mha<sup>4</sup> contre 14.900 généralement admis.



**Figure 6.1:** Réalisation estimée de la niche humaine depuis l'holocène: population, Ager, Saltus et SAU (Surface Agricole Utile = Ager + Saltus), d'après les données de GOLDEWIJK et al. (2017)

Il est frappant d'observer l'allure similaire des quatre courbes esquissées par le modèle. Mais comme celui-ci est basé sur la densité de population, il ne pourrait guère en être autrement. La "SAU" reste inférieure à 40% des terres émergées et la colonisation terrestre démarre réellement avec l'ère commune (EC). La FAO (2016) estime également cette superficie relative dédiée à l'agriculture à 37,7% en 2010 EC. Historiquement, elle s'est accrue exponentiellement à partir de 1700 EC. Elle fait plus que doubler à partir de la révolution industrielle à 1850 EC qui est l'avant-dernier point reproduit dans la [figure 6.1](#). Les FP (facettes paysagéniques) de Ager et Saltus sont estimées comme étant de superficie approximativement égale soit près de 2.500 Mha chacune. Il s'agit d'estimations grossières à l'échelle globale de l'étude de GOLDEWIJK et al. (op. cit.). Pour donner une idée de la variabilité selon les sources et méthodes, RAMANKUTTY & FOLEY (1999) fournissent globalement pour l'année 1990 à la fin de leur tableau 3b une estimation de 1.792 Mha pour la FP de Ager dénommée "cropland" et définie en tant que somme des terres "arables" et "cultures pérennes" à l'exception des arbres exploités comme bois d'œuvre ou de chauffage. Les terres "arables" incluent également la FP de Hortus ainsi que les prairies temporaires (< 5 ans) de fauche ou de pâturage. Parallèlement, on pourrait assimiler leur catégorie "savannas/grasslands/steppes" à la FP de Saltus dont l'estimation de ces mêmes auteurs est de 2.671 Mha. La SAU pour ces auteurs serait donc de 4.463 Mha en 1990, ce qui représente alors 33% des 13.500 Mha de terres émergées

4 Mha = millions d'hectares

considérées. Le tableau 5 reproduit les chiffres cités de manière synthétique. La question de savoir si la "SAU" peut encore s'accroître est d'actualité dans la prospective alimentaire mondiale pour 2050 où la population est censée atteindre les 9 milliards. Mais au même horizon de 2050, WATSON & VENTER (2017) rapportent que les naturalistes souhaitent une mise en défens de 50% des terres pour conserver la biodiversité selon une éthique écocentrique ou biocentrique. Cet dernier objectif semble compromis d'après l'allure des courbes de la figure 6.1. Celles-ci semblent également indiquer une incompatibilité avec le premier objectif de relever le défi alimentaire 2050 selon une éthique anthropocentrique, sauf transition démographique ou innovations paysagéniques.

### 6.1.3. Historique de Silva depuis l'holocène

La FAO (2016, op. cit.) avance une estimation de 1.800 Mha de perte en superficie forestière au niveau mondial depuis 3.000 AEC, alors que la SAU augmente bien au-delà à environ 4.500 Mha d'après le tableau 5. La différence s'explique aisément ne fût-ce que par la croissance de la SAU dans les zones arides, semi-arides et boréales ainsi que par l'expansion de la FP de Urbs. Cette dernière n'occupe cependant qu'une aire relative peu significative, de l'ordre de 0,55% avec 75 Mha d'après SCHNEIDER et al. (2003) cités par SCHNEIDER et al. (2010). Toujours selon la FAO, le total actuel des superficies forestières dans les terres émergées s'élèverait à une peu moins de 4.000 Mha tenant compte d'une déforestation récente de 129 Mha entre 1990 et 2015. Si l'on se réfère alors au tableau 5, le compte en FP de Ager (et Hortus), Silva, Saltus et Urbs serait estimé entre 8.500 et 8.900 Mha sur 13.500 Mha de terres émergées, soient entre 63 et 66%. On peut en conclure une estimation de 34 à 37% de superficie globale de la FP de Desertum.

*Tableau 5. Estimations des superficies globales absolues et relatives des FP de Ager (+ Hortus), Saltus, Silva, Desertum et Urbs déduites de l'interprétation des données de GOLDEWIJK et al. (2017), RAMANKUTTY & FOLEY (1999), FAO (2016) et SCHNEIDER et al. (2003) sur base d'une superficie de 13.500 Mha de terres émergées et Urbs négligé*

FP	Superficies absolues en Mha	Superficies relatives en %
Ager (+ Hortus)	1.792 à 2.378	13 à 18
Saltus	2.454 à 2.671	18 à 20
Silva	~ 4.000	~ 30
Desertum	~ 4.590 à 4.995	34 à 37
Urbs	~ 75	~ 0,55

### 6.1.4. Conversions de Silva en milieux tropicaux humides

Pour les forêts tropicales humides d'Afrique, d'Asie et d'Amérique, des conversions forêt-savane suite à des paléoclimats plus secs et des brûlis naturels (foudre, éruptions volcaniques) ou à une pratique anthropique coutumière (chasseurs-cueilleurs et pasteurs) sont attestés par plusieurs indicateurs notamment d'ordre géomorphologique (sédiments, hydrographie) et palynologique (pollens, graines). CHARLES-DOMINIQUE (1997) rend compte de la grande sensibilité de l'Amazonie aux variations climatiques mais précise qu'elles se déroulent à des époques différentes en Afrique ou en Asie, ce qui permet d'induire l'existence de systèmes climatiques tropicaux humides différents ou décalés d'un continent à l'autre.

#### *Afrique*

SCHWARTZ (1997) fait état au Congo (Brazzaville) d'un assèchement du climat à l'holocène supérieur (1.000 AEC) provoquant une régression forestière avec une conversion en Saltus sous forme de savanes. Il attribue cette modification paysagénique à la pratique concomitante de feux anthropiques. Mais des savanes non paysagéniques (non anthropiques), d'un type différent, plus arborées et naturelles se sont installées auparavant aux détriments de Silva, lors des grandes glaciations, notamment au pléistocène supérieur.

La déforestation récente des forêts tropicales humides africaines, entre 1990 et 2010 EC,

constitue l'objet d'un article de MAYAUX et al. (2013). Les auteurs fournissent les superficies suivantes de Silva: près de 200 Mha au total en 2005 principalement concentrée dans le bassin du fleuve Congo. La déforestation mesurée entre 1990 et 2000 est de 590.000 ha/an ce qui est 4 fois moindre qu'en Amérique latine. Et cette déforestation se réduit encore pratiquement de moitié à 290.000 ha/an entre 2000 et 2010. Madagascar est la région où le taux de déforestation est le plus élevé, respectivement de 1,63% et 1,08% pour les deux périodes considérées. Un seuil critique de densité de population rurale est détecté à 8,5 hab/km<sup>2</sup> au-delà duquel la déforestation s'accélère. Ce seuil est voisin de 10 hab/km<sup>2</sup> que JOUVE (op. cit., p.89) évalue pour la reconstitution d'un recrû forestier suffisant dans l'agriculture itinérante sur brûlis. Au-delà, la conversion permanente de Silva en Ager devient nécessaire et semble se dérouler de pair avec la conversion en Urbs, selon MAYAUX et al (op.cit.), le long des anciens axes routiers coloniaux et à proximité de centres d'urbanisation. Il nous paraît vraisemblable que de telles reconversions conduites un peu "au petit bonheur la chance" ne soient pas forcément durables. La déforestation pour la production de bois de chauffage et de charbon de bois en particulier est importante près des grandes villes. Pour la ville de Kinshasa elle s'étendrait jusqu'à un rayon de 300 km. Les auteurs ne précisent pas le devenir des zones déforestées mais indiquent des reconversions possibles notamment en plantations de cacaoyers, caféiers, palmiers à huile et hévéa selon l'évolution des marchés. La FAO (2016, op. cit.) rappelle à ce sujet l'influence héritée de la période coloniale sur une exploitation mécanisée des réserves forestières et l'instauration des plantations agricoles précitées. Le Nigeria par exemple aurait perdu plus de 90% de sa forêt "primaire". Toutefois, pour la FAO, la déforestation en Afrique subsaharienne est restée moins prononcée que dans les autres régions tropicales.

### *Amérique*

Des paléo-incendies naturels détectés par des couches enfouies de charbons en Guyane et en Amazonie sont rapportés par CHARLES-DOMINIQUE (op. cit.) entre 8.000 et 6.000 AEC et entre 4.000 et 2.000 AEC alors que la présence humaine n'y est attestée que depuis 500 AEC. Pour l'Amérique Centrale et l'Amérique du Sud, la FAO (2016, op. cit.) signale une déforestation significative entre 1700 et 1900 EC avec une réduction globale des couverts forestiers de 75 à 70%, mais qui s'accroît ensuite au XX<sup>e</sup> siècle avec une réduction globale jusqu'à 50%. Pour l'Amazonie brésilienne, TSAYEM DEMAZE (2008) synthétise et documente l'évolution de plusieurs modes de déforestation récents résultant d'une politique délibérée de développement économique et social. D'abord et dès 1953, une colonisation encouragée par des fronts pionniers publics de conversion en Ager vivrier et en Saltus pour bovins, puis par des fronts privés. Ces derniers sont facilités depuis 1974 avec une conversion en Saltus sous forme de très grandes exploitations de "ranching" de plusieurs milliers d'hectares chacune et dominant à près de 70% les surfaces déforestées. Depuis les années 1990, s'observe l'invasion d'une monoculture intensive de soja à haut niveau d'intrants et d'élevage bovin pour un *agrobusiness* d'exportation. Le même auteur rapporte aussi le développement de Urbs en zone défrichée avec la création de villages, de villes et de "*ruropolis*" qui sont des agglomérations de plus grande taille. Quant à l'exploitation de la Silva amazonienne, elle est traditionnellement axée sur la *roçà* c'est-à-dire l'agriculture itinérante de subsistance sur brûlis pendant 2-3 ans grâce à une jachère forestière de plusieurs décennies. Par rapport à la densité de population de 10 h/km<sup>2</sup> citée comme critique pour une agriculture itinérante sur brûlis en Afrique, TSAYEM DEMAZE (op. cit.) propose un seuil inférieur de 3-4 hab/km<sup>2</sup> pour ce même système durable de jachère forestière en Amazonie. L'exploitation forestière comporte également et plus récemment une production importante de bois tropicaux dont le Brésil est devenu le premier producteur mondial.

### *Asie*

La FAO (2016, op. vit.) donne à la Chine une population de 1,4 millions d'habitants à 2000 AEC et une couverture forestière de 60%, alors qu'en 1840 EC elle est réduite à 17% avec une population de 413 millions d'habitants. DÉRY (1996) rapporte qu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle Silva ne représentait plus que 5 à 10% du territoire chinois. L'évanouissement de la Silva chinoise, précise cet auteur, s'est opérée entre le XIV<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècle du fait de la forte croissance démographique. Une migration des populations s'est marquée par la colonisation agricole de la grande plaine centrale constituée par les cours inférieurs du Huang He (fleuve Jaune) et du

Chang Jiang (fleuve Bleu) ainsi que des zones périphériques. Pour la FAO (2016, op. cit.), la superficie forestière en Asie du Sud se serait encore réduite de plus de 50% depuis 1500 EC, notamment du fait de l'exploitation et de l'exportation de bois d'œuvre lors de la colonisation européenne. Toutefois, la forêt exploitée traditionnellement pour la culture itinérante sur brûlis s'est maintenue dans de nombreuses régions d'Asie. Dans le Sud-Est asiatique, DÉRY (op. cit.) précise que la population est passée de 32 millions en 1800 EC à 83 millions en 1900 puis à plus de 470 millions en 1995 avec une densité moyenne de 105 h/km<sup>2</sup>. La régression récente de Silva, entre 1960 et 1990, s'opère essentiellement au profit de l'agriculture mais qu'elle est géographiquement nuancée. Elle est restée plutôt stable en Birmanie, au Cambodge et au Laos. Par contre, Ager a plus a plus que doublé entre 1960 et 1990 dans le reste de la région (Indonésie, Malaisie, Philippines, Thaïlande et Vietnam). Un examen des grands changements récents de caractères généraux de paysagénie en Indonésie et en Malaisie réalisé par WICKE et al. (2011) relate un engouement pour la plantation de palmiers à huile. Ses superficies ont crû globalement de 3,5 Mha en 1975 à 13,1 Mha en 2005. Cette transition rapide s'est déroulée en grande partie par une conversion de Silva en approximativement pour moitié de Ager de plantation à Sumatra et dans le Kalimantan et pour moitié en Ager de riziculture sur environ 40 Mha au total en Indonésie. Cela représente 30% de la superficie forestière initiale. Une déforestation moindre de 5 Mha s'est opérée en Malaisie mais les plantations de palmiers à huile ont converti également d'anciennes plantations d'hévéa et de cocotiers. De plus, la déforestation s'est atténuée en Malaisie depuis le début des années 1990. La [figure 6.2](#) illustre une jeune plantation de palmiers à huile en zone déforestée de Malaisie. A l'échelle globale ou régionale de l'étude de WICKE et al., on se sent confronté à une labyrinthe de causes possibles et à une diversité des modalités et des formes de déforestation liée à l'hétérogénéité géographique.



*Figure 6.2: Jeune plantation de palmiers à huile à Johore Labis, Malaisie  
(Photo: Jean-François Kreit)*

GARRITY et al. (1997) rapportent par ailleurs le maintien de savanes à *Imperata cylindrica* en Asie tropicale sous forme de méga-, macro- ou méso-aïres de Saltus. Ces savanes sont associées avec des recrûs forestiers d'agriculture itinérante et comportent également d'autres espèces herbacées. Elles peuvent se présenter en larges plages relativement uniformes (méga-) parcourues par des feux ou en mosaïques fines associés à des plages arbustives (méso-), voire encore en micro-plages intégrées à Ager-Hortus et Urbs dans les villages où leur contrôle relève de la lutte contre les adventices au niveau des fermes. L'espèce *Imperata cylindrica* se dénomme "alang-alang" en Indonésie, "cogon" aux Philippines et "lalang" en Malaisie et "illuk" au Shri Lanka. La [figure 6.3](#) illustre le Saltus de "cogon" au Philippines. Les savanes à *Imperata* sont également présentes en Inde, en Chine méridionale, au Vietnam, en Thaïlande et au Laos. Les auteurs estiment qu'en Asie tropicale les superficies atteignaient globalement 35 Mha, ce qui ne représente que 4% du territoire considéré et sont broutées

essentiellement par un bétail de ruminants à diverses échelles.



*Figure 6.3: Vue panoramique de Saltus à Imperata aux Philippines (Photo: Fofolia)*

### 6.1.5. Conversions de Silva en région européenne

En Europe et alentours (Proche-Orient et Afrique du Nord), KAPLAN et al. (2009) situent l'installation des premières sociétés agraires au mi-holocène (*circa* 4000 AEC). Une succession de cycles de conversion de Silva en Ager ou Saltus et d'abandons ainsi que de reconversions en Silva s'y déroule ensuite. Les auteurs reconstituent l'historique de l'anthropisation de cette région entre 1000 AEC et la révolution industrielle de 1850 EC. La date de 1000 AEC est choisie comme point de départ car une agriculture permanente (Ager & Saltus) est bien établie partout dans la région, excepté en Islande et aux îles Féroé. Le facteur dynamique principal du modèle utilisé est toujours la croissance démographique, mais sa relation avec la déforestation est modifiée dans le sens d'une accélération par des innovations dans les techniques agraires autour des quatre dates de 350 AEC et 1000, 1350 et 1830 EC. Une réduction de la population par la Peste entre 1350 EC et 1450 EC est marquée par une pause dans les grands défrichements forestiers du Moyen-Âge. DÉRY (op. cit.) qualifie de "massive" la déforestation à cette époque dans les terres de faible altitude (plaines) et établit un lien avec l'invasion des céréales notamment en Germanie. KAPLAN et al. (op. cit.) établissent l'intervention d'autres facteurs que la croissance démographique et d'abord celle de l'aptitude des terres pour Ager ( $S_{\text{crops}}$ ). Cette dernière est établie dans leur modèle sur base de quatre variables pédoclimatiques constituées par: (1) le nombre potentiel de jours de croissance où la  $t^{\circ}$  moyenne journalière est supérieure à  $5^{\circ}\text{C}$ , (2) l'indice de disponibilité hydrique par le rapport entre l'évapotranspiration réelle et potentielle, (3) le pH du sol et (4) la teneur en carbone organique du sol en  $\text{kgC}/\text{m}^2$ . Pour l'aptitude au Saltus, seuls les deux premiers paramètres climatiques sont utilisés. Les terres évaluées inaptées sont préservées de la déforestation dans leur modèle. Dans leur figure 9, KAPLAN et al. font apparaître à 1500 EC et 1850 EC plusieurs pays qui se distinguent par des densités de population plus élevées que celles qui s'accordaient jusqu'alors avec leur relation quasi linéaire avec leur aptitude pour l'Ager. A 1500 EC se distinguent ainsi principalement la Norvège, l'Écosse, la Suisse, l'Autriche, la Belgique et le Grand Duché de Luxembourg ainsi que la France et l'Italie. Et à 1850 EC s'y ajoutent de nombreux autres qui rendent la relation initiale quasi-caduque, comme la Finlande, la Suède, le Danemark, l'Angleterre et l'Irlande ou encore la Pologne, la Tchécoslovaquie et la Hongrie. Cette dislocation de la relation entre la densité de population et l'aptitude pour l'Ager est évidemment attribuée au développement de commerce et de l'urbanisation ainsi qu'à l'industrialisation. Le modèle expliquant les conversions de Silva en Ager et Saltus se disloque donc complètement avec la révolution industrielle. DÉRY (op. cit.) mentionne toutefois que la période coloniale a permis un approvisionnement en bois et en diverses denrées agricoles à partir des colonies. Enfin, le même auteur indique que la Silva européenne est devenue actuellement assez stable et s'est même accrue de 15% entre 1965 et 1983. Ce phénomène de déprise agricole est à mettre en relation avec l'intensification de l'agriculture notamment au sein de l'Union européenne. Un tel phénomène a pu se dérouler du fait de la deuxième révolution agricole qu'a connu l'Europe dès le milieu du XXe siècle.

## 6.1.6. Avènement et codéveloppement historique de Urbs et Hortus

### *Des premiers villages aux premières villes*

On pourrait raisonnablement supposer que les premiers sites bâtis seraient liés à la sédentarisation de l'agriculture. Mais tant MERLIN (1991) que LAMING (op.cit.) plaident en faveur d'une émergence de Urbs autour d'un lieu de culte religieux. Ainsi le site de Göbekli Tepe, illustré à la [figure 6.4](#), en Anatolie du Sud et daté d'environ 10.000 AEC, indique un bâti commun constitué d'un temple avec son sanctuaire. Ce pourrait être ainsi le besoin religieux qui aurait provoqué l'émergence des premiers éléments de bâti communautaire plutôt que la sédentarisation de l'agriculture, pour donner naissance aux premières villes de l'humanité. Parmi les grandes premières villes antiques, LAMING cite Damas comme étant probablement la plus ancienne (10.000 AEC). Les sites urbains importants s'installent dans les plaines fertiles (Ager) près des grands fleuves (Aqua). Toujours d'après LAMING, la voie de communication initiale est fluviale, la plus ancienne route terrestre connue se situe en Egypte et daterait de 2500 AEC après la domestication du cheval et l'invention de la roue vers 3500 AEC.



*Figure 6.4: Site archéologique de Göbekli Tepe daté du début du Néolithique au sud-Est de l'Anatolie, actuelle Turquie (Photo: Fotolia)*

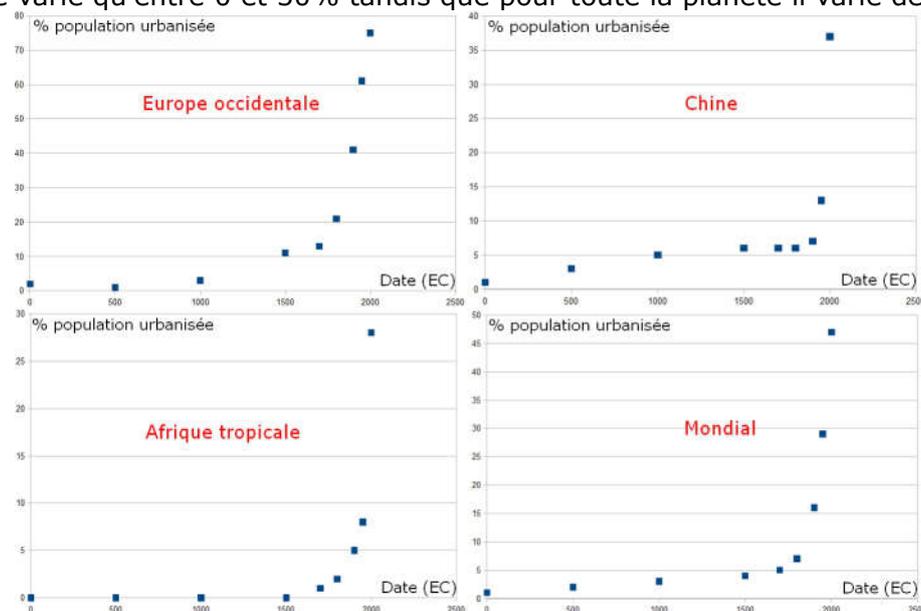
Toutefois, VIDAL (2014) relie étroitement l'histoire de Ager et de Urbs dès le début de l'holocène par sédentarisation sous forme de villages dont les plus productifs et les mieux organisés se développent en villes. En effet, les villages ont besoin d'artisans pour fonderies, forges et autres ateliers ainsi que de marchands et d'infrastructures de commerce et de transport. Il faut bien admettre qu'une taille critique initiale soit nécessaire pour qu'un lien religieux puisse s'avérer utile pour souder une communauté. VIDAL cite quatre foyers qui vont se répandre: le mésopotamien avec le blé, le chinois avec le riz, l'aztèque avec le maïs et l'inca avec la pomme de terre. Les fruits et légumes sont aussi domestiqués et font l'objet d'une attention et de soins particuliers distincts des champs de Ager. C'est ainsi qu'émerge au sein et autour des villages des jardins qui leur sont dédiés. C'est l'avènement de Hortus dans l'intimité ou la proximité de Urbs. On désignera par Hortus toute pratique d'agriculture hautement intensive au sein, à proximité ou à distance des villes. La FP de Hortus en ville est assimilée à de l'agriculture urbaine. Cette dernière comporte des productions végétales et animales à haute valeur ajoutée par unité de surface tels que légumes, fruits, algues, poissons, volailles, porcs et chevaux (anciennement pour les transports), fleurs et plantes d'ornement, et même parfois du bois. La FP de Hortus est donc plus ou moins intimement intégrée ou associée à

celle de Urbs et ce depuis le Moyen Âge, voire l'Antiquité, d'après l'étude de SMIT et al. (2001). Ces derniers auteurs indiquent qu'au XIX<sup>e</sup> siècle à Paris, la production annuelle de fruits et légumes peut être estimée à 50 kg/an par producteur dans le quartier du Marais et autres zones marécageuses autour de la ville. C'est de ce nom qu'est dérivé le terme de maraîchage. Cette offre excédait la demande. Des évaluations de la superficie relative de Hortus dans Urbs réalisées par MARTELLLOZO et al. (2014) aboutissent à une moyenne globale d'environ 30% pour satisfaire les besoins en fruits et légumes des citoyens dans le monde. Il existe toutefois d'énormes disparités selon les pays avec des extrêmes de 1,2 à 397,4%. Les auteurs concluent d'ailleurs que de nombreuses villes du Monde ne sont pas du tout autosuffisantes en fruits et légumes.

LAMING (op. cit.) met en évidence l'importance de la disponibilité de ressources locales pour fonder et développer les villes telles que la proximité d'un cours d'eau et de terres fertiles pour l'agriculture et l'élevage qui vont permettre les échanges entre les paysans et les citoyens. Le contexte local va ainsi donner des caractères spécifiques aux villes: climat, nature des matériaux, type d'élevage, de commerce, système politique, etc. LAMING regrette à ce propos la monotonie des villes actuelles dans un contexte de mondialisation où l'identité des villes est devenue indifférente à ce contexte local.

### Évolution de Urbs durant l'holocène

Le taux d'urbanisation est défini par UNITED NATIONS (2008) comme étant le pourcentage de la population vivant en milieu urbain. L'évolution globale de cette urbanisation et de sa répartition géographique depuis le début du Holocène est évaluée par GOLDWIJK et al. (2010). La [figure 6.5](#) en illustre les résultats globalisés au niveau mondial et plus spécifiquement pour l'Europe occidentale, la Chine et l'Afrique tropicale. Pour une comparaison il faut tenir compte des variations de grandeur dans l'axe des ordonnées. Elle est le double pour l'Europe occidentale (0 à 80%) par rapport à la Chine (0 à 40%). En Afrique tropicale, l'axe des ordonnées ne varie qu'entre 0 et 30% tandis que pour toute la planète il varie de 0 à 50%.



**Figure 6.5:** Évolution historique du taux d'urbanisation des populations d'Europe occidentale, de Chine, d'Afrique tropicale et du Monde d'après les données de GOLDWIJK et al. (2010)

Il est remarquable d'observer l'allure similaire de l'évolution des taux d'urbanisation avec celles de la population, de Ager et de Saltus dans la [figure 6.1](#), c'est-à-dire avec le taux d'anthropisation ou de réalisation de la niche humaine.

Avant l'ère courante (EC), le taux d'urbanisation des populations est globalement insignifiant. Il atteint 10% en Europe occidentale à la fin du Moyen Âge (1500 EC) alors qu'en Chine il n'est encore que de 5%. L'urbanisation s'accroît en Europe occidentale avec la révolution industrielle et la colonisation de l'Afrique. Par contre, la Chine ne voit réellement croître son urbanisation que depuis la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle. Actuellement, la moitié de la population mondiale est urbanisée et ce taux dépasse même 75% en Europe occidentale. Des

taux aussi élevés d'urbanisation sont également rapportés pour les populations d'Amérique du Nord et du Sud, de Russie (71%), de Corée (73%) et d'Australie (82%). Les mêmes auteurs estiment la superficie globale de Urbs à 4.000 km<sup>2</sup> en l'an 1 EC mais avec une incertitude de 75% ( $\pm 3.200$  km<sup>2</sup>) sur l'aire exacte. Au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, avec la révolution industrielle la superficie mondiale de Urbs est triplée, de 16.000 ( $\pm 2.400$ ) à 47.000 km<sup>2</sup> ( $\pm 2.300$ ). En 2000 EC, les auteurs l'évaluent à 535.300 km<sup>2</sup> ( $\pm 5.353$ ), ce qui est inférieur aux 75 Mha (750.000 km<sup>2</sup>) estimés par ailleurs et présentés dans le [tableau 5](#). La différence résulte probablement dans les critères d'identification de Urbs (Urbs urbaine/rurale) et probablement aussi dans une taille variable de l'aire minimale identifiable en fonction du degré de résolution au sol des études. Si l'on prend l'estimation médiane de la population mondiale de GOLDWIJK et al. (2010, op. cit.), à savoir 6,145 milliards, que l'on considère que la moitié vit en Urbs, la densité globale moyenne de population pour cette FP serait de 5.740/km<sup>2</sup>. Ces auteurs évoquent par ailleurs une densité maximale de 40.000/km<sup>2</sup> (Urbs urbain).

### *Des caractères de la ville antique à la ville industrielle en Europe*

MERLIN (op. cit.) se réfère à FUSTEL DE COULANGES (1885) pour caractériser la ville antique. Tant en Égypte qu'à Rome, les villes antiques sont ordonnées avec des tracés rectilignes, des places rectangulaires et des axes souvent orientés selon les quatre points cardinaux qui tradiraient une influence religieuse. La ville serait "*la projection sur terre de l'espace où vivent les divinités*". Mais ce plan rectangulaire ne s'applique pas toujours, notamment en Grèce, du fait de contraintes topographiques ou plus largement géomorphologiques. Par contre, Rome adopte une géométrie régulière basée sur deux axes rectangulaires: le *cardo* (Nord-Sud) et le *decumanus* (Est-Ouest). L'espace autour de la ville s'organise avec la domestication des animaux qui permet le transport des productions sur de plus grandes distances. VIDAL (2014, op. cit.) relate ainsi une organisation concentrique autour de Urbs dès l'époque romaine telle que schématisée à la [figure 6.6](#). Urbs se développe donc en Ager.

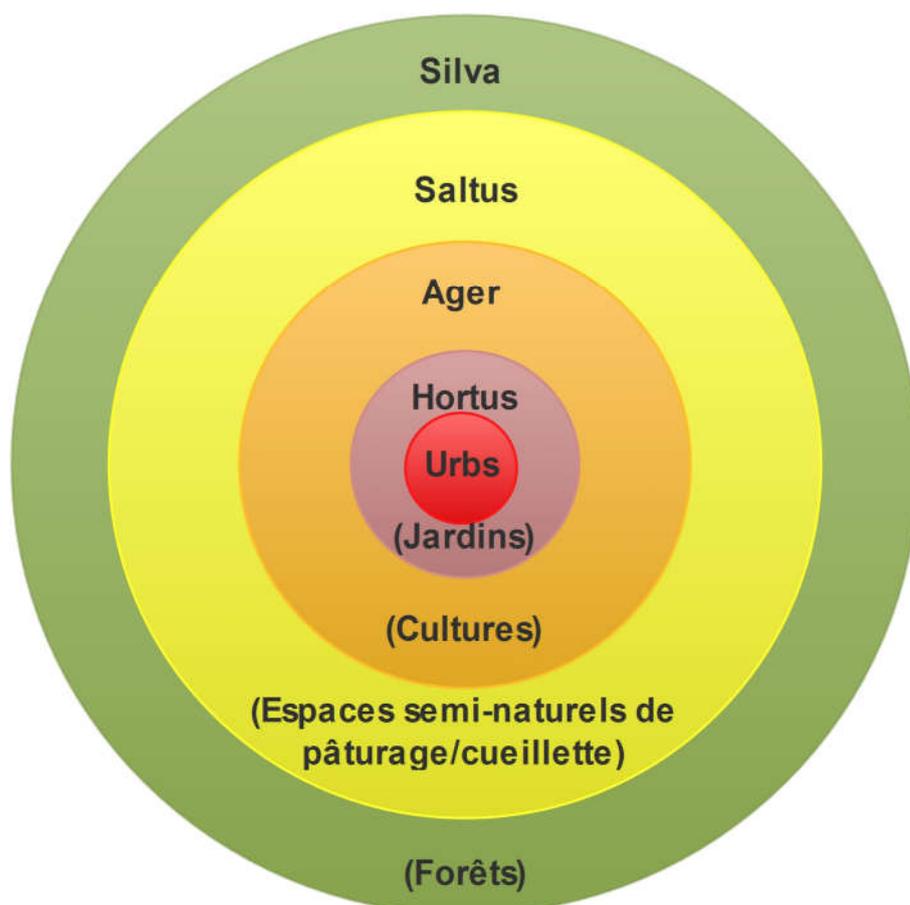
On observe ainsi que les citadins sont en contact direct avec les horticulteurs, principalement les maraîchers, et que les paysans en sont plus éloignés et plus éloignés encore les bergers ou pasteurs. Une remarque importante en est déduite qu'un important gradient centripète de densité de population se marque dans ce schéma d'organisation spatiale en relation à la fois avec la densité et les types d'emplois dans le travail. La révolution agraire antique évoquée par MAZOYER et ROUDART (2002, p.292) confirment l'émergence de ces diverses facettes paysagéniques.

Avec le Moyen Âge, la ville est cerclée de murailles et les constructions s'y entassent pour un impératif de sécurité (LACAZE, 1990, p.25) contre la menace des envahisseurs barbares. Le caractère commerçant des villes s'affirme avec le développement du pôle de la place du marché au même titre que la cathédrale et le château du souverain (MERLIN, op. cit., p.9). La fresque d'Ambrogio Lorenzetti, "*Allégorie du bon et du mauvais gouvernement (1337-1339)*", traduit les principes d'échange et de modération promus par la commune de Sienne pour parvenir à une osmose entre la campagne et la ville. Un extrait en est reproduit à la [figure 6.7](#).

Le Moyen Âge est cependant considéré comme une période de déclin urbain alors que la campagne se renforce selon LAMING (op. cit.). Mais MERLIN décrit les villes de cette époque comme dotée d'une certaine harmonie avec une homogénéité des matériaux dans de petites constructions d'architecture simple autour de rues étroites et tortueuses. Leur plan est bien adapté à la topographie et évite de donner prise au vent. Les "*quartiers commerçants sont situés près des portes, au contact des routes et de la campagne*".

Avec la Renaissance, dès le XV<sup>e</sup> siècle en Italie (*Quattrocento*), LAMING signale que "*les quartiers se spécialisent suivant les métiers, la population cosmopolite se regroupe en communautés, les classes sociales stratifient*" et les risques de famine augmentent également. MERLIN précise que le mouvement architectural issu de Florence s'insère d'abord modestement dans la ville médiévale. Puis, il réintroduit des plans géométriques orthogonaux ou rayonnants dont la dimension militaire produit des structures en étoile dans les villes forteresses. Ensuite, émerge le style baroque qui domine l'Europe méridionale et particulièrement l'Italie au XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles. Pour MERLIN, il n'y a pas à proprement parler d'urbanisme baroque mais simplement une surimposition de lignes droites et d'arcs de

cercles au tissu urbain médiéval. Par contre, pour LACAZE (op. cit., p.26) l'urbanisme baroque constitué "de grandes percées à travers le tissu des quartiers anciens" constituent un système dont le succès s'avère durable. De larges voies rectilignes forment des axes orientés vers des églises, des châteaux, des tours ou de grands monuments. En France, MERLIN distingue une évolution architecturale non vers le baroque mais vers un style classique en relation avec un souci cartésien d'ordre et de raison. Ce style se retrouve dans les villes forteresses de VAUBAN, le palais de Versailles, les grandes places à Paris (Dauphine, des Vosges, Vendôme, etc.), et les places royales fréquentes dans les villes de province, également évoquées par LACAZE. En même temps, le style classique fait franchir à la ville les remparts du Moyen Âge ou les fait disparaître au profit notamment de grands boulevards. MERLIN cite aussi la reconstruction de Londres en style néoclassique après son incendie de 1666 ou le quartier des grands canaux circulaires au cours des XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles.



*Figure 6.6.: Organisation concentrique schématique de l'espace autour des villes dès l'époque romaine*

Avec les deux premières révolutions industrielles (charbon/machine à vapeur, pétrole/moteur à explosion) et l'exode rural qu'autorise les révolutions agricoles qui leur sont associées dès le milieu du XVIII<sup>e</sup>, l'urbanisme (Urbs urbain) fait face aux défis de l'extension des grandes villes. MERLIN évoque les nouvelles préoccupations techniques et utilitaires notamment pour les réseaux d'adduction d'eau et de collecte des eaux usées, pour les transports en commun et la mobilité des voitures hippomobiles puis automobiles, les nouveaux logements pour les ouvriers et les employés "hors des murs", etc. De nouvelles villes "industrielles" sont créées près des mines ou sont issues de la transformation des ports.



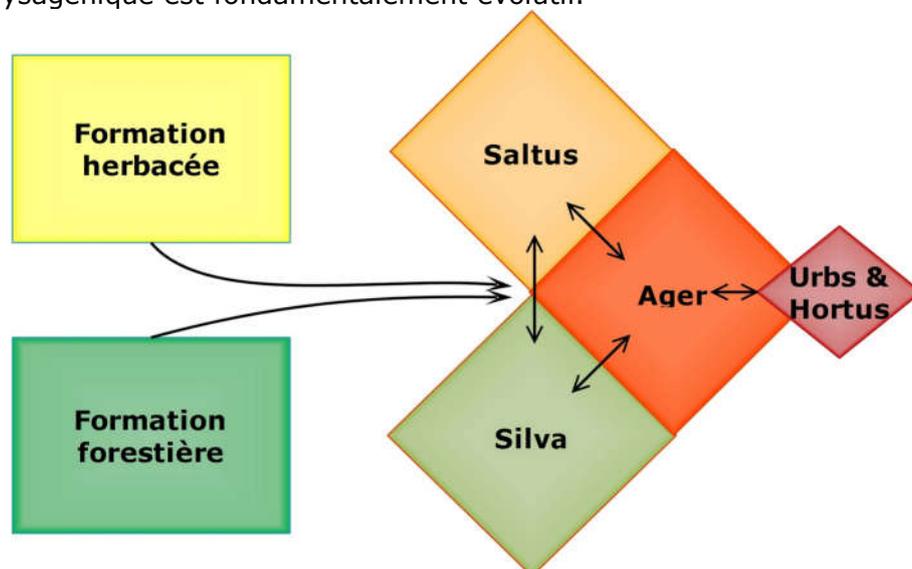
*Figure 6.7: Vue partielle de la fresque de Lorenzetti centrée sur les effets du bon Gouvernement en ville (Photo: Fotolia)*

### 6.1.7. Discussion

#### *Dynamique des FP à l'ère quaternaire*

Avec l'apparition de *Homo sapiens* au Pléistocène les diverses facettes naturelles du monde commencent à muter en facettes paysagéniques. La première mutation s'opère avant la fin des glaciations. Elle concerne la forêt primaire tropicale humide qui devient Silva sous l'action des chasseurs cueilleurs et des essarteurs. Ceux-ci pratiquent l'agriculture itinérante sur brûlis. Puis les savanes naturelles mutent en *Saltus* par l'élevage des pasteurs et leur pratique des feux pour maintenir les couverts herbeux. Un mouvement de migration humaine s'étend en dehors de l'Afrique, vers l'Asie grâce à la végéiculture de plantes comme le taro et l'igname. La sédentarisation humaine et l'apparition concomitante de *Ager* et *Urbs* grâce à la céréaliculture marque le début de l'Holocène à 8 ka AEC. L'anthropisation de la planète progresse à partir de quatre grand foyers de *Ager* et de *Urbs*: celui du blé au Moyen et Proche Orient, celui du riz en Chine, du maïs au pays aztèque (Mexique) et de la pomme de terre au pays inca (Pérou). Sous climat humide et subhumide, tropical ou tempéré, la colonisation humaine se marque par l'extension des superficies de *Ager* et de *Saltus* dans les forêts et les formations herbeuses, mais une partie significative se mue aussi en Silva par déprise et reforestation. Quant à la dynamique de Hortus, elle est liée à celle de *Urbs*. La vitesse de colonisation de la niche-R d'*Homo sapiens* semble prendre une allure exponentielle avec la première révolution industrielle. Il est à priori raisonnable de considérer que cette niche-R arriverait bientôt "à saturation". Et donc, d'envisager une transition démographique dans les décennies futures, c'est-à-dire un changement d'équilibre entre les taux de mortalité et taux de natalité de notre espèce. Mais, il est aussi possible d'envisager des innovations paysagéniques faisant intervenir la mutation de Silva ou de *Saltus* en *Ager*.

La [figure 6.8](#) reproduit un schéma de la dynamique possible entre les différentes facettes paysagères générées par l'anthropisation de l'écosphère dès le Pléistocène. Ce schéma s'applique aux régimes climatiques humides et subhumides de terres hautes ou de terres basses à hydromorphie permanente ainsi qu'à certains milieux non confinés à hydromorphie temporaire, c'est-à-dire aux diverses conditions écoclimatiques favorables à l'aluminisation des sols (voir paragraphes 3.1.2. et 3.1.3. au point 3). Il s'applique aussi partiellement en dehors mais néglige les FP de *Desertum* et de *Aqua*. Comme tel ce schéma n'a qu'une valeur descriptive et ne fournit pas de clés pour expliquer les diverses transformations de l'espace naturel par *Homo sapiens*. Son ambition se limite simplement à démontrer la pertinence du concept de FP sur les vastes régions qui composent le globe. Les clés des mutations paysagéniques ne peuvent pas être trouvées à l'échelle globale abordée car elle est bien trop petite face à l'extraordinaire diversité géographique des espèces paysagéniques (EP). Si l'aluminisation des sols se déroule sur de vastes étendues pouvant être identifiées à l'échelle planétaire, les processus en cause génèrent des résultats paysagéniques trop variés pour être discernables à cette échelle. C'est au niveau local des holons paysagéniques (HP) que certaines données relatives aux traits paysagéniques peuvent être examinées pour expliciter au moins en partie les dynamiques territoriales adoptées par les diverses FP. Mais il semble déjà clair que le schéma proposé à la [figure 6.8](#) n'envisage aucune fixité des FP et donc aussi des EP qui les composent. Une terre arable (Ager) peut se convertir en toute autre FP et réciproquement. Le modèle paysagénique est fondamentalement évolutif.



*Figure 6.8: Schéma des dynamiques possibles des FP suite à l'anthropisation de l'écosphère sous conditions écoclimatiques favorables à l'aluminisation des sols*

### *Controverses sur le concept d'Anthropocène*

Le concept de Anthropocène comme nouvelle époque géologique est proposé par CRUTZEN (2002) cité par MALM & HORNBORG (2014) et PREISER et al. (2017), mais reste non reconnu par les géologues. CRUTZEN suggère de faire démarrer cette époque à l'invention de la machine à vapeur par James WATT. Cette invention signe l'avènement de la première révolution industrielle et conduit effectivement à l'extraction minière du charbon relayée par celle du pétrole avec la deuxième révolution industrielle du moteur à explosion. DIOT et TASTET (1995) rappellent par ailleurs que le début du Holocène est marqué par le réchauffement climatique conduisant à la fin des glaciations du Pléistocène et à une montée des eaux donnant lieu à une transgression marine avec dépôts de sédiments marins et continentaux jusqu'en 6000 AEC. On peut comprendre la suggestion de l'avènement de l'Anthropocène également au vu de l'allure exponentielle que prend l'évolution de la population humaine et de la SAU (Ager + Saltus) à la [figure 6.1](#) ainsi que de Urbs à la [figure 6.5](#). Mais cette allure concordante est due au rôle majeur donné à la démographie humaine dans les modèles d'évolution globale des FP. Pour MALM & HORNBORG, un Anthropocène pourrait démarrer avec la maîtrise du feu et donc de l'utilisation énergétique de stocks de carbone produits par la biosphère. Mais ces auteurs insistent plus sur l'avènement d'une économie

fossile "capitaliste" avec les révolutions industrielles depuis le XIX<sup>e</sup> siècle. Une économie décidée par une minorité infinitésimale de la population qui possède les moyens et pouvoirs d'investissement financiers nécessaires. Les mêmes auteurs soulignent la rupture épistémologique de dénaturalisation de la dynamique du climat. Mais, cette dernière est immédiatement "re-naturalisée" par l'inscription de la maîtrise du feu dans les traits génotypiques de l'espèce humaine via la théorie du réchauffement climatique anthropique! De plus, toujours selon ces auteurs, cette "re-naturalisation" embarque la sociologie observatrice des comportements humains dans les sciences naturelles. L'Anthropocène devient ainsi un concept post-cartésien par l'abandon d'une distinction entre Culture et Nature. Un raisonnement identique vaudrait également pour l'érosion globale de la biodiversité induite par l'anthropisation de la planète. Elle a conduit à l'élimination d'habitats pour des espèces non domestiquées, ce qui a déclenché aussi un contre-mouvement de conservation de la Nature. C'est ainsi qu'émerge le concept de socio-écosystème planétaire évoqué par PREISER et al. (op. cit.) comme l'un des quatre cadres prospectifs pour assurer un bon Anthropocène. Enfin, NEKOLA et al. (2013) concluent que l'on atteindrait avec la globalisation planétaire de la civilisation humaine une possible fin de la dynamique darwino-malthusienne ayant permis à l'humanité de surmonter jusqu'à présent les effondrements successifs des civilisations (mésopotamienne, égyptienne, grecque, romaine, maya, etc.). Pour les auteurs, ce type de dynamique a pu réussir car les civilisations étaient localisées alors qu'aujourd'hui la crise serait mondialisée. Mais, ils reconnaissent que nous sommes toujours dans des systèmes complexes adaptatifs à caractère foncièrement imprévisible. Le débat n'est donc pas clos entre malthusiens et cornucopiens (ou abondantistes), d'autant plus que la globalisation mondiale ne peut aucunement gommer les différences entre les ressources naturelles et culturelles des régions, sous-régions et localités des divers pays du globe.

## *6.2. Focalisation agropédologique locale*

Les HP (holons paysagéniques) constituent un niveau d'organisation sous-jacent aux FP. Les FP s'identifient au niveau local, c'est-à-dire infra-régional au sens qu'il est inférieur ou égal à celui d'une région naturelle. Les critères de subdivisions administratives n'interviennent pas. On peut cependant avancer qu'au sens administratif le niveau local est infra-départemental ou infra-provincial, mais il peut être intercommunal ou inter-villageois dans une même IP (instanciation paysagénique). L'IP elle-même appartient à un niveau sous-jacent à une EP (espèce paysagénique) selon le schéma de la structure organisationnelle hiérarchique proposé à la [figure 2.5](#) au point 2. Le niveau de l'EP est lui-même aussi inférieur ou égal à celui d'une région naturelle. Le HP est un niveau imperceptible à un observateur dénué de connaissances sur les pratiques empiriques des acteurs œuvrant dans les différents types de FP pour les modéliser selon les caractères phénotypiques souhaités. L'identification des HP nécessite des capacités d'expertise pour identifier les traits génomiques qui fondent l'expression des caractères des HP conférés par les acteurs correspondants. On en arrive ainsi aux traits et caractères paysagéniques propres aux FP d'une IP ou plus largement d'une EP. Sous l'angle spécifique des processus d'acidification et d'aluminisation des sols décrits dans le point 3, les interactions entre le trait du taux d'aluminisation avec d'autres traits d'ordre agropédologique sont examinés. Les dynamiques engendrées sont également commentées selon cette même focale agropédologique. L'aluminisation semble bien jouer un rôle dans la différenciation paysagénique par son effet sur la croissance des végétaux et donc sur la production primaire de biomasse et in fine sur les "rendements". Toutefois, l'aluminisation semble favoriser la biodiversité en espèces ligneuses comme suggéré par les données du point 5. Une FP n'émerge que si les traits de ses HP constitutifs sont inter-compatibles et que les caractères dont ils fondent l'expression permettent de soutenir une capacité de production acceptée et souhaitée par les acteurs du point de vue socio-économique et culturel. La production concerne des denrées alimentaires végétales et/ou animales, des produits textiles, énergétiques ou de construction, etc. Elle comprend à des degrés divers des produits primaires ou peu transformés ainsi que des commodités non marchandes ou des services commerciaux trouvant des débouchés suffisants sur les marchés. Au point 2 de présentation générale du modèle paysagénique, une symbolique est suggérée pour la représentation des HP. Elle fait intervenir une succession de lettres accolées en deux

groupes séparés par une virgule, de type "iAg,abcde..." pour des holons d'une FP de Ager par exemple (voir point 2.4.1.). "iAg" avant la virgule représente un commun potentiel constitué d'agents intelligents (symbole "i") d'un holon de FP de Ager (symbole "Ag") et la succession des lettres accolées "abcde...", après la virgule, représente pour chaque lettre un trait spécifique à une holon quel que soit le compartiment vertical auquel ce trait se rapporte. Les différents traits symbolisés se rapportent aussi bien à un système de culture avec son itinéraire technique, qu'à des traits topographiques, pédologiques (degré d'aluminisation, pH, profondeur), socio-économiques (production de rente ou de subsistance par exemple), etc., selon les diverses disciplines d'expertise concernées et impliquées. Il en résulte une dynamique des holons bien plus rapide que celle des FP, puisqu'un système de culture peut se modifier au gré des conjonctures économiques, des innovations technologiques, etc. Le même type de raisonnement vaut pour les holons des autres FP aux agents intelligents spécifiques (Silva, Saltus, Urbs, Hortus, Desertum ou même Aqua).

Encore un mot sur les traits et caractères des HP de Ager, Saltus, Silva ou Hortus pour se référer de nouveau à JOUVE (op. cit., p.73). La logique des pratiques qui façonnent les caractères est celle des décisions prises par les agriculteurs (ou horticulteurs, pasteurs et forestiers). Les pratiques ne sont donc pas le fruit du hasard. Les décisions sont basées sur une perception empirique des traits du milieu. Les savoirs acquis témoignent d'une rationalité paysanne: "*les paysans ne sont pas assez savants pour raisonner de travers*" (Montesquieu). Parmi les contraintes que subissent ces acteurs figurent principalement les adversités pédo-climatiques, phyto- et zoo-sanitaires, la volatilité ou l'exiguïté des marchés, etc. Les pratiques et leur évolution sont mues par des stratégies et des fluctuations ou changements d'objectifs poursuivis. Le travail peut devenir plus limitant que la terre (exemple de semis d'une même espèce cultivée dans des terrains aussi diversifiés que possible pour choisir de ne sarcler que là où la croissance s'avère la meilleure). La logique interne peut privilégier le sens à travers les fonctions plutôt que la cause à travers les effets, ce qui singularise l'approche systémique par rapport à la démarche scientifique classique de type positiviste. Il y a nécessité de combiner des éléments d'explication provenant de différents champs disciplinaires (JOUVE, op.cit., p. 73). A côté de la science, la religion, l'art, la culture peuvent donc aussi intervenir et motiver les caractères des HP.

### 6.2.1. Traits de HP de Silva en abattis-brûlis

Les pratiques ancestrales de l'agriculture itinérante sur brûlis ou essartage, ainsi que de la chasse et de la cueillette remontent au Pléistocène dans les régions forestières tropicales humides d'Afrique, comme déjà évoqué auparavant (point 5.1.1.). FEARNSIDE (1985) dresse pour la forêt amazonienne un tableau assez complet de ces pratiques anciennes traditionnelles mais aussi de pratiques alternatives nouvelles. DE ROUX (1991) décrit quant à elle le système d'abattis-brûlis pour la forêt de Taï au Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire dans le bassin inférieur du fleuve Cavally, bordure de la frontière avec le Liberia. ALONGO (2013) s'intéresse au système intensifié d'essartage à Yangambi près du fleuve Congo, dans la cuvette centrale congolaise (RDC) dont il résulte une fragmentation forestière.

#### *Situations et cadres géomorphologiques*

Dans l'apparente homogénéité de l'étendue forestière du bassin de l'Amazone, FEARNSIDE (op. cit.) distingue les pratiques dans les terres hautes (*terra firme, uplands*) de celles dans les terres basses (*várzea, floodplains*). Il met ainsi l'accent sur un relief plus varié que celui habituellement présumé. Très schématiquement, SANCHEZ et al. (1982) ont représenté ce relief dans leur figure 4. Il est reproduit et adapté à la [figure 6.9](#). Les terres hautes à relief plat à ondulé représentent 50% de la superficie du bassin tandis que les mêmes auteurs rapportent que 75% du bassin amazonien sont constitués de sols acides évalués comme "infertiles". Le taux d'aluminisation y est tel qu'une toxicité aluminique en résulterait pour de nombreuses espèces cultivées dans l'ensemble des terres hautes (*terra firme*).

Les terres basses sont constituées d'alluvions actuelles inondées régulièrement lors des crues. Elles comportent aussi des alluvions récentes surélevées en terrasse dont l'inondation est plus occasionnelle et dont le régime éoclimatique est marqué par une hydromorphie temporaire. Les terres basses à hydromorphie permanente ou temporaire représentent environ 25% de la

superficie du bassin Amazonien. Un tableau similaire est d'application dans la forêt de Taï en Côte d'Ivoire, si ce n'est que le paysage y est coiffé de crêtes latéritiques. La distinction entre terres hautes et basses est également adoptée par DE ROUW (1991). CASTELLA (2005) adopte aussi la distinction terre haute et basse au Nord-Vietnam mais sans préciser plus avant les HP du point agropédologique.

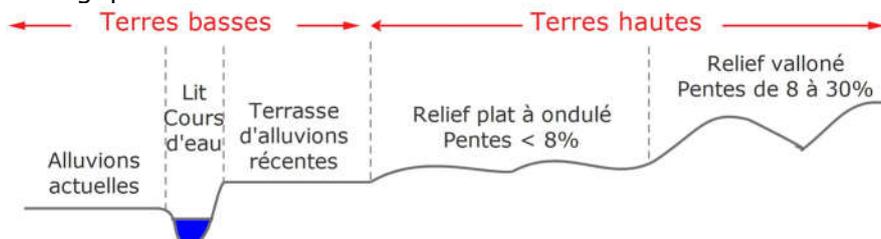


Figure 6.9: Reproduction schématique du relief du bassin de l'Amazonie d'après SANCHEZ et al. (1982, fig.4)

Pour la région de Yangambi en RDC, une localisation générale est reproduite sur fond hydro-orographique à la figure 6.10. ALONGO (op. cit.) décrit la cuvette centrale comme une immense dépression généralement boisée de 900.000 km<sup>2</sup>. Elle est limitée par la courbe de niveau de 500 m et drainée par le fleuve Congo et ses affluents. Elle correspond à une ancienne mer intérieure dont les lacs Tumba et Maï-Ndombe sont les vestiges résiduels. Deux séries de sols sont distinguées par l'auteur sur les lieux de son étude: la série *Yangambi* occupe des plateaux de sédiments argilo-sablonneux tandis que la série *Yakonde* occupe le haut des versants de ces mêmes plateaux de déclivité comprise entre 3 et 7%, constitués cette fois de sédiments sablo-argileux remaniés par colluvionnement.

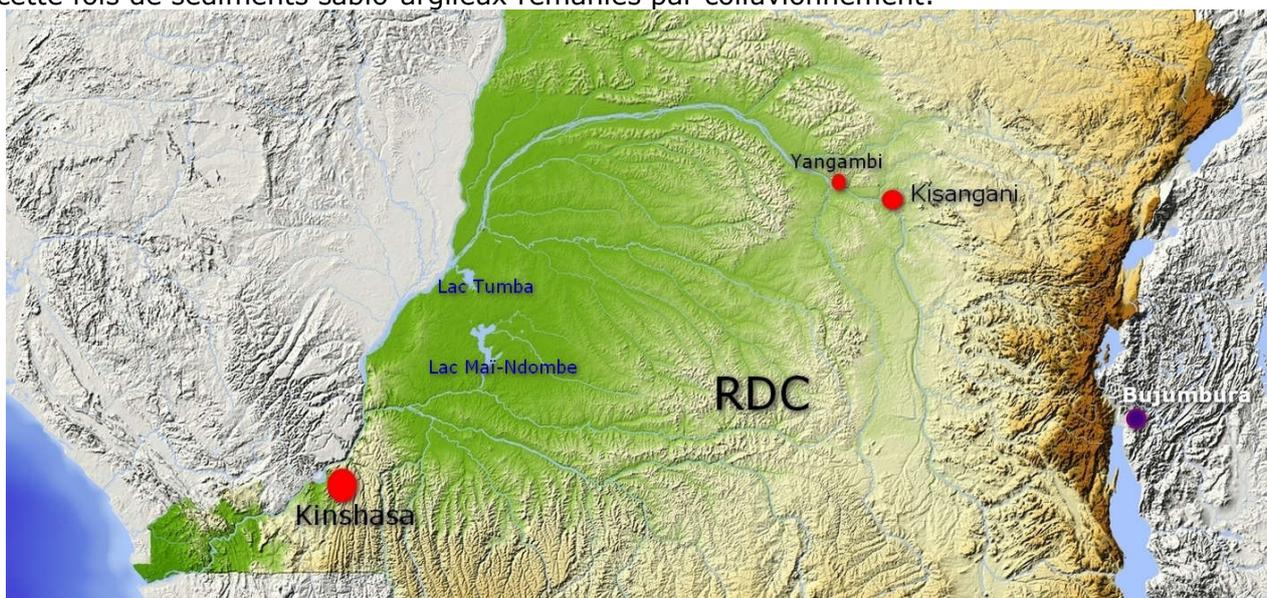


Figure 6.10: Localisation de la région de Yangambi dans la cuvette du fleuve Congo en RDC (Fond oro-hydrographique: Fotolia)

### Une rotation longue et régénératrice de la forêt

La pratique traditionnelle en forêt tropicale humide est dominée par l'agriculture itinérante sur abattis-brûlis. Cette dernière est constituée d'une rotation très lente marquée par une longue phase de régénération forestière après une courte période de 1 à 3 ans de cultures vivrières. Le tableau 6 propose de distinguer 5 stades dynamiques dans cette rotation à partir d'un abattis-brûlis initial produisant une clairière.

FEARNSIDE (op. cit.) justifie la courte durée de cultures annuelles essentiellement par deux contraintes subies par les agriculteurs itinérants, à savoir la faible fertilité des HP pour les cultures vivrières du fait du pH nettement acide des sols et de l'invasion des cultures par les herbes adventives. Ces hypothèses sont confirmées par SANCHEZ et al (1982, op. cit.). Dans son étude de la végétation forestière de Taï en Côte d'Ivoire, DE ROUW (op. cit., p. 55)

précise qu'une première période de déclin des espèces pionnières se situe au stade de "accrue", après la déprise agricole, mais qu'à ce stade le nombre de graines d'adventices herbacées présentes dans le sol est encore trop élevé pour une remise en culture, en l'occurrence du riz pluvial (durant une seule année, plus rarement deux). L'agriculteur de Taï choisira plutôt le stade de "forêt jeune" pour un nouvel abattis-brûlis. Plus tard, l'abattis-brûlis deviendrait plus exigeant en travail à cause du développement d'espèces ligneuses au bois plus dur. Par ailleurs, l'homogénéité du brûlis se trouve compromise pour des forêts plus âgées à structure primaire. DE ROUW (op. cit., p. 108) estiment alors que 10 à 30% de la superficie mal brûlée n'offre plus qu'un rendement nul ou insignifiant en condition de sol acide.

*Tableau 6. Stades de régénération forestière à partir d'une parcelle d'agriculture itinérante sur abattis-brûlis d'après les données de littérature de OPDECAMP (1997, op. cit.)*

Stade dynamique	Chronologie (années)	Description sommaire
Clairière	0 à 5	cultures annuelles d'abattis-brûlis et déprise de post-culture
Accrue	5 à 15	plantes herbacées, buissons et arbres de petite taille à croissance rapide et de faible longévité
Forêt jeune	15 à 30	grands arbres héliophiles et en croissance rapide de biomasse
Forêt adulte	30 à 50	écosystème forestier adulte, à plusieurs strates d'arbres, en vitesse de croissance modérée de biomasse
Forêt âgée	> 50	structure et biomasse d'une forêt "primaire" en croissance lente en termes de biomasse nette annuelle

Une théorie énonce donc qu'après un abattis-brûlis, les rendements des cultures annuelles s'affaiblissent rapidement d'une récolte à l'autre au point de ne plus rentabiliser le travail consenti. La rotation longue permet une régénération de la forêt, une accumulation d'éléments nutritifs minéraux dans les biomasses forestières et une décroissance du potentiel séminal herbacé. Une telle rotation équivaut aussi à un assolement sur de grands espaces. Il en résulte de faibles densités de population déjà rapportées avec des seuils critiques de 10 hab/km<sup>2</sup> pour JOUVE (op. cit., p.89), de 3-4 hab/km<sup>2</sup> pour TSAYEM DEMAZE (op. cit.) et de 8,5 hab/km<sup>2</sup> pour MAYAUX et al. (op. cit.). Il n'en reste pas moins que des villages semi-sédentaires puissent se constituer et qu'ils soient secondés par des campements éloignés en forêt tels que décrits par DE ROUW (op. cit.) pour établir et entretenir des champs plus éloignés du village et de préférence en terre basse pour le riz, près des rivières. En Amazonie, ce sont aussi les HP de forêt jeune de 14 à 21 ans qui sont normalement soumis à l'abattis-brûlis d'après NICHOLAIDES et al. (1985), ce qui fait une rotation sur environ 20 à 25 ans. Cependant, dans la région de Yangambi (RDC), ALONGO (op. cit., p.31) fait part d'une pratique de cultures associées assez variées après le brûlis telles que manioc, bananier, riz, maïs, igname, taro, patate douce et arachide. Elles se sont encore plus diversifiées récemment avec du soja et du niébé. L'association manioc-bananier-maïs-riz permet d'assurer des premières récoltes de riz et maïs 4 à 6 mois après les semis/plantations, de manioc après 18 à 24 mois et de bananes après 15 à 36 mois. Dès la troisième année, les parcelles retournent en jachère mais pour une durée de seulement 3 à 6 ans. L'auteur rapporte donc des durées assez courtes de rotation avec le recrû forestier. Ce dernier se verrait limité au stade d'accrue. Il signale même qu'un nouveau système de culture dénommé *zongisa* tend à supprimer carrément toute jachère arborée au profit d'une jachère herbeuse. Dans un tel cas, on changerait carrément de FP avec une mutation de Silva en Ager!

#### *Effets temporaires du brûlis forestier sur le taux d'aluminisation des HP*

SANCHEZ et al. (1983) rapportent les résultats d'expérimentations conduites dans 3 parcelles séparées d'environ 300 m à la station de recherche de Yurimaguas dans le bassin supérieur de l'Amazone à 180 m d'altitude. Ces 3 parcelles, dénommées "Chacras I, II et III", ont une superficie variant de 1 à 2 ha. Elles partagent la même position géomorphologique, le même type de sol, et la même végétation initiale, à savoir une forêt jeune de régénération de 17 ans d'âge et 30 m de hauteur en 1972. Le matériau du sol est sableux en surface, ±11% d'argile,

24% de limon et 65% de sable, mais devient limoneux avant la profondeur de 50 cm. Un abattis-brûlis est pratiqué sur les 3 parcelles respectivement en 1972, 1973 et 1975 avant de poursuivre l'expérimentation par comparaison de différents itinéraires techniques relatifs notamment à la fertilisation minérale. Au tableau 7 sont reproduits les effets du brûlis sur le pH et le taux d'aluminisation.

*Tableau 7. Effets du brûlis d'une forêt jeune (17 ans, 30 m de hauteur) à Yurimaguas sur le pH et le taux d'aluminisation superficiel du sol (0-10 cm) "m%" d'après SANCHEZ et al. (1983)*

Parcelle	pH (H <sub>2</sub> O)		m (%)	
	Avant brûlis	Après brûlis	Avant brûlis	Après brûlis
Chacra I	4,0	4,5	82	59
Chacra II	3,9	4,9	55	13
Chacra III	4,1	4,6	41	24

Une réduction significative du taux d'aluminisation est observée dans les 3 parcelles de même qu'une augmentation du pH. Les auteurs ne fournissent pas de mesures en profondeur où le taux d'aluminisation initial dépasse cependant largement les 80% dans la parcelle "Chacra I" d'après les données graphiques de leur figure 4. La variabilité entre les parcelles est attribuée aux qualités inégales du brûlis ainsi qu'aux héritages du passé qui s'inscrivent particulièrement dans la partie superficielle du sol. Cette variabilité héritée peut se révéler particulièrement importante dans une station expérimentale de recherche agronomique. Il faut savoir que les caractéristiques du sol prises en considération sont relatives à des épaisseurs de plus de 100 cm dans leur classification scientifique comme la Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014), le référentiel français (AFES, 2009) ou le référentiel mondial (FAO, 2018) et des épaisseurs de plus de 50 cm dans leur classification technique (SANCHEZ et al., 2003, op.cit.). Une tolérance de variabilité est appliquée dans les critères d'identification des catégories classées entre les limites d'un intervalle toléré. Dès lors, il faut conclure que ces trois parcelles possèdent un trait d'aluminisation identique dans leur classification technique: >60% avant 50 cm de profondeur. Si on applique une tolérance analogue pour les traits topographiques, de matériau parental et d'itinéraire technique, les trois parcelles considérées font partie d'un même HP.

Au fil du temps de mise en culture sans engrais ni amendement, le taux d'aluminisation superficiel retrouve ses valeurs initiales après 3 ou 4 ans d'après la figure 2 de SANCHEZ et al. (1983, op. cit.). L'effet est donc très temporaire et sa durée correspond au temps de culture traditionnel avant la déprise par les agriculteurs itinérants dans la clairière. Cette dernière va alors évoluer vers une accrue comme indiqué dans le tableau 6. La neutralisation de l'aluminium par le brûlis de la végétation s'explique par les cendres résiduelles contenant des oxydes de calcium, de magnésium et de potassium à raison de plusieurs centaines ou milliers de kg/ha selon les données rapportées par OPDECAMP (1997, op. cit.). L'aluminium serait "hydroxy-polymérisé" sous forme amorphe (Al<sub>am</sub>), puis dépolymérisé à nouveau par l'acidification naturelle qui se poursuit voire s'intensifie dans la clairière via la réaction **R15** vue au point 3.

MOREAU (1993) rapporte également des variations de pH après brûlis d'une forêt âgée à structure primaire, entre 0-10, 10-20 et 20-30 cm. Son dispositif est situé à la station de UNESCO de Taï (Côte d'Ivoire) pour le projet MAB (Man And Biosphere) dans deux parcelles Taï 1 (bas de pente) et Taï 2 (mi-pente). Ses mesures opérées annuellement entre 1978 et 1984 indiquent un pH(H<sub>2</sub>O) avant brûlis oscillant entre 4,8 et 5,0 pour Taï 1 et entre 5,1 et 5,2 pour Taï 2 dans les 3 épaisseurs considérées. De telles valeurs indiquent un taux d'aluminisation supérieur à 60% pour Taï 1 et inférieur à 60% pour Taï 2 ce qui pourrait être diagnostique de 2 HP différents. Les deux parcelles sont suivies durant 6 ans par rapport à une sous-parcelle témoin non défrichée. D'après la figure 3 de l'auteur, pour Taï 1, les augmentations de pH par rapport au témoin sont les plus importantes: de +0,5 à +1,5 en surface. Ces changements positifs restent significatifs durant les 6 ans jusqu'à 20 cm de profondeur. Pour Taï 2, les différences de pH par rapport au témoin sont complètement

estompées après 4 ans.

Les résultats des mesures de pH (H<sub>2</sub>O) et du taux d'aluminisation du sol (m%) entre 0 et 20 cm de profondeur présentés par ALONGO (op. cit.) sont comparés entre des forêts âgées (denses) et des clairières (jachères herbeuses et lisières). Les pH (H<sub>2</sub>O) sont tous compris entre 4,1 et 4,7 (p.169) en moyenne et les taux d'aluminisation entre 59 et 80% (figure 3.25 à la page 138 et figure 3.34 p.149). Ils confirment ainsi une absence d'effet durable du brûlis après la déprise, voire même une absence d'effet probable si les stades de régénération forestière sont court-circuités, comme dans le système de culture *zongisa* évoqué pour cette région de Yangambi. Malheureusement l'étude d'ALONGO ne fournit pas de données sur les rendements agricoles obtenus dans de telles conditions.

#### *Effets du brûlis forestier sur les rendements agricoles*

Dans l'expérimentation à Yurimaguas, les rendements de plusieurs systèmes de culture (SC) continue, avec ou sans "fumure minérale complète annuelle et chaulage ou amendement calcaire épisodique", sont mesurés durant 8 ans après l'abattis-brûlis de la jeune forêt de régénération, dont deux SC sont présentés par SANCHEZ et al. (1982 et 1983, op. cit.). Les deux SC se rapportent pour l'un à une rotation riz-maïs-soja et pour l'autre à une rotation riz-arachide-soja. Le riz y est cultivé en mode pluvial, sans irrigation. Il y a donc 4 espèces cultivées qui vont livrer des données de rendement à l'hectare durant toute la durée d'expérimentation. Ces rendements varient d'année en année notamment selon la répartition des pluies et l'état phytosanitaire qui ne semble pas être contrôlé. Ils se révèlent cependant plus stables et nettement plus élevés en cas de fertilisation minérale et de chaulage ou d'amendement calcaire. Dans chaque SC, les 3 espèces sont plantées durant une même année, assurant une couverture quasi continue du sol. Les auteurs signalent qu'en l'absence de fertilisation et amendement, les rendements deviennent négligeables après la troisième saison et donc dès le courant de la deuxième année après le brûlis. Le tableau 8 reproduit les moyennes des rendements pour les 4 espèces selon les deux modalités envisagées.

Parmi les espèces cultivées, c'est le riz pluvial qui semble le plus intéressant sans engrais ni chaulage ou amendement avec près de 1 t/ha en moyenne sur 8 ans, ce qui est en accord avec ses mécanismes phytobiologiques de résistance à l'aluminium évoqués au point 4. Les auteurs ne présentent pas de comparaison entre les 2 types de rotations qui devraient théoriquement être diagnostiques de deux HP distincts. Les résultats ne contiennent pas d'observations sur les états phytosanitaires et notamment sur l'invasion éventuelle d'adventices. Il n'en demeure pas moins qu'ils rendent incontournable la prise en compte du taux d'aluminisation du sol dans l'identification des HP de Silva.

*Tableau 8. Moyennes des rendements obtenus en t/ha pour les 4 espèces cultivées pour "n" récoltes durant les 8 ans d'expérimentation après abattis-brûlis à Yurimaguas d'après SANCHEZ et al. (1982, 1983, op. cit.)*

<b>Modalité</b>	<b>Riz (pluvial) (n= 37)</b>	<b>Maïs (n= 17)</b>	<b>Soja (n= 24)</b>	<b>Arachide (n= 10)</b>
Sans engrais ni chaulage ou autre amendement	0,99	0,21	0,24	0,69
Fertilisation & Chaulage ou calcaire	2,71	2,81	2,30	3,46

#### *Effets du brûlis forestier sur les adventices*

Dans une parcelle d'essai en milieu forestier près de Taï, au champ "Pahi 3", DE ROUW (op. cit.) observe une décroissance de rendement de 200 à 100 gr/m<sup>2</sup> (réduction 2 à 1 t/ha) de paddy sec en riz pluvial (cultivar local "*Demandé*") lorsque le degré d'envahissement par les adventices double de 10 à 20% (taux de couverture). Ces résultats sont observés durant la première année de mise en culture après abattis-brûlis d'une forêt jeune de 21 ans et ce à une période critique de 90 jours après le semis (figure 5.7, p.113). Cette période critique pour un désherbage manuel est essentielle à détecter car, précise l'auteur, l'influence sur les rendements en riz de l'envahissement des adventices à 25, 55 ou 120 jours après le semis est beaucoup moins prononcé. Autrement dit désherber trop tôt ne sert pratiquement à rien et

trop tard ne sert plus à grand chose. Cette période critique correspond à la fin de la phase végétative lorsque le tallage est maximum.

Quant aux résultats des mesures de pH (H<sub>2</sub>O) superficiel du sol entre 0 et 10 cm dans cette parcelle "Pahi 3", ils varient entre 4,2 et 4,6 avant le brûlis et entre 5,4 et 6,8 après la deuxième année de culture (tableau 5.4, p.122-123). Un HP à taux d'aluminisation supérieur à 60% dans les 50 premiers cm peut être suspecté, où un brûlis aurait temporairement relevé le pH et neutralisé l'aluminium en surface de manière irrégulière.

La performance du riz est fort différente en deuxième année sur base d'observations et mesures réalisées dans une autre parcelle dénommée "Pahi 1", à savoir que même en cas de double désherbage le rendement chute à environ 0,45 t/ha contre 2 t/ha la première année. De 0,45 t/ha il chute à 0,15 t/ha sans désherbage. L'auteure signale que les adventives d'herbes sont absentes la première année, ce qui signifie que les adventices sont alors essentiellement constituées de repousses de ligneux. Pour la nette chute de rendement du riz en deuxième année, elle pense qu'il faut l'attribuer déjà à un déclin de la fertilité du HP. Cette hypothèse semble confirmée par comparaison des rendements de 1ère année dans des sous-parcelles de "Pahi 1" où un brûlis "faible" est pratiqué. Le rendement en paddy n'est alors plus que de 0,1 t/ha. L'effet négatif des adventices sur le rendement pourrait donc être bien moindre que celui d'un taux d'aluminisation élevé.

### Agroforêts

De remarquables études de dynamique et d'organisation spatiale villageoises en zone forestière sont centrées sur les pratiques paysannes d'abattis-brûlis et sur l'insertion de plantations à vocation commerciale dans les stades de régénération. Citons d'abord celle de DOUNIAS (1996) qui décrit trois composantes de l'agrosystème des "Mvae", ethnies Bantu vivant en forêt du Sud-Cameroun. La première composante est l'espace résidentiel (pseudo-Urbs & Hortus) qui comprend une arrière-cour agroforestière permanente. La deuxième composante est la "brousse villageoise" qui constitue l'assolement classique en plusieurs stades d'agriculture itinérante sur brûlis décrits au [tableau 6](#) précédemment (clairière, accrue, forêt jeune de régénération, etc.). Enfin, une troisième composante, dénommée "forêt anthropisée" ou "agroforêt", définit des stades de régénération plus âgés de Silva. Il s'y pratique la chasse et la collecte/cueillette (bois d'œuvre et de chauffe, fruits, plantes médicinales, etc.). En son sein se distingue un trait de HP marqué par une plantation cacaoyère installée initialement en clairière. Durant l'accrue, les jeunes cacaoyers poussent à l'ombre des bananiers. Ensuite, un nouvel ombrage leur est procuré par des arbres héliophiles de régénération ou des arbres préservés lors de l'essartage. La [figure 6.11](#) représente un petit coin d'une agroforêt à cacaoyers ainsi formée.

Le cacaoyer peut alors procurer des revenus aux essarteurs et constituer ainsi une culture de rente à côté des cultures vivrières de subsistance sur brûlis. Parmi les activités de collecte en agroforêt, DOUNIAS (op. cit.) cite aussi le palmier à huile (*Elaeis guineensis*) pour l'extraction d'huiles ou pour la fermentation de la sève par saignée afin de produire du "vin de palme". L'auteur attire également l'attention sur la présence de grandes bamboueraies, pourvoyeuses de matériaux de construction, dans les sites d'anciens villages abandonnés.

Un autre exemple d'une agroforêt est présenté dans l'étude de MICHON et al. (1995) au Sud de Sumatra avec les jardins à damar du Pesisir (région de Krui). Une centaine d'espèces ligneuses de la famille des Diptérocarpacées produisent la résine damar, également source de revenus pour les paysans essarteurs. Dans le Pesisir, la production de résine est dominée par une seule espèce, *Shorea javanica*. A partir d'une pépinière villageoise, les plants de damar sont transplantés en clairière après une première saison de riz pluvial sur brûlis ou dans une jeune plantation de caféiers ou poivriers qui succède au riz. Le croissance associée du damar avec ces deux autres espèces limite la concurrence avec la végétation naturelle de régénération. Lorsque les caféiers et/ou les poivriers cessent d'être entretenus, la croissance du damar se poursuit au sein de la forêt jeune. Le damar entre en production à 25 ans. La structure "jardin" s'acquiert au fil du temps par l'introduction d'arbres fruitiers, de palmiers, etc.. Elle se stabilise après environ 50 ans, soit au stade d'agroforêt âgée où près de 50% de la biodiversité originelle est recouverte. Les auteurs précisent qu'en 1994 ces jardins couvrent plus de 10.000 ha, mais ils ne fournissent pas de relevés spécifiques d'autres traits de HP

comme le pH ou le taux d'aluminisation des sols. Toutefois, ils utilisent aussi les concepts de Silva et de Ager pour distinguer la forêt du domaine cultivé. Ils placent ainsi les jardins du Pesisir à l'interface des deux.

RUF (2011) évoque le débat qui a lieu en Indonésie sur l'avenir des agroforêts par rapport aux plantations pures de damar, d'hévéa ou de palmier à huile. Dans l'introduction de son article, cet auteur cite la possibilité du remplacement des anciennes agroforêts par de nouvelles, mais ces dernières menaceraient dorénavant les forêts protégées. L'auteur s'attache cependant plus particulièrement aux agroforêts de cacaoyers qui périclitent déjà en Afrique de l'Ouest au profit de plantations de cacaoyers proches de monocultures. Ce ne serait pas véritablement une espèce d'ombrage. Ses rendements seraient mêmes triplés en "plein soleil" et sous un aménagement plus intensif (usage modéré d'engrais et pesticides). De plus, en Afrique de l'Ouest les petites exploitations sont exclues du marché légal du bois au profit de la production industrielle, ce qui les ampute d'une source éventuelle de revenus via les essences strictement forestières pour le bois commercial.



*Figure 6.11: Gros plan sur un cacaoyer dans une agroforêt (Photo: Fotolia)*

### 6.2.2. Traits de HP de Silva en plantations d'eucalyptus au Mexique

Au sein des FP de Silva, l'exploitation du bois se distingue selon qu'il s'agit de bois de forêt (pseudo-) "naturelle" ou de bois de plantation anthropique. PIRARD et al (2016) examinent la possibilité de substituer le bois abattu dans de vastes étendues de forêt "naturelle" par celui du bois produit en parcelles intensives de production en vue d'obtenir un bénéfice éventuel de conservation de la forêt "naturelle". Ces auteurs concluent surtout que c'est l'évolution des valeurs de "conservation" attribuées par la société qui sera décisive. La fonction de conservation de la nature s'est cependant amplifiée avec l'écologisation de la société (occidentale) pour devenir un nouvel élément structurant du territoire et de son aménagement par *une recherche effrénée du naturel* (KALAORA, 2001).

Parmi les essences commerciales de bois de plantation, PÉREZ-SANDOVAL et al. (2012) rapportent que le genre *Eucalyptus* en est le pourvoyeur de loin le plus exploité dans le monde. En l'absence de fertilisation, sa productivité peut atteindre les 33 m<sup>3</sup>/ha/an et elle peut dépasser les 60 m<sup>3</sup>/ha/an avec fertilisation et irrigation. De telles valeurs peuvent être comparées aux productivités moyennes de 12 m<sup>3</sup>/ha/an citées au point 2 (sous-paragraphe 2 du 2.5.2) pour le Pin maritime dans les landes de Gascogne. La région du Sud-Est du Mexique a fait l'objet de plantations d'Eucalyptus dont les auteurs précités ont recherché les variables

du compartiment sol qui avaient un impact sur la productivité des HP avec deux essences: *E. urophylla* (Eu) et *E. grandis* (Eg) Rappelons à cet égard leur résistance phytobiologique à l'aluminium par complexation avec du malate au niveau racinaire telle que mise en évidence par SILVA et al. (op. cit.) et rapportée au point 4 (paragraphe 4.2.3.). PÉREZ-SANDOVAL et al. (op. cit.) ont choisi 21 sites dans la municipalité de "Huimangillo", dans l'état de Tabasco en bordure du golfe du Mexique. 56 parcelles de 500 m<sup>2</sup> y ont été sélectionnées en fonction de contrastes de productivité dans 49 plantations de "Eu" et 7 plantations de "Eg", les plus grands sites pouvant comporter 2 à 3 parcelles. Les plantations varient en âge de 4 à 13 ans et sont établies sur d'anciens parcours de Saltus (ranching). Avant la plantation, la strate herbacée a été enlevée, un sous-solage pratiqué jusqu'à 60 cm de profondeur et une fertilisation 18-46-00 apportée. Dans chacune des 56 parcelles, des échantillons de sol composites superficiels 0-20 cm et 20-40 cm en 5 prises ont été prélevés et les taux d'aluminisation respectifs (m%) ont été établis ainsi que d'autres paramètres d'analyses de routine en laboratoire. Les productivités annuelles ont été calculées à partir de mesures de volume en bois des arbres et de l'âge des plantations. La teneur en argile du sol superficiel varie entre 9 et 45% et pour le sol subsuperficiel entre 15 et 64%. Les taux d'aluminisation correspondants varient respectivement entre 12 et 88% et entre 4 et 91%. La productivité moyenne à partir de semis de graines est de 49,3 m<sup>3</sup>/ha/an pour "Eu" et de 35,7 m<sup>3</sup>/ha/an pour "Eg". Un estimateur de croissance "IS" est calculé pour chaque parcelle en mesurant la hauteur des 5 arbres dominants et en le rapportant à un âge équivalent de 14 ans. Cet estimateur est bien corrélé à la productivité annuelle ainsi qu'à 7 traits de sol combinés dans une même équation empirique reproduite ci-dessous et qui explique 62% de la variation de l'estimateur global, pour les divers HP:

$$IS_{\text{global}} = 22,5 - 7,6 S_2 + 7,6 Al_2 - 0,16 m_1 + 0,38 CEC_2 - 0,35 FC_2 - 4,36 Ca_1 + 0,30 clay_1$$

où les variables du compartiment sol représentent respectivement:

- la teneur subsuperficielle en sable "S<sub>2</sub>",
- la teneur subsuperficielle en aluminium échangeable "Al<sub>2</sub>",
- le taux d'aluminisation (%) superficiel "m<sub>1</sub>"
- la capacité d'échange subsuperficielle mesurée à l'acétate d'ammonium "CEC<sub>2</sub>"
- la teneur en eau subsuperficielle à la capacité en champ "FC<sub>2</sub>",
- la teneur superficielle en calcium échangeable "Ca<sub>1</sub>" et,
- la teneur superficielle en argile "clay<sub>1</sub>".

Cette équation rend compte d'un effet contradictoire de l'aluminium sur la productivité des plantations, tantôt favorable en profondeur (Al<sub>2</sub>), tantôt défavorable en surface (m<sub>1</sub>). Les auteurs observent toutefois un effet défavorable du taux d'aluminisation superficiel (m<sub>1</sub>) sur l'estimateur de croissance dans les 7 parcelles de "Eg". Il faut cependant signaler la fourchette limitée de "m<sub>1</sub>", comprise entre 55 et 80% Leurs résultats empiriques de terrain ne sont donc pas concluants mais semblent bien en accord avec le rôle ambigu du taux d'aluminisation sur la croissance de *Eucalyptus sp.*, tantôt stimulant, tantôt toxique, et caractérisé par une tolérance phytobiologique relative.

Il existe beaucoup d'autres HP de plantations de Silva, mais les données agropédologiques accessibles sont rarement suffisantes pour établir et comprendre l'influence paysagénique de l'aluminisation.

### 6.2.3. Traits de HP de Saltus

Plutôt rares également sont les données agropédologiques de HP de Saltus. Ceux-ci partagent leur passé avec ceux de Silva suite aux pulsations climatiques intertropicales. Leurs HP respectifs se présentent souvent en mosaïque sous un régime écoclimatique compatible à la fois avec l'aluminisation des sols et avec l'existence des forêts, à savoir principalement celui des terres hautes en région humide et subhumide (voir paragraphe 3.1.3). Des phases climatiques plus sèches en région tropicale induisent une régression des forêts au profit des savanes et inversement en phase plus humide. Dans l'hémisphère Nord ces pulsations sont marquées respectivement par une alternance de températures plus froides ou plus chaudes. Il existe de nombreuses typologies pour des formations herbacées plus ou moins anthropisées ou arborées assimilables à des HP de Saltus. CÁMARA ARTIGAS (2009) en proposent plusieurs pour les savanes tropicales et néo-tropicales (américaines), mais aucune ne se rapporte

explicitement au degré d'aluminisation. Pour les savanes, MWORIA (2011, p.45) y fait très vaguement allusion par le fait que la plus grande variation de leur productivité est attribuée aux nutriments minéraux du sol.

### *HP de Saltus d'altitude au Burundi*

Les pâturages naturels d'altitude du Burundi à *Eragrostis olivacea* sont aluminisés avec des taux supérieurs à 60% sur plus de 50 cm d'épaisseur de sol dans des territoires couvrant d'énormes superficies tels que rapportés par SOTTIAUX et al. (1988, p.100). Plusieurs régions naturelles comme le Kirimiro, le Bututsi, le Mugamba et le Buyogoma sont concernées et donc aussi de nombreuses EP (espèces paysagéniques). La [figure 6.12](#) propose une illustration photographique de ces pâturages. Ils sont soumis à des feux anthropiques périodiques dans le cadre de leur exploitation comme parcours naturels pour un bétail rustique de pseudo-zébus de race Ankole. Sur base d'un troupeau moyen de 4 à 5 têtes et d'une productivité en biomasse herbacée fraîche de 15 à 20 t/ha/an, OPDECAMP et al. (1990) concluent à la supériorité de la rentabilité de ce type d'exploitation très extensive par rapport à des exploitations plus intensives d'Ager fourrager simulées avec *Setaria splendida*, *Tripsacum laxum* ou *Pennisetum purpureum*. L'expérimentation conduisant à ces conclusions se base sur un essai de conversion d'un HP de Saltus en HP de Ager. L'essai débute en 1986 par une ouverture du 56 ares de pâturage avec patate douce au lieu-dit "Nyagatika" en haute altitude, à 2.055 m, dans un HP fortement aluminisé de la station de recherche de Gisozi de l'ISABU (Institut des Sciences Agronomiques du Burundi), déjà évoquée au sous paragraphe 3.3.3. Les principaux traits physico-chimiques du sol sont reproduits au [tableau 7](#). Ces traits sont établis sur les échantillons d'un profil pédologique et montrent un taux d'aluminisation supérieur à 90% dans les 60 premiers cm. Ils correspondent à un seul et même HP. La patate douce (*Ipomea batatas*) utilisée en ouverture est le cultivar local "Rusenya". Elle est implantée avec des cordes (boutures) sur tout le site après labour et écobuage (brûlis de l'herbe en tas et épandage des cendres) mais sans chaulage ni fumure organique ou minérale. Le rendement obtenu après 8 mois est mesuré sur 6 parcelles de 90 m<sup>2</sup>. Il varie entre les parcelles dans un intervalle de 0,6 à 3,0 t/ha. Ce rendement d'ouverture est très faible et témoignerait de l'incidence nettement défavorable du taux d'aluminisation élevé de cet HP. L'effet superficiel de l'écobuage entre 0 et 15 cm est mesuré sur base des résultats d'analyse d'un échantillon composite de 20 prises. Il se révèle insignifiant, voire même légèrement négatif puisque le pH (H<sub>2</sub>O) passe de 4,9 avant à 4,4 après et le taux d'aluminisation de 84% avant l'écobuage à 90% après la récolte d'ouverture en patate douce. Les minéralomasses des cendres du pâturage naturel sont évidemment bien inférieures à celles libérées par un abattis-brûlis forestier mais n'ont pas été quantifiées. Durant les trois années d'expérimentations suivantes, dans le même HP, de 1987 à 1989, des parcelles vivrières ont notamment été installées et chaulées avec 1,5 t/ha/an de calcaire-magnésien et une fumure minérale NPK à chaque saison culturale, deux fois par an (saison A et saison B). Une évolution plus marquée du pH et du taux d'aluminisation s'observe dans les résultats mais restent limités à une profondeur comprise entre 0 et 20 cm. Le pH (H<sub>2</sub>O) y remonte de 4,4 à 5,3 et le taux d'aluminisation "m" se réduit de 90 à 13%. Cependant, à 30 cm de profondeur le pH reste quasi inchangé de même que l'aluminisation qui conserve un taux de l'ordre de 85%, toujours d'après les mêmes auteurs (OPDECAMP et al., 1990, op. cit.). L'effet du chaulage annuel répété reste donc très superficiel. Toutefois, une certaine rentabilité économique virtuelle est finalement diagnostiquée à la récolte des céréales de blé (2.038 kg/ha) et de maïs (2.691 kg/ha) en 1989. Une telle conversion de Saltus en Ager par chaulage et fumure minérale exigerait cependant des moyens financiers par une sortie de l'économie d'auto-subsistance en faveur d'une économie de marché, ce qui reste très hypothétique vu l'exiguïté des marchés intérieurs du Burundi pour les cultures vivrières.



*Figure 6.12: Territoire agro-pastoral vallonné en région naturelle d'altitude du Bututsi ( $\pm 1.800$  m) au Burundi. Le Saltus est constitué d'un pâturage naturel très aluminisé à *Eragrostis Olivacea* (Photo: Luc Opdecamp)*

*Tableau 7. Principaux traits du sol à l'ouverture d'un pâturage dans l'essai conduit à Nyagatika à la station ISABU de Gisozi, d'après l'annexe 1 de OPDECAMP et al. (op. cit., 1990)*

<b>Prof. (cm)</b>	<b>% C org.</b>	<b>% argile</b>	<b>pH (H<sub>2</sub>O)</b>	<b>ECEC (cmol<sub>c</sub>/kg)</b>	<b>m%</b>
0-15	3,94	64,6	4,4	4,80	90
16-66	2,62	68,1	4,8	2,43	90
66-92	2,49	70,4	5,6	1,51	66
92-170	1,38	70,9	5,4	1,43	59

#### *HP de Saltus en basses Pyrénées françaises*

En région tempérée, dans les basses Pyrénées, à une altitude de 700 m (étage collinéen), sur la commune française de Massat (département de l'Ariège), POOZESH (op. cit.) rapporte des résultats de fertilisation et de chaulage dans un parcours de Saltus composé d'une association de plusieurs espèces herbacées. L'essai est localisé sur pente assez forte de 20% dans un sol caractérisé superficiellement (0-20 cm) par une teneur en argile de 30 à 40%, un pH (H<sub>2</sub>O) <5,0 et un taux d'aluminisation élevé m >70%. Dans le dispositif, le chaulage est réalisé notamment avec du CaCO<sub>3</sub> à la dose de 5 t/ha (200 kmol<sub>c</sub>/ha) répétée tous les 2 ans. La fertilisation annuelle NPK est de l'ordre de 150-70-175. Deux faits marquants de cet essai attirent une attention particulière. Le premier implique les biomasses sèches produites comme suit:

- un effet faible mais significatif du chaulage, à savoir une augmentation moyenne sur 3 ans pour le première coupe de + 200 kg/ha/an de MS par rapport au témoin, ce dernier produisant 800 à 900 kg/ha/an;
- un effet très hautement significatif des engrais, à savoir une augmentation moyenne sur

3 ans pour la même première coupe de + 3 t/ha/an de MS par rapport au même témoin. Le second fait marquant se rapporte aux variations de biodiversité des graminées (poacées):

- le témoin et l'objet chaulage ( $\text{CaCO}_3$ ) présentent le plus grand nombre d'espèces de graminées (6);
- les objets à fertilisation NPK et à fertilisation combinée avec le chaulage (NPK +  $\text{CaCO}_3$ ) diminuent le nombre d'espèces de graminées (4 espèces en moyenne).

Il existe un parallélisme dans cet essai entre l'augmentation de la productivité en biomasse sèche et la réduction du nombre d'espèces de graminées. De plus, les graminées ne représentent que 25% des espèces dans l'objet "NPK +  $\text{CaCO}_3$ " alors qu'elles en représentent 50% dans les autres objets (témoin, NPK et  $\text{CaCO}_3$ ).

Il est possible de spéculer sur l'interprétation de ce petit essai ponctuel. D'abord, il existe une similitude de comportement entre le témoin et le chaulage seul. Ce serait cohérent avec un déficit d'absorption du phosphore, tantôt par toxicité aluminique dans le témoin, tantôt par déficit de phosphore par manque de complexes Al-P assimilables après chaulage. Ce dernier se révélerait alors être un "surchaulage". La fertilisation NPK comblerait à la fois le déficit en phosphore dans l'objet "surchaulé" et la neutralisation de l'aluminium par P dans l'objet "NPK". Ensuite, l'effet inverse de l'aluminisation sur la biodiversité du Saltus par rapport à celle de Silva pourrait résulter du fait que le premier facteur de compétition interspécifique est la lumière. En HP aluminisé de Silva la croissance des diverses espèces d'arbres est lente ou ralentie mais reste payante, à terme, par rapport aux herbes privées progressivement de lumière. La pression de sélection est secondaire entre espèces ligneuses du fait de leurs faibles vitesses de croissance induites ou non par l'aluminium. Par contre en HP aluminisé de Saltus les herbes ne subissent plus une concurrence aussi forte pour la lumière et l'adaptation aux taux élevé d'aluminisation devient le premier facteur de sélection. Plaident en faveur de l'adaptation évolutive des poacées à la fois leur mode de reproduction allogame et leur anémophilie (dispersion du pollen par le vent).

#### 6.2.4. Traits de HP de conversion de Silva en Ager

##### *HP de conversion en Ager rizicole de mangroves estuariennes en Guinée*

En zone littorale de la Guinée-Conakry, SOW (2003) décrit le système traditionnel de conversion en rizières de 380 Kha potentiels de mangroves de front de mer à palétuviers *Avicennia*, pauvres en  $\text{FeS}_2$ , et de mangroves estuariennes à palétuviers *Rhizophora* riches en  $\text{FeS}_2$ . Pour ces dernières, 140 Kha ont été convertis en casiers de rizières traditionnelles d'environ 30 ares chacune. Mais parmi celles-ci 62 Kha ont été abandonnés dont 35 Ka sont considérés comme stérilisés. Cet échec est imputé aux contraintes suivantes, insuffisamment maîtrisées: (1) la salinisation lors de grandes marées qui nécessitent un endiguement général, (2) l'abondance des pluies ( $P = 4.000$  mm/an) concentrées pour 80% de juin à septembre et pour 50% de juillet à août ce qui rend difficile le drainage des casiers, (3) un assèchement rapide lorsque les pluies diminuent ce qui déclenche le processus sulfaté acide du fait de la richesse en  $\text{FeS}_2$  et nécessiterait un chaulage massif, (4) la minéralisation rapide de la matière organique des vasières des casiers lors de l'assèchement ce qui induit une perte de nutriments et nécessite une fertilisation minérale complémentaire. SOW (op. cit) évoque aussi le développement de toxicités en fer et en soufre mais il ne cite pas l'aluminium.

Pour tenter de réhabiliter les rizières abandonnées des estuaires, l'auteur décrit un réaménagement qui est testé dans un polder expérimental de 14 ha. Il est localisé dans le village de "Yangoyah" en plaine drainée par un petit bras de mer connecté en aval à deux estuaires, celui de la Soumbouya et celui de la Morebaya, proches de Conakry. La réadmission de l'eau de mer en saison sèche est une innovation qui devrait notamment éviter l'oxydation des sols à sulfures et leur acidification résultante, permettre leur fertilisation par apport de vases marines fraîches et favoriser le contrôle des adventices. Ce réaménagement est complété par des digues et un réservoir d'eau douce en amont. Il s'agit ainsi de sécuriser la disponibilité en eau de submersion des casiers. Un polder de 9,2 ha de rizières subdivisés en 15 casiers et une retenue d'eau douce en amont sur 1,6 ha est ainsi créé.

SOW et BARRY (2003) présentent les résultats obtenus en comparaison avec ceux des casiers rizières traditionnels. Une campagne de mesure du pH des sols au début de l'aménagement

du polder expérimental révèle son relèvement à un niveau faiblement acide en surface suite à la réadmission de l'eau de mer dans les casiers en saison sèche. Une deuxième campagne de mesure du pH, dix mois plus tard, avant le repiquage du riz, révèle une variation entre 4,9 et 6,5 suivant les casiers mais l'intervalle est plus réduit en profondeur entre 4,3 et 5,3. Du point de vue de la salinité, la conductivité électrique sur pâte saturée passe de 15-18 mS/cm au début des pluies à 0,5-1 mS/cm au moment du repiquage, ce qui témoigne d'un lessivage des sels par les fortes pluies de juin et juillet. Au niveau des rendements obtenus, ils sont en moyenne triplés, de 462 kg/ha en casiers traditionnels à 1376 kg/ha dans les casiers réaménagés. Dans ces derniers, un rendement maximum de 3.205 kg/ha est atteint mais le minimum est proche des casiers traditionnels, à savoir environ 400 kg/ha. Les rendements moyens dans le polder expérimental augmentent toutefois de 27% la deuxième année et de 75% à la troisième année, tandis que ceux des casiers traditionnels restent inchangés à environ 500 kg/ha. Malheureusement, les taux d'aluminisation du sol n'ont jamais été mesurés. Cependant, au vu de la nette amélioration des rendements rizicoles suite à la réadmission d'eau de mer salée dans les casiers rizicoles en saison rizicole, complétée par l'irrigation d'eau douce à partir du réservoir, une probabilité existe que l'aluminium ait migré en profondeur, entraîné par les sulfates. Une telle hypothèse mériterait d'être vérifiée.

#### *HP de conversion de Silva en Ager fourrager en Amazonie*

La pratique de mise en pâturage artificiel (graminée semée) d'Ager est décrite par TOURRAND et al. (2006) en Amazonie après un an de culture de riz sur brûlis forestier. Mais la pâture se dégrade assez rapidement en quelques années ce qui amène à une correction des "carences du sol" par chaulage et fertilisation minérale. Cette opération est rentabilisée par une nouvelle mise en culture avec du riz ou du maïs suivi de soja. Une nouvelle prairie temporaire peut alors être ressemée. La durabilité de tels cycles n'est pas précisée. Ces cycles rappellent toutefois ceux de l'agriculture itinérante sur abattis-brûlis dans des HP assez fortement aluminisés décrits dans le paragraphe 6.2.1. La nature de la dégradation du pâturage artificiel se caractérise par l'envahissement de "mauvaises herbes". Ces dernières pourraient être exploitées de manière plus extensive en Saltus de pâturage "naturel" mais cette option n'est pas envisagée dans de tels ranchs qui doivent amortir le coût de la récupération d'un pâturage dégradé. Ce dernier est estimé à 250-400 US\$/ha selon le niveau d'intrants retenu.

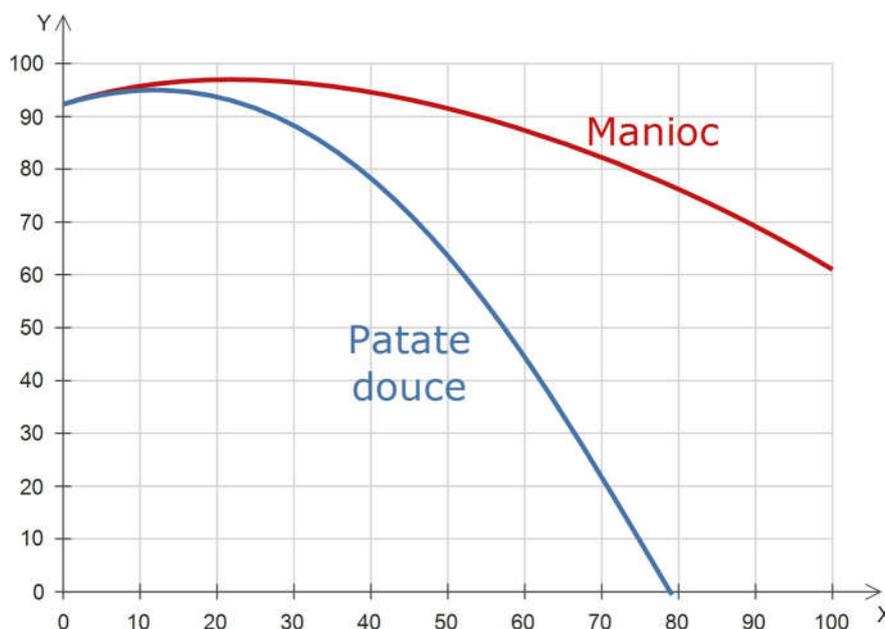
#### 6.2.5. Traits comparatifs de HP d'Ager pour le manioc et la patate douce

##### *Comparatif des rendements en fonction du taux d'aluminisation à Porto Rico*

ABRUNA-RODRIGUEZ et al. (1982) rendent compte d'une expérimentation à Porto-Rico avec de l'igname (*Dioscorea alata*), du manioc (*Manihot esculenta*) et du taro/colocase (*Xanthosoma sp.*) en 3 sites dénommés "Corozal clay", "Corozal clay subsoil" et "Coto sandy clay". Le dispositif expérimental est constitué en chaque site de 30 mini-parcelles de 4x4 m, sauf pour le troisième qui en comporte 40. Ces mini-parcelles ont été chaulées avec des doses variables de calcaire durant plusieurs années auparavant. Elles avaient toutes été entourées de fossés afin de prévenir tout ruissellement de l'une à l'autre. Les rendements relatifs obtenus (% du maximum) avec le manioc sur les parcelles des 3 sites se révèlent corrélés de manière hautement significative (\*\*\*) avec les taux d'aluminisation superficiel des parcelles entre 0 et 15 cm. Le rendement maximum pour le manioc est proche des 30 t/ha. Les auteurs comparent dans leur figure 2 la régression parabolique également obtenue dans ces sites avec la patate douce (*Ipomea batatas*) par ABRUNA-RODRIGUEZ et al. (1979). Voici les deux équations de régression parabolique obtenues, où "y" représente le rendement relatif et "x" le taux d'aluminisation (m%) en surface:  $y = 93,74 + 0,27x - 0,006x^2$  pour le manioc et  $y = 93,5 + 0,45x - 0,021x^2$  pour la patate douce. L'annulation des dérivées premières permet de calculer le taux d'aluminisation correspondant au rendement relatif maximum soit  $m=22,5\%$  pour le manioc et  $m=10,5\%$  pour la patate douce. On peut aussi porter en graphique les courbes correspondantes, ce qui est réalisé à la [figure 6.13](#). On observe une tolérance nettement meilleure du manioc par rapport à la patate douce. Cette dernière voit son rendement relatif réduit à 50% lorsque "m" atteint 57% alors que pour le manioc le rendement relatif atteint encore 60% du maximum pour une valeur de "m" égale virtuellement à 100%. Par ailleurs, il est remarquable d'observer un effet stimulant sur les rendements de ces deux

espèces pour de faibles valeurs de "m", ce qui est en accord avec les observations réalisées en vases de végétation ou en solution de culture avec plusieurs autres espèces d'Ager dans les paragraphes antérieurs 4.3.1. et 4.3.2.

La tolérance du manioc au taux d'aluminisation élevés explique sa réponse généralement peu ou non significative au chaulage évoquée dès l'introduction par ABRUNA-RODRIGUEZ et al. (1982, op. cit.). Ces auteurs soulignent l'importance primordiale de cette culture dans les régions tropicales, tant en termes de production totale qu'en termes de superficie. Si aucun chaulage n'a été effectué durant les expérimentations évoquées, il n'en reste pas moins que les fonctions obtenues et illustrées correspondent à des sols diversement chaulés dans le passé et qu'elles représentent donc des rendements d'arrière-effet de chaulage croissant de droite à gauche plutôt que ceux d'une aluminisation croissante de gauche à droite.



**Figure 6.13:** Courbes comparatives des rendements relatifs (%) en manioc et patate douce en fonction du taux d'aluminisation superficiel m% (0-15 cm) d'après les données expérimentales de ABRUNA-RODRIGUEZ et al. (1982)

#### *Comparatif des rendements en fonction du taux d'aluminisation au Burundi*

Une autre comparaison entre les rendements du manioc et de patate douce en fonction du taux d'aluminisation est rapportée par OPDECAMP et al. (1990, op. cit.), dans des HP multiples de la région naturelle de moyenne altitude du Kirimiro au Burundi. Ces HP appartiennent à des FP d'Ager mais probablement à plusieurs IP du fait qu'ils sont répartis sur près de 20 "collines" distinctes. Ces dernières sont des entités administratives infra-communales. L'analyse paysagénique n'étant pas encore conçue ou esquissée à l'époque, il n'est pas possible d'établir si plusieurs véritables IP étaient représentées ni si elles appartenait le cas échéant à une même EP. Le manioc et la patate douce sont utilisées notamment lors de la mise en culture temporaire d'un pâturage naturel. La comparaison des rendements est basée sur un réseau de 40 parcelles de 320 m<sup>2</sup> distribuées en milieu rural. Une caractérisation analytique des sols est réalisée sur des échantillons composites de 9 prises prélevés entre 0 et 15 cm et entre 25 et 40 cm. Les parcelles sont installées en octobre/novembre 1985, suivies et récoltées en avril 1986 pour la patate douce et en novembre 1987 pour le manioc par les équipes des programmes correspondant de l'ISABU. Chaque parcelle est subdivisée en deux parties égales, l'une réservée pour 4 cultivars de manioc, chacun sur 40 m<sup>2</sup>, l'autre pour 4 cultivars de patate douce, chacun aussi sur 40 m<sup>2</sup>. Aucune fumure, amendement ou traitement phytosanitaire n'est appliqué et les antécédents ne sont pas considérés. Le tableau 8 présente les résultats obtenus suivant que le taux d'aluminisation des sols dépasse ou non 60% dans les 40 premiers centimètres d'épaisseur. Les rendements moyens sont assez modestes. Ils approchent cependant les 20 t/ha pour deux cultivars de manioc et les 15 à 16 t/ha pour deux cultivars de patate douce. Ils sont aussi affectés d'importants coefficients de variation dépassant souvent 60% et même 100% pour le cultivar local de manioc. Les rendements absolus s'inscrivent ainsi

entre 0,5 et 33,4 t/ha pour la patate douce et entre 0,2 et 39,5 t/ha pour le manioc. Malgré cela, 3/4 des cultivars de patate douce et 1/4 des cultivars de manioc ont des rendements significativement plus faibles dans des sols fortement aluminisés.

*Tableau 8. Rendements comparatifs moyens dans le Kirimiro au Burundi  
(Source: OPDECAMP et al., 1990, op. cit.)*

Espèce	Cultivar et différence oui (*) ou non significative (n.s.)	Rendements moyen (t/ha)	
		m<60% (0-40 cm)	m>60% (0-40 cm)
Patate douce	TIS 2498DB (n.s.)	6,3	5,5
	NSASAGATEBO (*)	14,9	8,2
	RUSENYA (*)	16,1	8,6
	Local (*)	11,7	6,2
Manioc	CRIOLINA (*)	19,3	12,4
	MPAMBAYB (n.s.)	9,9	5,2
	ZAYIMETI (n.s.)	8,6	4,0
	Local (n.s.)	18,2	10,5

#### 6.2.6. Traits de HP d'Ager en cultures pérennes

Des données agropédologiques quantifiées pour une comparaison de HP diversement aluminisés en cultures pérennes semblent encore plus rares, même pour une espèce très tolérante à l'aluminium comme le théier. Plusieurs plantations de cultures pérennes tropicales sont cependant plus ou moins reconnues pour présenter des productivités acceptables dans des HP aluminisés telles que l'hévéa ou certaines espèces de palmiers. Ces HP d'Ager dérivent bien souvent de conversions d'HP de Silva notamment en Amazonie et dans le sud-est asiatique et l'on sait que de tels HP tropicaux humides ont une probabilité importante d'être plus ou moins fortement aluminisés.

Des stades transitoires d'évolution en agroforêts ont d'ailleurs été évoqués plus haut (dernier sous-paragraphe 6.2.1). SCHROTH et al. (2016) en rappellent l'intérêt pour le cacaoyer en forêt amazonienne car même si ses plants sont âgés, ils fournissent toujours une faible production de rente pour les petits fermiers. De plus, s'ils en replantent, ils peuvent s'en servir comme argument pour revendiquer des droits fonciers. Toutefois, les auteurs précités considèrent que pour intensifier la production de cacao afin de satisfaire la demande mondiale croissante, des sols eutrophes (non aluminisés) doivent être privilégiés. D'autre part, toujours en Amazonie brésilienne, dans une station expérimentale près de Manaus, SCHROTH et al. (2000) font part d'une indifférence apparente au chaulage et à la fertilisation de la production en cœur de palmier pêche (*Bractis gasipaes*) dans un sol lourd à 80% d'argile, bien drainé et fortement aluminisé (m>70%) sur plus de 1 m d'épaisseur. Les auteurs expliquent ce comportement par la réputation de tolérance à l'aluminium de cette espèce méconnue, ce qui est confirmé par MORA-URPI et al. (1997, p.14).

Enfin, dans tout le Sud-Est asiatique, MUTERT (1999) rend compte de la réussite de l'expansion des plantations de palmiers à huile dans des sols modérément ou fortement aluminisés. A l'appui de cette assertion, cet auteur reproduit dans son tableau 1 les traits entre 0 et 30 cm des huit principaux sols communément constitutifs des HP de ces plantations dans ce vaste territoire. Leurs pH (H<sub>2</sub>O) sont tous inférieurs à 5,0 et les taux d'aluminisation sont tous significatifs. Ils sont supérieurs à 60% pour 6 sols sur les 8 retenus, les deux autres présentent des valeurs de "m" de 27% et 47%. Des rendements en régimes de noix de palme de l'ordre de 22 à 27 t/ha sont rapportés par NELSON et al. (2011) en 4 sites acides d'Indonésie de pH (KCl) moyen entre 0 et 40 cm proches de 4,0, ce qui pourraient correspondre à des pH (H<sub>2</sub>O) de l'ordre de 5,0. Ces auteurs confirmeraient ainsi la capacité de production satisfaisante du palmier à huile dans des HP qui devraient être significativement aluminisés.

### 6.2.7. Discussion

Une incomplétude de données sur les traits agropédologiques de HP diversement aluminisés doit être diagnostiquée alors que l'intérêt de l'aluminisation du point de vue phytobiologique se marque clairement par une documentation scientifique étayée (point 4). Les lacunes en données agropédologiques sont similaires à celles de la caractérisation des biotopes dans l'étude des dynamiques écologiques de l'aluminisation effectuée au point 5. Il s'avère aussi que la caractérisation des traits du compartiment sol des HP se limite souvent au pH. Ce dernier est certes un indice intéressant, mais, pris isolément, il réduit la portée des études au processus plus général d'acidification des sols sans tenir compte du double jeu particulier de l'aluminium, tantôt stimulant, tantôt toxique. Un double jeu auquel chaque espèce participe à sa manière, ce qui doit se répercuter dans les itinéraires techniques. Le besoin d'un chaulage et le risque de surchaulage y sont aussi directement associés ainsi qu'une meilleure gestion de la fumure phosphorée. Pour les cultures pérennes tropicales dont l'établissement passe souvent par un stade d'agroforêt, il s'avère nécessaire de vérifier, préciser ou consolider la connaissance de leur tolérance ou résistance à l'aluminisation dans des HP multiples.

Il est par ailleurs très étonnant que pour le degré d'aluminisation, l'épaisseur du sol ne soit pas standardisée. Les données sont généralement limitées au sol superficiel, entre 0 et 10 ou 0 et 20 cm. Pour le palmier à huile dans le Sud-Est asiatique, MUTERT (op. cit) rapporte des données entre 0 et 30 cm alors que le même auteur signale que les racines de cette espèce pérenne sont majoritairement comprises entre 0 et 60 cm de profondeur. La classification technique de SANCHEZ et al. (2003, op. cit.) considère une épaisseur de sol de 0 à 50 cm pour apprécier le taux d'aluminisation du sol, ce qui paraît bien constituer le standard ad hoc. C'est une épaisseur qui permet de diagnostiquer non seulement le degré d'avancement de l'aluminisation depuis la surface mais aussi le besoin éventuel de neutralisation de l'aluminium dans le sol sub-superficiel. Le recours à un amendement contenant du gypse en HP continental ou à une réadmission de l'eau de mer dans les sols sulfatés acides des estuaires littoraux pourraient se justifier selon les régimes écoclimatiques en vigueur.

Dans des économies d'auto-subsistance, la quête de la nourriture prime sur celle des revenus. Ces derniers sont secondaires et les rendements doivent simplement nourrir les familles et le cas échéant leur permettre l'acquisition de quelques commodités secondaires sur les marchés. Les systèmes paysagéniques y reposent sur la recherche d'une gamme de produits variés selon un mode extensif en intrants. La production primaire modeste de certains HP fortement aluminisés peut alors être jugée malgré tout intéressante. Il en va tout autrement dans les systèmes paysagéniques à économie de marché où les rendements deviennent primordiaux et doivent rentabiliser le capital investi. Toutefois, même en économie de subsistance, avec l'augmentation continue de la pression démographique, la rentabilité du travail peut devenir limitante dans des HP fortement aluminisés de faible productivité.

Les observations agropédologiques de terrain se font dans des systèmes complexes exposés aux conditions météo-climatiques de la saison culturale, aux attaques parasitaires éventuelles, aux effets des antécédents culturels ou des communautés d'espèces naturelles antérieures, aux dynamiques de la microflore nitrificatrice, symbiotique (mycorhizes et autres), etc. Des variations importantes d'année en année s'observent alors, mais elles se manifestent certainement aussi de manière synchrone d'un site à l'autre en milieu rural dans ce qui serait identifié comme un même HP. L'adoption d'une démarche paysagénique élargirait le point de vue de l'agropédologue par la contextualisation nécessaire des HP dans leur FP, IP et EP. Cette ouverture d'angle augmenterait les variables considérées mais pourrait réduire la variabilité des données d'un HP appréhendé selon un plus grand nombre d'axes dimensionnels (traits).

Une autre observation peut aussi être évoquée. Il s'agit d'une diminution de la biodiversité au cours de l'aluminisation en Saltus par les espèces à croissance rapide, favorisée par les feux. Ces derniers annihilent les espèces ligneuses et les espèces à pouvoir de colonisation plus faible (niche-R, dite "réalisée"). Elle se démarque ainsi de l'augmentation de cette biodiversité en Silva où la rapidité de croissance est secondaire par rapport à la dispersion des espèces. Les HP de Urbs, de Hortus, d'Aqua et de Desertum n'ont pas été explorés car ils ne présentent

tout simplement pas de traits agropédologiques sur lesquels porte la focalisation adoptée dans ce sous-point 6.2. Si l'agriculture et l'horticulture urbaine restent concernés par des traits agropédologiques, l'aluminisation de leurs HP n'y est pas supposée jouer un rôle significatif.

## 7. Synthèse conclusive

### 7.1. *Modèle interdisciplinaire*

La paysage est un de ces nouveaux objets qui dépasse le réductionnisme des Lumières. C'est un système thermodynamique ouvert, dynamique et complexe. Il est ouvert sur son environnement, tels que le climat et la biodiversité, avec lequel il évolue concomitamment. Vu le nombre de ses composants, il exige une approche systémique. Au niveau de sa différenciation locale, il requiert la contribution des nombreuses parties impliquées du point de vue social, économique et culturel. Son fonctionnement est à bien des égards empirique. Aussi, de nombreuses disciplines scientifiques humaines et sociales sont concernées pour le rendre plus rationnel. C'est une véritable interdisciplinarité méthodologique qui est en jeu, à laquelle s'ajoute parfois une dimension esthétique.

Dans le modèle paysagénique proposé ici, cinq niveaux d'organisation anthropique territoriale sont retenus: le holon (HP), la facette (FP), l'instanciation (IP), l'espèce (EP) et enfin la région naturelle. Ils sont susceptibles de muter et de changer de destin si bien qu'une métaphore avec la biologie est possible et permet d'utiliser les termes de "phénotype" et de "génotype" pour une IP et ses niveaux sous-jacents qui la composent. Au niveau de l'EP, on pourrait aussi valider le terme de "phénomène" et "génomène".

Les dimensions de la paysagénie sont bien plus nombreuses que l'approche paysagère. Dans l'espace, ce sont ses trois dimensions. L'axe vertical comprend non seulement la partie épigée mais aussi la partie hypogée du sol et des racines végétales. En outre, la paysagénie convoque bien plus de disciplines, comme la géographie humaine et physique, la géomorphologie, l'économie et la sociologie, l'urbanisme, l'ingénierie civile et agronomique, etc.

Sept FP sont distinguées, inspirées de la trilogie agraire antique: Ager, Saltus et Silva complétés par Urbs et Hortus ainsi que par Aqua et Desertum. Ces FP transcendent bien entendu les limites cadastrales et administratives des territoires. Le terme de "mutation" des facettes de l'une vers l'autre et réciproquement est particulièrement adapté au cours de l'histoire et même de manière naturelle avant l'apparition de l'homme, via des pulsations climatiques.

C'est au niveau des HP que s'expriment les traits génotypiques de manière interactive entre eux. Des réseaux de traits dans ceux-ci expriment alors les caractères phénotypiques des FP. Tout comme plusieurs gènes interviennent dans la synthèse et la régulation des protéines et ce de manière mutuelle. Traits et caractères paysagéniques interagissent similairement en grande intimité et nécessitent des techniques et savoirs particuliers aux disciplines scientifiques pour être identifiés. Ici aussi, l'évolution des HP produisent des mutations, ce qui renforce la métaphore avec la biologie évolutive.

Le phénomène d'émergence d'une auto-organisation caractérise normalement tous les systèmes complexes adaptatifs. C'est ainsi que les HP similaires font émerger une FP. Il en est de même des FP pour une IP et des IP pour une EP dans une même région naturelle.

L'exemple de la région naturelle des landes de Gascogne en illustre la pertinence. Son occupation humaine, vers 2500 ans avant l'ère courante (AEC), se marque par la coexistence de Silva, de Saltus et d'Ager. Au moyen-âge, une occupation humaine se pérennise avec un mutation pastorale dans la lande humide exploitée comme un véritable commun, alors que la lande mésophile et plus sèche montre des facettes d'Ager et de de Silva sous forme de pinède. Cette dernière est exploitée pour le gemmage. L'Urbs est alors constitué alors d'airiaux regroupés en quartiers et puis en bourgs, véritables villages. Enfin, une dernière mutation est promulguée fin du XIX<sup>e</sup> siècle par Napoléon III pour assainir les landes (drainage) et les commuter en ager intensif et en Silva de pins maritimes. C'est un accaparement massif par les communes pour les revendre aux notables girondins et landais.

Enfin, les EP voisins dont les "biotopes" territoriaux des IP sont analogues sur plusieurs caractères dominants forment une même région naturelle. Il existe ainsi une agradation

spatiale par affinités latérales des caractères naturels et culturels.

## *7.2. L'aluminisation et ses interactions systémiques avec le vivant*

Une application du modèle au processus d'aluminisation des sols pousse plus loin l'analyse. Le contexte est axé principalement sur l'interdisciplinarité entre l'agriculture et la pédologie, injustement séparé par l'histoire des sciences. Des notes complémentaires sur le développement de Urbs sont développée pour montrer l'influence prépondérante de l'Ager (et de l'Hortus), non aluminisé, sur le développement des villes au cours de l'histoire.

### 7.2.1. Le processus

La description du processus d'aluminisation fait intervenir l'acidification naturelle, ou involontairement provoquée (drainage des sols sulfatés acides). Elle provoque l'altération des minéraux primaires et secondaires du matériau parental du sol par la respiration racinaire et microbienne ainsi que par la nitrification de l'azote.

Certains détails dans les réactions physico-chimiques méritent d'être relevés car ils interviennent probablement dans l'expression des caractères à partir de certains traits agropédologiques au niveau des HP sur le terrain. Ainsi en est-il de l'apparition précoce de formes amorphes organiques ou purement minérales d'aluminium lors de l'hydrolyse acide des minéraux primaires et de leur persistance au long cours dans les sols très altérés. Malgré la rareté des dosages de produits amorphes dans les sols non volcaniques, il est présumé que des hydroxy-polymères d'aluminium non cristallisés joueraient un rôle tampon important, à savoir par dépolymérisation lors de l'acidification et par repolymérisation provisoire en cas de chaulage ou d'apports de cendres d'incinération de biomasses. De plus, ces hydroxy-polymères présentent dans les sols aluminisés une affinité pour le phosphore qui semblent aller décroissante à partir d'un maximum, tantôt par dépolymérisation et réduction de leur surface en cours d'acidification, tantôt par concurrence avec des groupements hydroxyles en cours de neutralisation de l'acidité du sol, par exemple lors de ce qui devrait être considéré comme un surchaulage.

### 7.2.2. Phytobiologie

Les effets toxiques de l'aluminisation sur la croissance des végétaux sont bien documentés en phytobiologie pour de nombreuses espèces tant naturelles que cultivées. Les mécanismes d'adaptation par résistance se traduisent principalement par l'exsudation racinaire d'acides organiques. La tolérance s'exprime, elle, par une capacité d'accumulation de l'aluminium via une complexation interne de l'aluminium chez de nombreuses espèces, dont le théier constitue un exemple emblématique. Des régulations épigénétiques interviennent parfois très rapidement après une exposition, notamment chez le riz et chez plusieurs autres poacées composant les pâturages naturels du Saltus.

Des interactions avec la nutrition minérale et en particulier avec le phosphore sont souvent évoqués. Ainsi, des effets stimulants de l'aluminisation se marquent chez plusieurs espèces tant en solution de culture qu'en vases de végétation avec des échantillons de sol diversement aluminisés. Une hypothèse est alors émise. Elle consiste à attribuer une stimulation de la croissance à l'absorption simultanée de l'aluminium et du phosphore sous forme de complexes Al-P. Elle serait bénéfique par l'apport de phosphore jusqu'à ce qu'un seuil de toxicité en aluminium soit franchi en cours d'aluminisation.

### 7.2.3. Écologie

Les processus vitaux causant l'acidification et l'aluminisation des sols pilotent l'évolution et la diversité des écosystèmes non seulement dans le temps darwinien relativement long mais aussi et surtout instantanément dans l'espace environnemental très hétérogène de l'écosphère. C'est dans cet espace aux matériaux géologiques variés, naturellement drainé par les cours d'eau, au relief remodelé par l'érosion éolienne et pluviale, que les espèces et leurs populations tentent de réaliser leur niche fondamentale au gré des obstacles naturels et des stress environnementaux rencontrés. Cette dynamique spatiale génère ainsi d'abord de nouveaux écotypes qui sont les précurseurs éventuels de nouvelles espèces. Quelques

éléments de terrain confirment cette évolution, notamment dans le parc herbager de Rothamsted, chez le ray-grass, chez les fétuques ou encore chez les *Agrostis*. Cependant, les études existantes sur ces processus sont rares ou beaucoup trop fragmentaires et insuffisamment documentées sur le terrain. Elles sont aussi trop superficielles au sens propre. Il faut dès lors se contenter d'hypothèses en termes de coévolution entre les écosystèmes et l'aluminisation des sols. Elle pourrait être marquée par une rétrocession à partir d'un certain stade. Par ailleurs, plusieurs observations indiquent une augmentation de la biodiversité à mesure que l'aluminisation progresse, du moins en ce qui concerne les espèces ligneuses. Cela semble se confirmer au niveau planétaire où les forêts sont installées dans les sols les plus acides.

#### 7.2.4. Évolution globale des FP

L'évolution globale des facettes paysagéniques est documentée après la colonisation humaine du pléistocène. Mais la paysagénie ne démarre réellement qu'au cours de l'Holocène, la période actuellement en cours. Elle survient avec la domestication et la diffusion de la reproduction sexuée, au travers de l'histoire des peuples du monde entier et des empires. C'est donc *Homo sapiens* qui amplifie considérablement les niches-R des espèces végétales et animales considérées.

L'évolution globale des superficies de la facette paysagénique d'Ager (et d'Hortus) est bien liée à la colonisation du monde par la population humaine et marque une inflexion remarquable avec la révolution industrielle. Cela se marque également avec l'évolution urbanistique de Urbs dont un aperçu historique est proposé. Mais, aujourd'hui, Urbs n'occupe en superficie que 75 Mha, soit 0,55% des superficies émergées. Ager et Saltus occupent environ 2.500 Mha chacun, soit près de 20% chacun. Silva en est à 4.000 Mha, soit 30%, et Desertum occuperait le reste. L'évolution globale de la population humaine est marquée par une allure exponentielle à partir du XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècle. Elle suggère une transition démographique prochaine et/ou des innovations paysagéniques pour relever ce défi alimentaire.

#### 7.2.5. Interactions avec les HP agropédologiques

Si l'on se focalise sur les traits agropédologiques au niveau des HP plus ou moins aluminisés dans les FP de Silva, Saltus et Ager, plusieurs faits expérimentaux de la phytobiologie se confirment sur le terrain. Cependant, les données disponibles sont également souvent fragmentaires.

En Silva (pseudo-) naturelle, un itinéraire technique traditionnel basé sur un abattis-brûlis est très largement pratiqué encore de nos jours dans les zones tropicales. Une culture vivrière temporaire de 1 à 3 ans suivi d'une longue jachère régénératrice de la forêt est adoptée car la neutralisation de l'aluminium par les cendres d'incinération est temporaire. Les rendements chutent rapidement à cause d'une neutralisation éphémère de l'aluminium et du retour de ses effets toxiques. La longue jachère forestière qui suit permet de reconstituer les minéralomasses exploitées lors de l'incinération. Ce système exige un assolement forestier sur de grandes superficies d'où une agriculture itinérante et une densité faible de population humaine inférieure à 10 hab/km<sup>2</sup>.

Une exploitation de Silva en plantations monospécifiques est aussi largement répandue avec des espèces du genre *Eucalyptus* dont la résistante à l'aluminium et ses effets stimulants sur sa croissance à faible degré d'aluminisation sont confirmés à partir des résultats d'une expérimentation conduite au Mexique.

En Saltus, c'est dans les pâturages naturels d'altitude du Burundi que l'on trouve des éléments de terrain indiquant une action sélective de l'aluminisation sur la Poacée *Eragrostis olivacea*. Les pâturages que domine cette espèce y forment de vastes superficies de parcours pour un bétail très rustique alors que la densité de population y est l'une des plus dense d'Afrique, vivant en économie d'auto-subsistance dans de très petites exploitations. Ces dernières ne semblent donc pas à même de coloniser ces terres de Saltus fortement aluminisées, ce dont rend compte une expérimentation de terrain. La prédominance des poacées se confirme également dans les Saltus de basses Pyrénées.

Une importante remarque vient alors à l'esprit, à savoir que si la biodiversité est favorisée en Silva, le contraire se manifeste en Saltus. Là disparaît la concurrence pour la lumière grâce aux feux périodiques qui impactent les espèces ligneuses. Ce sont les espèces les plus aptes à dominer dans les niches-R (réalisées) qui ont un avantage concurrentiel, à savoir les poacées.

En Ager, des essais en HP multiples au Burundi et à Porto Rico confirment la sensibilité du manioc et de la patate douce au taux d'aluminisation élevés, ainsi qu'une meilleure tolérance ou résistance du manioc. De plus, à Porto Rico, des effets stimulants de faibles taux d'aluminisation sont également confirmés.

En Amazonie, le succès de l'Ager fourrager du soja et des pâturages artificiels est entretenu par le chaulage et les engrais minéraux. Ce succès serait cependant compromis en cas de suppression des subventions ou des facilités de crédit. Il en résulte donc que l'incidence de l'aluminisation sur les rendements des HP d'Ager doit être relativisée selon le contexte d'une économie de marché, subventionnée de surcroît, ou d'une économie d'auto-subsistance. L'expansion réussie dans des HP d'Ager de plantations pérennes comme le palmier à huile dans le Sud-Est asiatique permettent de conforter leur tolérance ou résistance relative à l'aluminisation mais ne sont que trop sommairement documentés.

### *7.3. Considérations finales*

Finalement, il est étonnant que la rareté ou l'incomplétude des données disponibles sur les traits écologiques et agropédologiques des HP dans les grandes types de FP, alors qu'elles représentent environ 70% des terres émergées (30% en Silva, 18 à 20% pour Saltus et 13 à 18% pour Ager).

L'organisation des savoirs et savoir-faire en silos disciplinaires en paraît la cause fondamentale, héritée des Lumières. Elle crée un déficit épistémologique pour l'étude et à la compréhension de ces systèmes complexes évolutifs. Un problème éthique y est également intriqué à savoir une dérive plus ou moins inconsciente des sciences et des sciences appliquées par une volonté d'écologisation de la société alors que le déficit des connaissances et compétences n'est pas comblé. Les défis de la sécurité alimentaire sont dès lors loin d'être correctement évalués.

Le modèle paysagénique proposé vise à corriger ces carences au niveau territorial. Il propose carrément l'institution d'une R&D transdisciplinaire. Cette dernière doit tenir compte de la volonté, de la collaboration et de la participation des populations locales, trop souvent négligées par des politiques de développement descendantes dites "top-down". L'émergence locale de "communs potentiels" est ainsi primordiale dans ce modèle paysagénique.

Il manque par ailleurs des données esthétiques et culturelles mais le modèle proposé est configuré pour les intégrer.

Bien d'autres processus que l'aluminisation se déroulent et animent les paysages. Ils peuvent également être étudiés avec un tel modèle au niveau local: l'alcalinisation ou la salinisation des sols mais aussi l'industrialisation, l'urbanisation, l'écologisation ou la mondialisation. Des questions très pragmatiques peuvent même être abordées pour reconfigurer les IP et EP: adoption d'innovations dans les filières, adaptation à certains marchés, aménagement des itinéraires techniques dans les systèmes forestiers, de culture ou d'élevage, etc.

Le façonnement et l'évolution des paysages s'est réalisé surtout de manière empirique par les populations locales puis ils ont été amendé ou bouleversé par la politique et des conseils d'agronomes, d'urbanistes, d'architectes dans une démarche descendante (top-down). Ce qui est finalement proposé ici, c'est une démarche ascendante (bottom-up) et une explication interdisciplinaire rationnelle des interactions entre ses nombreux composants et parties prenantes en vue de promulguer un humanisme paysager.

## 8. Glossaire

*Les astérisques (\*) renvoient à d'autres termes présents dans le glossaire.*

Acteurs: au sens de ceux qui accomplissent des actes, agissent dans un territoire, et y ont donc des intérêts et des aspirations. Ce sont les acteurs sociaux ou économiques.

Agropédologie: approche interdisciplinaire des relations qui existent dans les [holons paysagéniques (HP)]\* entre les caractéristiques et propriétés des sols, leurs [traits]\*, et leur exploitation agronomique, c'est-dire les [itinéraires techniques]\* mis en œuvre dans les [systèmes forestiers]\*, les [systèmes de pâturage]\* et les [systèmes de culture]\*.

Aluminisation: saturation progressive du [complexe adsorbant]\* du compartiment sol d'un [holon paysagénique (HP)]\* aux détriments des [cations de base]\*. Ces derniers sont déplacés en solution et soumis alors au lessivage par les eaux pluviales d'infiltration et de drainage en profondeur dans le sol.

Anthrobiote: ce terme est dérivé de celui de biote en écologie où il représente plus largement l'ensemble des organismes vivants d'un habitat/biotope particulier. Le préfixe "anthro" est utilisé en paysagénie pour désigner le rôle décisif de l'humain dans la composition du biote au niveau des [facettes]\* et [holons paysagéniques]\*.

Barkhane: dune en croissant dont la convexité fait face au vent, et la concavité orientée sous le vent.

Bassin versant: zone propre à un cours d'eau dans laquelle la topographie naturelle conduit au ruissellement de l'eau pluviale vers ce cours d'eau qui sert ainsi d'exutoire. Cette zone est délimitée par une ligne de partage des eaux pluviales (crête) avec des bassins versants voisins. Le bassin versant d'un cours d'eau englobe tous les sous-bassins versants de ses affluents.

Biome: territoire biogéographique spécifique aux espèces végétales et animales qui y prédominent et qui sont adaptées à son climat (température, précipitations). Le biome a des limites essentiellement latitudinales et altitudinales. Exemples de biomes: désert, maquis, toundra, steppe, forêt boréale, forêt tempérée, forêt tropicale humide, savane tropicale.

Bouture: partie d'un organe ou d'un fragment d'organe d'une plante (racine, tige, feuille) qui peut être plantée pour s'enraciner et développer un individu en tant que clone de la plante mère. C'est donc un mode de reproduction végétatif, asexué. Pour la patate douce par exemple, ce sont des boutures de tiges (rampantes). Les boutures de patate douce sont parfois appelées "cordes".

Cations de base: il s'agit des cations  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$  qui sont adsorbés sur le [complexe adsorbant]\* du sol. Ce dernier développe effectivement des charges négatives. Ces cations contiennent un élément majeur ( $\text{K}^+$ ) ou mineur ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) dans l'alimentation minérale des plantes. Leur disproportion relative peut engendrer des carences physiologiques chez les plantes ou des instabilités dans l'agrégation des argiles aux échelles nano- et micrométriques, notamment en cas de sodication ( $\text{Na}^+$ ). Ils sont hérités d'abord de l'altération des minéraux primaires de la roche mère mais peuvent aussi être apportés par fertilisation ou amendement tant minéral qu'organique, par une eau d'irrigation ou par des retombées atmosphériques (poussières, embruns, etc.). Enfin, ils peuvent être recyclés par décomposition de la matière organique issue des litières, des racines mortes, des déjections animales, etc.

Caractère ("phénotypique"): expression visible d'un ou plusieurs [traits (génotypiques)]\* façonnant la morphologie de chaque [facette paysagénique (FP)]\* composant une [instanciation paysagénique (IP)]\*. Un caractère morphologique d'un lieu représentatif d'une FP peut être relatif au relief (forme et position topographique, altitude), à l'aspect de

l'[anthrobiote]\* comme la catégorie de FP, à l'hydrologie (étang, rivière, torrent) ou à l'humidité (marécage, tourbière), à l'aspect pierreux, rocheux ou sableux de la surface du sol, à l'esthétique, à la densité de population humaine et à son type d'habitat, etc.

Commun: territoire bien défini, délimité et partagé par une communauté qui en assure la gouvernance, l'exploitation et bénéficie de la jouissance des aménités et des valeurs de production.

Complexe adsorbant (ou d'échange du sol): micro-surfaces argileuses et/ou humiques plus ou moins intriquées les unes aux autres et qui présentent des charges électriques négatives dont certaines sont dépendantes du pH (cas notamment des groupements carboxyle et hydroxyle des composés humiques). Ces charges constituent la capacité d'échange cationique (CEC) d'un sol et elles diminuent en général avec la profondeur.

Cuirasse (latéritique): couche d'induration et de cimentation de débris rocheux et de latérite, par des composés riches en fer et en aluminium. L'individualisation du fer ferrique suppose une accumulation par migration de fer ferreux en milieu saturé en eau puis son oxydation en fer ferrique par oscillation saisonnière de la nappe phréatique ou par un assèchement du climat (pulsations climatiques).

Cultivar: variété cultivée d'une espèce qui en partage le génome. Le génotype d'un cultivar est particulier et distinct de celui d'un autre cultivar. La reproduction semencière d'un cultivar exige la conservation de son génotype.

Culture: au sens large entendu dans ce livre, une culture est un ensemble de savoirs et savoir-faire, de traditions, de goûts, d'œuvres et d'ouvrages dans tous les domaines des arts, des sciences et des techniques tels qu'ils ont été élaborés et sont pratiqués par une population humaine. La culture est donc le propre de l'homme. Mais ce dernier fait aussi partie de la nature par son génome. C'est en interaction avec la nature qui l'entoure que l'homme façonne sa culture.

Design: art de concevoir et de configurer une chose pour qu'elle s'harmonise avec les besoins et souhaits des humains auxquels l'usage de cette chose est destiné. C'est ainsi que la paysagénie opère le design des territoires.

Écobuage: formation de petits tas de végétation ramassée après labour par exemple, puis mise à feu et épandage des cendres.

Écosphère: ensemble qui englobe la lithosphère, croûte terrestre et partie supérieure du manteau, l'hydrosphère, constituée des eaux souterraines et de surface, la biosphère en tant que regroupement de tous les organismes vivants, et l'atmosphère, l'enveloppe gazeuse entourant la planète.

Écotype: variété ou groupe d'individus d'une espèce possédant un génotype particulier, héréditaire et adapté à des conditions particulières de l'environnement. Il s'agit en quelque sorte d'une sous-espèce.

Écozone: territoire écologique de grandes dimensions comparable au [biome]\*. L'écozone peut être subdivisée en écorégions. Les classifications sont relatives ainsi donc que les limites entre écozones, biomes et écorégions.

Épistémologie (constructiviste): branche philosophique portant l'étude des fondements et méthodes d'acquisition des savoirs et savoir-faire humains et à leur développement. L'épistémologie constructiviste postule que le savoir et le savoir-faire dépendent de la culture. Autrement-dit, que la manière dont les objets sont étudiés et ouvrages dépendent des sujets, c'est-à-dire de leur connaissances et compétences existantes, des points de vue et préjugés qu'ils adoptent.

Espèce paysagénique (EP): ensemble d'[instanciations paysagéniques (IP)]\* partageant des réseaux de [traits (génotypiques)\*] exprimant des [caractères (phénotypiques)\*] similaires mais non complètement identiques au niveau des facettes paysagéniques (FP). Ces dernières ont des relations mutuelles typiques et spécifiques au design général de l'EP intégrée à sa [région naturelle]\* d'appartenance.

Esthétique: branche philosophique dédiée à la compréhension sensible des objets naturels et artistiques, aux sensations et aux émotions qu'ils peuvent susciter. L'esthétique n'est pas limitée à l'étude de la beauté des choses mais aussi à leur étrangeté, à leur originalité ou à l'intensité des réactions qu'elles produisent.

Éthique (anthropocentrique, biocentrique ou écocentrique): branche de la philosophie qui vise la distinction entre le bien et le mal au-delà des prescriptions manichéennes de la morale qui ne s'adressent qu'à des situations assez simples ou élémentaires. L'éthique contient la morale mais elle est affaire de débat, intérieur et collectif, dans des situations complexes où des avis et points de vue divergents s'expriment. Il existe ainsi plusieurs postures éthiques par rapport aux relations de l'homme avec la nature. Une posture anthropocentrique forte place l'homme en maître absolu et dominateur d'une nature-objet. Une posture anthropocentrique plus modérée considère l'homme comme intendant et améliorateur de la nature. Dans cette posture de gérant, l'homme peut parfaire la nature par la technique. Il existe aussi une posture écocentrique qui permet de préserver l'intégrité, la stabilité et l'esthétique de la communauté biotique dans laquelle l'homme se considère comme simplement inséré. Enfin, une posture biocentrique soutient que tout organisme vivant est une fin en soi, qu'il a une valeur intrinsèque inaliénable, indépendante des points de vue des humains. C'est une posture anti-spéciste en quelque sorte.

Diaspore: élément de dissémination d'une espèce dans l'espace, tel que graine, bouture, spore, etc., par le vent, l'eau, les animaux, l'homme, etc.

Facette paysagénique (FP): portion territoriale d'une [instanciation paysagénique (IP)]\*, en un seul ou plusieurs tenants, dont les [caractères (phénotypiques)]\* sont diagnostiques de l'une des sept catégories constituées par l'Ager, le Saltus, la Silva, l'Urbs, l'Hortus, l'Aqua et le Desertum. Une FP peut être organisée et gérée en tant que [commun]\* par les [acteurs]\* qui ont les mêmes intérêts. Les [acteurs]\* des différentes FP de l'IP peuvent également organiser et gérer ensemble et mutuellement le "commun composite" que représente alors cette IP.

Génotype/génome: le génome correspond à l'ensemble des gènes d'une espèce, c'est-à-dire à l'ensemble de ses individus. Si l'on se réfère à un individu particulier on parle de son génotype car tous les gènes du génome ne sont pas exprimés de la même manière d'un individu à l'autre, ce qui conduit à des phénotypes différents entre les individus.

Holon paysagénique (HP): portion territoriale d'une [facette paysagénique (FP)]\* caractérisées par une combinaison spécifique de [traits]\* par rapport aux HP adjacents. Les [traits]\* à prendre en considération pour diagnostiquer un HP font l'objet d'une concertation entre les divers disciplines convoquées. Il s'agit de caractéristiques mesurables ou propriétés observables avec des appareils, des dispositifs ou des référentiels plus ou moins sophistiqués. Ainsi, des taux d'aluminisation suffisamment contrastés peuvent être diagnostiques de différents HP. Il en va de même pour différents [itinéraires techniques]\*.

Horizon pédologique: couche de sol qui se distingue morphologiquement sur la coupe verticale d'une fosse creusée généralement sur plus de 100 cm de profondeur. La distinction des horizons, dans le "profil" vertical ainsi révélé, s'opère sur base de variations de la densité en racines, de la couleur, de la teneur en matière organique, de la teneur en argile, de la structure, de la consistance, de l'induration éventuelle du matériau, etc.

Instanciation paysagénique (IP): configuration particulière d'une [espèce paysagénique (EP)]\* correspondant à un agencement de [facettes paysagéniques (FP)] en vue d'assurer

l'harmonisation des ressources de son territoire avec les besoins et aspirations de sa population humaine.

Itinéraire technique (agronomique): définit les choix des espèces, leur succession dans le temps (rotation) et leur agencement dans l'espace (assolement) ainsi que toutes les modalités phytotechniques qui sont adoptées aux différents stades de leur développement. Parmi ces modalités techniques on peut citer la préparation des sols, le choix des semences ou des plants, les apports d'amendements et de fertilisants organiques et minéraux, les apports d'eau d'irrigation, le suivi phytosanitaire et les interventions de protection ou d'entretien par voie chimique, biologique, manuelle ou mécanique, les décisions et moyens de récolte des productions, etc.

Lette: appellation régionale des "Landes de Gascogne" pour désigner une zone humide en dépression située transversalement entre les cordons dunaires du littoral.

Loci (de traits quantitatifs): positions d'un certain nombre de gènes (traits génotypiques, segments d'ADN) dont la régulation détermine l'intensité d'expression d'un caractère (phénotypique).

Médiance: "*sens à la fois écologique et symbolique d'un milieu*" d'après le glossaire sommaire de BERQUE (1987).

Mème: idée qui se propage de manière mimétique, par imitation, parfois de manière inconsciente.

Mésologie: étude du milieu au sens de BERQUE (1987).

Noyau (cellulaire): structure cellulaire contenant l'essentiel du matériel génétique (ADN) de la cellule chez les organismes eucaryotes (regroupant les grands règnes du monde du vivant que sont les animaux, les champignons, les plantes et les protistes). C'est donc le siège du génome sauf chez les procaryotes (bactéries) qui n'ont pas de noyau cellulaire.

Orogenèse: processus de formation du relief lié à la dynamique des plaques tectoniques et dans lequel on peut inclure le volcanisme. Elle concerne notamment la formation des grandes chaînes de montage comme les Alpes, les Pyrénées, l'Himalaya, la Cordillère des Andes, etc.

P53 (protéine de transcription génétique): c'est une protéine qui se fixe spécifiquement sur les régions régulatrices des gènes dont elle contrôle l'expression. Elle est dénommée "gardienne du génome".

Plamodesme: canal traversant la paroi cellulaire, de structure membranaire et reliant les [réticulum endoplasmique]\* de cellules adjacentes.

Pédogenèse: processus d'évolution des sols depuis leur roche mère meuble ou indurée jusqu'à leur état de différenciation à un moment donné. Ces processus peuvent être multiples tels que la fracturation et l'ameublissement des roches, l'altération primaire et secondaire des minéraux par dissolution, hydrolyse, dégradation, agradation, néoformation, propres à l'argilisation (héritage et formation des argiles) du matériau parental, l'incorporation de la matière organique et son humification, le lessivage des ions solubilisés, des argiles et composés humiques, la structuration des agrégats meubles, etc.

Pédopaysage: distribution spatiale (3D) d'[horizons pédologiques]\* développés dans un ou plusieurs matériaux parentaux des sols d'un paysage donné. Le pédopaysage se développe sous l'action d'un ensemble de facteurs ou variables dynamiques associées ou dérivées de la géomorphologie, du climat, de la végétation et des effets anthropiques.

Phénotype/phénomène: de la même manière qu'un génotype et phénotype s'appliquent à un individu, un génome et phénomène s'appliquent à toute la population d'une [espèce paysagénique\*].

Physiocrate: économiste du XVIII<sup>e</sup> siècle accordant au secteur primaire agricole le statut de production initiale de toute richesse.

Phytotron: installation où sont conduites des expérimentations de phytobiologie en contrôlant et ajustant les conditions de température, d'humidité, d'éclairement, de concentrations des éléments minéraux en solutions nutritives, etc.

Poldérisation: récupération de terres littorales, de marais, d'estuaires ou de lacs situées en dessous du niveau de la mer, des lacs ou des cours d'eau voisins. La récupération se fait par endiguement et drainage.

Polymathique: relatif à des savoirs et savoir-faire multiples, en particulier dans les domaines des sciences et des arts. Léonard de Vinci était typiquement un "polymathe".

Profilage (de gène): isolation et identification de séquences spécifiques d'ADN pour un gène donné.

Région naturelle: communauté d'[espèces paysagéniques (EP)\*] aux [phénomènes\*] convergents du fait qu'elles partagent des caractères naturels "significativement" similaires en termes essentiellement de structure géologique, de relief et de climat.

Réticulum endoplasmique: vaste réseau membranaire replié sur lui-même et connecté au noyau de la cellule. Sa partie rugueuse est le siège de la synthèse des protéines membranaires et sa partie lisse participe à la synthèse des lipides ainsi qu'au stockage du calcium.

Rhizosphère: zone entourant les racines sur quelques centimètres, marquée par une activité microbiologique plus intense, particulièrement celle des bactéries et champignons. C'est une zone directement influencée par les exsudats racinaires, les échanges gazeux ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ) et de solutés minéraux ( $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $K^+$ ,  $H_2PO_4^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ , etc.) ainsi évidemment que par les flux d'absorption d'eau par les plantes.

SOS (correction/adaptation génétique): système de réparation des mutations provoquées par un stress cellulaire chez les bactéries. Ce système peut être accompagné de mutations adaptatives et donc provoquer une augmentation de la variabilité génétique.

SRM (réparation des mésappariements génétiques): lors de la réplication de l'ADN un mésappariement de bases de nucléotides peut se produire et rendre imparfaite la nouvelle copie reproduite de l'ADN. Le système SRM corrige ces mésappariements et est également responsable de la barrière génétique entre les espèces. Ce système n'est cependant pas infaillible et peut laisser passer des mutations. Son efficacité se réduit progressivement avec le vieillissement de l'individu.

Surface terrière (forestière): indicateur de densité et de volume des arbres. Il correspond la surface de la section d'un arbre mesurée à 1,30 mètre du sol. La surface terrière totale s'exprime en  $m^2/ha$ . Elle correspond à la surface qu'occuperaient tous les troncs d'arbres situés dans un hectare si on les regroupait tous au même endroit.

Surface agricole utile (SAU): somme des superficies des [facettes paysagéniques (FP)\* d'Ager et de Saltus.

Système de culture: succession typée de cultures pures ou en associations éventuelles pour lesquelles sont précisées les différents [itinéraires techniques]\* mis en œuvre. Ce système concerne donc une rotation déterminée dans le temps ou un assolement dans l'espace.

Système de pâturage: ensemble spatial organisé selon une ou plusieurs communautés végétales spécifiques et pérennes, herbues et/ou semi-arbustives, qui sert au broutage d'un ou plusieurs troupeaux domestiques de bovins, ovins, caprins ou autres ruminants. Ce système a donc une triple constitution: des sols, des végétaux et des ruminants d'élevage. Les jachères pâturées et prairies pâturées d'une durée de plus de 5 ans sont également incluses dans le concept de système de pâturage. Par contre, les prairies fauchées et les pâturages temporaires de 5 ans ou moins sont inclus dans celui de système de culture (fourragère).

Système forestier: ensemble spatial organisé en un ou plusieurs peuplements d'espèces ligneuses destiné à la production de bois d'œuvre, de chauffe, de trituration, de carbonisation (charbon de bois) voire beaucoup plus accessoirement de bois d'abattis-brûlis en agriculture itinérante. Le concept de système forestier s'oriente vers un ensemble d'interactions entre un peuplement forestier et sa station de référence. Les stations forestières sont représentatives des divers peuplements d'un massif. Chacune d'elles se rapporte normalement à un sol représentatif de l'association phytosociologique propre à un peuplement. Ce dernier constitue donc une partie relativement homogène d'une forêt. Il devrait être identifiable par l'arrangement spatio-temporel des arbres constitutifs. Il développe aussi une structure caractérisée par le mélange et les dimensions des arbres dominants et par l'articulation verticale des étages et sous-étages constitutifs.

Système d'information géographique (SIG): les différents jeux de données paysagéniques sont par définition multi-sources. Elles peuvent être rassemblées et géoréférencées dans un système de gestion de bases de données (SGBD). Ce dernier peut contenir non seulement des données de type technoscientifique mais aussi de type artistique ou esthétique (archéologiques, patrimoniales, architecturales, urbanistiques, etc.). Ces types multiples de données deviennent alors interopérables via des logiciels qui y donnent accès et en permettent aussi la mise à jour, la combinaison, le croisement et autres traitements nécessaires grâce à un outil SIG-logiciel.

Tallage: production de tiges multiples en touffe au stade de développement correspondant d'une plantule de poacée (graminée). Chaque tige pouvant ensuite produire un épis, ce qui multiplie le rendement des céréales (excepté pour le maïs qui a perdu ce pouvoir de tallage).

Topologique: relatif à la structure spatiale d'un ensemble, à ses limites, à sa continuité et à son voisinage.

Trait ("géotypique"): caractéristique (mesurable) ou propriété identifiable avec des appareils, des dispositifs ou des référentiels plus ou moins sophistiqués. Ainsi, les taux d'aluminisation ou les [itinéraires techniques]\* sont des traits agropédologiques, qui lorsqu'ils sont suffisamment contrastés peuvent être diagnostiques de différents [holons paysagéniques (HP)]\*.

Trajection: "combinaison du subjectif à l'objectif produisant l'entre-deux mésologique", d'après le glossaire sommaire de BERQUE (1987).

Xylème: tissu végétal constitué de cellules mortes, sans membrane plasmique, entourées de lignine et qui forme des vaisseaux de transport de l'eau vers les feuilles (sève minérale brute). Le xylème assure aussi un rôle de soutien.

## 9. Références citées

- ABRUNA-RODRIGUEZ F., VINCENTE-CHANDLER J., RODRIGUEZ J. & SILVA S., 1979, "Crop response to soil acidity factors in Ultisols and Oxisols in Puerto Rico, V. Sweetpotato", *J. Agric. Univ. P.R.*, 63, 250-267
- ABRUNA-RODRIGUEZ Fernando, VINCENTE-CHANDLER José, RIVERA Edmundo & RODRIGUEZ José, 1982, "Effect of soil acidity factors on yields and foliar composition of tropical root crops", *Soil sci. soc. Am. J.*, 46, 1004-1007
- AFES (Association française pour l'étude du sol), 2009, *Référentiel pédologique 2008*, Versailles, Quæ.
- AKITT J.W., GREENWOOD N.N, KHANDELWAL B.K. & LESTER G.D., 1972, "Al nuclear magnetic resonance studies of the hydrolysis and polymerization of the hexo-aquo-aluminium (III) cation", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 1004-1007
- ALEXANDRE-PYRE Sybille, 1971, *Le plateau des Bianco (Katanga). Géologie et géomorphologie*, Ac. roy.belge Sc d'Outre-Mer, Mém., 151p
- ALIA F.J., SHAMSHUDDIN J., FAUZIAH C.I., HUSNI M.H.A. & PANHWAR Q.A., 2015, "Effects of aluminum, iron and/or low pH on rice seedlings grown in solution culture", *Int. J. Agric. Biol.*, 17: 702-710, (RG<sup>5</sup>)
- ALONGO Sylvain, 2013, *Étude microclimatique et pédologique de l'effet de lisière en Cuvette centrale congolaise: impact écologique de la fragmentation des écosystèmes, cas des séries "Yangambi" et "Yakonde" à la région de Yangambi (R.D. Congo)*, Thèse de doctorat en Sciences agronomiques et ingénierie biologique, Université Libre de Bruxelles, Faculté des Sciences, Service d'Écologie du paysage et Systèmes de Production Végétale, 316 pp.
- ATLAN Henri, 1972, L'organisation biologique et la théorie de l'information, Hermann, coll. "Actualités scientifiques et industrielles"
- ATLAN Henri, 1995, "ADN: programme ou données", *Transversales sciences cultures*, 33
- AUDOUE Jean, CHAPOUTHIER Georges, LAMING Denis & OUDEYER Pierre-Yves, 2015, *Mondes mosaïques - Astres, villes, vivant et robots*, Paris, CNRS Éditions
- BACHE B.W. & SHARP G.S., 1976, "Soluble polymeric hydroxy-aluminium ions in acid soil", *J. Soil Sci.*, 27: 167-174
- BARNOSKY Anthony D., MATZKE Nicholas, TOMIYA Susumu, WOGAN Guinevere O. U., SWARTZ Brian, QUENTAL Tiago B., MARSHALL Charles, McGUIRE Jenny L., LINDSEY Emily L., MAGUIRE Kaitlin C., MERSEY Ben & FERRER Elizabeth A., 2011, "Has the Earth's sixth mass extinction already arrived?", *Nature* 471, 51-57, (RG)
- BENOIT Marc, RIZZO Davide, MARRACCINI Elisa, MOONEN Anna Camilla, GALLI Mariassunta, LARDON Sylvie, RAPEY Hélène, THENAIL Claudine & BONARI Enrico, 2012, "Landscape agronomy: a new field for addressing agricultural landscape dynamics", *Landscape ecology*, 10, 27: 1385-1394
- BERGOEING Jean Pierre, 2004, "Impacts météoriques et changements climatiques", *Revista Geográfica*, 135, 79-94, (RG)

---

5 RG = disponible sur ResearchGate

- BERQUE Augustin, 1987, "Milieu et motivation paysagère", *Espace géographique*, tome 16, n°4, 241-250
- BLANC Patrick, 1997, "La biodiversité tropicale : mémoire des changements passés", In: *Lettre n°6 du Programme International Géosphère Biosphère-Programme Mondial de Recherches sur le Climat*, CNRS, France
- BLANC-PAMARD Chantal, 1986, "Dialoguer avec le paysage ou comment l'espace écologique est vu et pratiqué par les communautés rurales des hautes terres malgaches", in Chatelin Y., G. Riou (éd), *Milieus et paysages*, Paris, MASSON: 17-34.
- BLOOM P.R., McBRIDE M.B. & WEAVER R.M., 1979, "Aluminium organic matter in acid soils: buffering and solution aluminium activity", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43: 488-493
- BLOOM P.R., 1981, "Phosphorus adsorption by an aluminium-peat complex", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 267-272
- BOJÓRQUEZ-QUINTAL Emanuel, ESCALANTE-MAGANA Camilo, ECHEVARRIA-MACHADO Ileana & MARTINEZ-ESTÉVEZ Manuel, 2017, "Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils", *Frontiers in Plant Science*, vol. 8, art. 1767, (RG)
- BOLLIER David, 2014, *La renaissance des communs. Pour une société de coopération et de partage*, Paris, Éditions Charles Léopold Mayer, traduit de l'américain par Olivier Petitjean
- BOLT G.H. & BRUGGENWERT M.G.M., 1976, *Soil chemistry - A. Basic elements*, Elsevier.
- BORGES Alberto V., DARCHAMBEAU François, TEODORU Cristian R., MARWICK Trent R., TAMOOH Fredrick, GEERAERT Naomi & al., 2015a, "Globally significant greenhouse-gas emissions from African inland waters", *NATURE GEOSCIENCE*, Published online, DOI: 10.1038/NNGEO2486, (RG)
- BORGES Alberto V., ABRIL Gwenaël, DARCHAMBEAU François, TEODORU Cristian R., DEBORDE Jonathan, VIDAL Luciana O. & al., 2015b, "Divergent biophysical controls of aquatic CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in the World's two largest rivers", *Scientific reports*, Published online, DOI: 10.1038/srep15614, (RG)
- BOTTOLLIER-DEPOIS, 2012, "Fiche de lecture: Gouvernance des biens communs, Elinor Ostrom, 2010", Observatoire du Management Alternatif, Paris, HEC
- BRETAGNOLLE Vincent & BAUDRY Jacques, 2015, "Vers une agro-écologie des territoires, pour une gestion durable des services écosystémiques: de l'observation à l'expérimentation", *Innovations Agronomiques*, 43,, 51-55
- BRINKMANN, W.L.F., 1983, "Nutrient balance of a central amazonian rainforest: comparaison of natural and man-managed systems", *Assoc. Int. Hydrol. Sci. Publ.*, 140: 153-163
- BROSSET C. BIEDERMANN G. & SILLEN L.G., 1954, "Studies on the hydrolysis of metal ions, XI, The aluminium ion, Al<sup>3+</sup>", *Acta Chem. Scand.*, 8, 1917-1926
- BRUNNER Ivano and SPERISEN Christoph; 2013: "Aluminium exclusion and aluminium in woody plants", *Frontiers in plant science*, vol 4, article 172
- CALLAWAY Ewen, 2017, "Oldest *Homo sapiens* fossil claim rewrites our species' history", *Nature*, doi:10.1038/nature.2017.22114
- CÁMARA ARTIGAS Rafael, 2009, "Concepts, approche bioclimatique et typologie des savanes. Application aux savanes américaines", *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 246, 175-218

- CASTELLA Jean-Christophe, 2005, "Une méthode d'analyse multi-échelle des transitions agraires, Application aux zones de montagne dans le Nord du Viêt-nam", *L'Espace géographique*, 2005/4, 34, 351-366
- CHADWICK Oliver A. & CHOROVER Jon, 2001, "The chemistry of pedogenic thresholds", *Geoderma*, 100, 321-353
- CHARLES-DOMINIQUE Pierre, 1997, "La forêt en Amazonie, une histoire Holocène très mouvementée", In: *Lettre n°6 du Programme International Géosphère Biosphère-Programme Mondial de Recherches sur le Climat*, CNRS, France
- CHARMET Gilles et BALFOURIER François, 1994, "Influence of ecological factors on population differentiation in perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.)", *Genetic Resources and Crop Evolution*, 41: 175-184
- CHENERY E.M., 1948, "Aluminium in the plant world", *Kew Bull.*, 3, 173-183
- CHEVERRY Claude, 1969, "La genèse des sols salés à alcalis dans les polders des rives nord-est du lac Tchad", *Agrokemia es Talajtan (Agrochimie et Pédologie)*, 18, 238-242
- CHOMARAT-RUIZ Catherine, 2014, *Précis de paysagétique*, Presses universitaires de Valenciennes, 229 pp.
- CHOUQUER Gérard, 2002, "À propos d'un contresens partiel sur « Pays » et « Paysage » dans le Court Traité du Paysage d'Alain Roger", *Études rurales*, 161-162, 275-288
- CHOUQUER Gérard, 2003, "Françoise Burel et Jacques Baudry, Écologie du paysage. Concepts, méthodes et applications", *Études rurales*, [En ligne], 167-168
- CHUNG Sung-Yoon, KIM Young-Min, KIM Jin-Gyu & KIM Youn-Joong, 2009, "Multiphase transformation and Ostwald's rule of stages during crystallization of a metal phosphate", *Nature Physics*, 5, 68-73, (RG)
- CHURCHMAN Jock and LOWE David, 2012, "Alteration, formation, and occurrence of minerals in soils", In: Huang, P.M.; Li, Y; Sumner, M.E. (editors), *Handbook of Soil Sciences, 2nd edition, Vol. 1: Properties and Processes*, CRC Press (Taylor & Francis), Boca Raton, FL, pp. 20.1-20.72, (RG)
- CoE - Conseil de l'Europe, 2000, *Convention européenne du paysage*
- COLLINS J.P., KINZIG A., GRIMM N.B., FAGAN W.F., HOPE D., WU J. and BORER E.T., 2000, "A new urban ecology. Modeling human communities as integral parts of ecosystems poses special problems for the development and testing of ecological theory", *American Scientist*, 88: 416-425
- COLWELL Robert K. & RANGEL Thiago F., 2009, "Hutchinson's duality: the once and future niche", *PNAS*, 106: 19651-19658, (RG)
- CRUDZEN Paul Josef, 2002, "Geology of mankind", *Nature*, 415, 23
- DAVODEAU Hervé, 2009, "Les atlas de paysages français ou les difficultés de concilier l'approche sensible et l'approche scientifique", revue italienne de géographie *Rivista geografica italiana*, 2: 173-194
- DEKOCK P. C. & MITCHELL R. L., 1957, "Uptake of chelated metals by plants", *Soil Science*, 84, 1: 55-62

- DE ROUW Anneke, 1991, *Rice, weeds and shifting cultivation in a tropical rain forest, A study of vegetation dynamics*, Proefschrift ter verkrijging van de graad van doctor in de landbouw- en milieuwetenschappen, Landbouwniversiteit te Wageningen, Nederland
- DÉRY Steve, 1996, "Expansion agricole et déforestation: le modèle sud-est asiatique", *Cahiers de géographie du Québec*, 40,109, 29-48, DOI: 10.7202/022543ar
- DEUFFIC Philippe, GINELLI Ludovic & Kevin PETIT, 2010, "Patrimoine foncier.. et naturel ? Les propriétaires forestiers face à l'écologisation des Landes de Gascogne", *Sud-Ouest Européen*, 30, 109-124, (RG)
- DIOT Marie-Françoise & TASTET Jean-Pierre, 1995, "Paléo-environnements holocènes et limites chrono-climatiques enregistrés dans un marais estuarien de la Gironde (France)", *Quaternaire*, 6, 2, 63-75
- DOMMERGUES Yvon et MANGENOT François, 1970, *Écologie microbienne du sol*, Paris, Masson et C<sup>ie</sup>, 796 pp.
- DOUNIAS Edmond, 1996, "Recrûs forestiers post-agricoles : perceptions et usages chez les Mvae du Sud-Cameroun", *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 38, 1, 153-178
- DRAAF (Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt - Aquitaine), 2013, "L'irrigation en Aquitaine: un facteur de production essentiel", *AGRESTE Aquitaine - Analyses et résultats*, 70
- DROEVEN Émilie, FELTZ Claude et KUMMERT Magali, 2004, *Les territoires paysagers de Wallonie*, Ministère de la région wallonne, Namur, Études et Documents, CPDT, 4
- DUBREUILH Jacques, CAPDEVILLE Jean-Pierre, FARJANEL Geneviève, KARNAY Gabriel, PLATEL Jean-Pierre & SIMON-COINÇON Régine, 1995, "Dynamique d'un comblement continental néogène et quaternaire: l'exemple du bassin d'Aquitaine", *Géologie de la France*, 4, 3-26
- DUFEY Joseph, 2002, "Solution du sol et garniture ionique des complexes d'échange: évolution suite à l'acidification et au chaulage", in: Association française pour l'étude du sol, *Programme et résumés du colloque acidification des sols, 4-5 avril 2001*, INRA Versailles, 5-6
- ELISA A.A, NINOMIYA S., SHAMSHUDDIN & ROSLAN I., 2016, "Alleviating aluminum toxicity in an acid sulfate soil from Peninsular Malaysia by calcium silicate application", *Solid Earth*, 7, 367-374
- ESPIAU P. et PEDRO G., 1983, "Etude du phénomène de ferrollyse par voie expérimentale. Production d'acidité d'échange et mise en évidence du rôle catalytique des minéraux argileux ", *Bulletin de l'association française pour l'étude du sol*, 3-4, 173-184
- EVARD, C., ROELS J., REMY P., TSHITENGE G. et H. POLLAK H., 1967, "Détection par activation neutronique d'accumulateurs d'aluminium dans la flore congolaise", *Atomic Energy Review*, 5(3), 119- 125.
- FABER-LANGENDOEN Don & GENTRY Alwyn H., 1991, "Structure and diversity of rain forests at Bajo Calima, Choco region, western Colombia", *Biotropica*, 23, 2-11
- FAO, 2016, *Situation des forêts du monde 2016. Forêts et agriculture: défis et possibilités concernant l'utilisation des terres*, Rome
- FAO, 2018, *Base de référence mondiale pour les ressources en sols 2014 - Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques - Mise à jour 2015*, Rome

- FAURE Élodie & GALOP Didier, 2011, "La fin du paradigme du désert landais: histoire de la végétation et de l'anthropisation du désert landais à partir de l'étude palynologique de quelques lagunes de la Grande-Lande", in: *De la lagune à l'aerial*, actes du colloque de Sabres (nov. 2008), Aquitania, Pessac, 43-59, (RG)
- FEARNSIDE Philip, 1985, "Agriculture in Amazonia", in: G.T. Prance and T.E. Lovejoy (eds.), *Key Environments: Amazonia*, Pergamon Press, Oxford, U.K., 393-418
- FITTKAU E.J., 1973, "Arten mannigfältigkeit amazonischer Lebensräume aus ökologischer Sicht", *Amazoniana*, 4: 321-340
- FRASER Dawn & KÆRN Mads, 2009, "A chance at survival: gene expression noise and phenotypic diversification strategies", *Molecular Microbiology*, 71(6), 1333-1340
- FRINK Charles R., 1973, "Aluminium chemistry in acid sulfate soils", in: H. DOST (ed), *Acid sulphate soils*, Int. Institute for land reclamation and improvement, Wageningen, The Netherlands, 131-168
- FUJII Kazumichi, FUNAKAWA Shinya and KOSAKI Takashi; 2012: "Soil Acidification: Natural Processes and Human Impact", *Pedologist*, 415-425
- FUSTEL DE COULANGES Numa Denis, 1885, *La Cité antique*, Paris, Hachette
- GARCIA Jean-Louis & ROGER Pierre Armand, 2000, *Le cycle du soufre*, Laboratoire de microbiologie IRD, CESB-ESIL Marseille-Luminy
- GARRITY D.P., SOEKARDI M., VAN NOORDWIJK M., DE LA CRUZ R., PATHAK P.S., GUNASENA H.P.M., VAN SO N. & HUIJUN G. MAJID N.M., 1997, "The Imperata grasslands of tropical Asia: area, distribution and typology", *Agroforestry Systems*, 36, 3-29
- GASCUEL-ODOUX Chantal & MAGDA Danièle, 2015, "Gérer les paysages et les territoires pour la transition agroécologique", *Innovations Agronomiques*, 43, 95-106
- GILLET Pauline, CODINA LLAVINA Elisabet, YAMBENE Henri et VERMEULEN Cédric, 2016: "Comment les villageois nomment-ils et s'approprient-ils leurs espaces ressources ? Description d'un socio-écosystème en pays Yambassa, Cameroun", *Cah. Agric.*, 25, 45006
- GOLDEWIJK Kees Klein, BEUSEN Arthur, DOELMAN Jonathan & STEHFEST Elke, 2017, "Anthropogenic land use estimates for the Holocene – HYDE 3.2", *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 927-953
- GRUBA Piotr & SOCHA Jarosław, 2016, "Effect of parent material on soil acidity and carbon content in soils under silverfir(*Abies alba* Mill.) stands in Poland", *Catena*, 140, 90-95, (RG)
- HAINZELIN Étienne & NOUAILLE Christine, 2013, "La diversité du vivant, moteur du fonctionnement écologique", in: *Cultiver la biodiversité pour transformer l'agriculture*, Versailles, éditions Quæ: 23-54
- HARIDASAN Mundayatan, 1982, "Aluminium accumulation by some cerrado native species of central Brazil", *Plant and Soil*, 65, 265-273
- HARIDASAN Mundayatan; 2008: "Nutritional adaptations of native plants of the cerrado biome in acid soils", *Braz. J. Plant Physiol.*, 20(3), 183-195
- HAYNES R.J. & SWIFT R.S., 1989, "The effects of pH and drying on adsorption of phosphate by aluminium-organic matter associations", *Journal of Soil Science*, 40, 773-781, (RG)

- HUANG Lai-Ming, YANG Jin-Ling, THOMSON Aaron, ROSSITER David G., ZUO Shuang-Miao and ZHANG Gan-Lin; 2014: "Proton production from nitrogen transformation drives stream export of base cations in acid-sensitive forested watersheds", *Ecological Indicators*, 48, 348–357, (RG)
- HUSTON Michael, 1980, "Soil nutrients and tree species richness in Costa Rican forests", *J. Biogeogr.*, 7: 147-157
- HUTCHINSON George Evelyn, 1957, "Concluding remarks", *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, 2, 415–427
- JAMONEAU Aurélien, 2010, *Relations entre les diversités  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  de la flore vasculaire de fragments forestiers inclus dans des paysages agricoles contrastés*, Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne, Amiens, France, (RG)
- JANIN Rémi, 2015, "Agriculture, la révolution urbaine", *Openfield*, numéro 4, <https://www.revue-openfield.net/2014/11/26/agriculture-la-revolution-urbaine/>
- JANITZKY P & WHITTIG L D ,1964, "Mechanisms of formation of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> in soils. II. Laboratory study of biogenesis", *Soil Sci.*, 15, 145-157
- JOLIVET Claudy, AUGUSTO Laurent, TRICHET Pierre et ARROUAYS Dominique, 2007, "Les sols du massif forestier des Landes de Gascogne: formation, histoire, propriétés et variabilité spatiale", *Revue forestière française (RFF)*, 1, 7-30
- JOUBE Philippe; 2016: *L'agronome et les systèmes. Approche systémique de l'exploitation agricole des zones tropicales et méditerranéennes*, St Ouen, Les éditions du net, 152 p.
- JUSTE Christian, TAUZIN Jean, DUREAU Paulette, COURPRON Claude, 1982, "Exportation des éléments fertilisants par lessivage en sol sableux des Landes de Gascogne. Résultats de 8 années d'observations en cases lysimétriques", *Agronomie*, EDP Sciences, 2 (1), 91-98
- KALAORA Bernard, 2001, "À la conquête de la pleine nature", *Ethnologie française*, vol. XXXI, no 4, 2001, 591-597
- KAPLAN Jed O., KRUMHARDT Kristen M. & ZIMMERMANN Niklaus, 2009, "The prehistoric and preindustrial deforestation of Europe", *Quaternary Science Reviews*, 28, 3016–3034
- KAMPRATH E.J., 1967, "Soil acidity and response to liming", *International soil testing series - rech. bull. 4*, North Carolina state univ. exp. sta. Raleigh
- KAWANO Motoharu & TOMITA Katsutoshi, 1994, "Growth of smectite from leached layer during experimental alteration of Albite", *Clays and Clay Minerals*, 42, 1, 7-17.
- KAWANO Motoharu & TOMITA Katsutoshi, 1996, "Amorphous Aluminium hydroxide formed at the earliest weathering stages of K-Feldspar", *Clays and Clay Minerals*, 44, 5, 672-676.
- KOCHIAN Leon V., PINEROS Miguel A. & HOEKENGA Owen A., 2005, "The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity", *Plant and Soil*, 274, 175–195, (RG)
- KOESTLER Arthur, 1969, "Beyond atomism and holism: the concept of the holon", in: Koestler A. et Smities J.R. (eds), *Beyond reductionism: new perspectives in the life sciences*, London, Hutchinson, 192-216

- KONISHI Shigeki, MIYAMOTO Sobun and TAKI Takayuki, 1985, "Stimulatory effects of Aluminium on tea plants grown under low and high Phosphorus supply", *Soil Sci. Plant Nutr.*, 31 (3), 361-368
- KUPIEC Jean-Jacques et SONIGO Pierre, 2000, *Ni Dieu ni gène - Pour une autre théorie de l'hérédité* -, Pais, Seuil, 229 pp.
- LACAZE Jean-Paul, 1990, *Les méthodes de l'urbanisme*, Paris, PUF, coll. "Que sais-je?", 127 pp.
- LALIBERTÉ Étienne, GRACE James B., HUSTON Michael A., LAMBERS Hans, TESTE François P., TURNER Benjamin L. and WARDLE David A., 2013, "How does pedogenesis drive plant diversity?", *Trends in Ecology & Evolution*, 28, 6: 331-340, doi: 10.1016/j.tree.2013.02.008
- LALLENSACK Rachael, 2018, "How warp-speed evolution is transforming ecology", *Nature*, 554, 19-21
- LAMING Denis, 2015, "La ville", In: *Mondes mosaïques, astres, villes, vivant et robots*, Paris, CNRS Éditions, 59-127
- LANSON B., FERRAGE E., HUBERT F., PRÊT D., MARESCHAL L., TURPAULT M-P. et RANGER J., 2015, "Experimental aluminization of vermiculite interlayers: an X-ray diffraction perspective on crystal chemistry and structural mechanisms", *Geoderma*, 249-250, 28-39, (RG)
- LE MOIGNE Jean-Louis, 2006, *La théorie du système général. Théorie de la modélisation*, Coll. Les classiques du réseau intelligence de la complexité, Publication de l'édition de 1994, Nouvelle présentation 2006, 338 p.
- LE ROY Étienne, 2016, "Des communs à double révolution", *Droit et Société*, 94, 603-624
- LIU H., HECKMAN J.R. & MURPHY J.A., 1997, "Aluminium tolerance among genotypes of *Agrostis* species", *International Turfgrass Society Research Journal*, 8: 729-734
- LOUSTAU Denis, BERT Didier et TRICHET Pierre, (1999), "Fonctionnement primaire et productivité de la forêt landaise: implications pour une gestion durable", *Revue forestière française*, vol. LI, 5, 571-591
- LUNGU Obed and DYNODT Ron, 2008, "Acidification from long-term use of urea and its effect on selected soil properties", *African journal of food agriculture nutrition and development*, 8, 1, 63-76
- MALM Andreas & HORNBERG Alf, 2014, "The Geology of Mankind? A Critique of the Anthropocene Narrative", *The Anthropocene Review*, 1, 1, 62-69
- MARCON Éric, 2015, *Mesures de la Biodiversité*, Master, UMR Écologie des forêts de Guyane, Kourou, France
- MARQUES J.J., TEIXEIRA W.G., SCHULZE D.G. and CURI N., 2002, "Mineralogy of soils with unusually high exchangeable Al from the western Amazon Region", *Clay Minerals*, 37, 651-661
- MARTELLOZO F., LANDRY J-S., PLOUFFE D., SEUFERT V., ROWHANI P. & RAMANKUTTY N., 2014, "Urban agriculture: a global analysis of the space constraint to meet urban vegetable demand", *Environmental Research Letters*, 9, 8 pp, doi:10.1088/1748-9326/9/6/064025, (RG)
- MATIJEVIK E., MATHAI K.G., OTTERWILL R.H. & KERKER M., 1961, "Detection of metal ion hydrolysis by coagulation, III Aluminium", *J. Phys. Chem.*, 65: 826-830

- MAYAUX Philippe, PEKEL Jean-François, DESCLÉE Baudouin, DONNAY François, LOUPI Andrea, ACHARD Frédéric, CLERICI Marco, BODART Catherine, BRINK Andreas, NASI Robert & BELLWARD Alan, 2013, "State and evolution of the African rainforests between 1990 and 2010", *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 368: 20120300
- MAZOYER Marcel & ROUDART Laurence, 2002, *Histoire des agricultures du monde*, Seuil (Points Histoire)
- MERLIN Pierre, 1991, *L'urbanisme*, Paris, PUF, coll. "Que sais-je?", 125 pp.
- MEYER, J.A. et DUPRIEZ G.L., 1959, "Quantité d'azote et d'autres éléments nutritifs apportés au sol par les eaux de pluie au Congo Belge et leur intérêt agronomique", *C.R. 3e conf. Interafricaine des sols*, CCTA.
- MICHON Geneviève, DE FORESTA Hubert & LEVANG Patrice, 1995, "Stratégies agroforestières paysannes et développement durable: les agroforêts à Damar de Sumatra", *Natures, Sciences, Sociétés*, 3,3, 207-223
- MORA Olivier, BANOS Vincent, CARNUS Jean-Michel & REGOLINI Margot (éditeurs), 2012, *Le massif des Landes de Gascogne à l'horizon 2050*, Rapport de l'étude prospective, Conseil régional d'Aquitaine-INRA, 290 p.
- MORA-URPI Jorge, WEBER John C. & CLEMENT Charles R., 1997, *Peach palm. *Bactris gasipaes* Kunth*, Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops, 20, Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/ International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy, 83 pp.
- MOREAU Roland, 1993, "Influence de la mise en culture et de la jachère forestière sur l'évolution des sols forestiers tropicaux", in: Éd. ORSTOM, Anonyme, *La Jachère en Afrique de l'Ouest*, 245-256
- MORENO-ALVARADO Marcos, GARCIA-MORALES Soledad, TREJO-TÉLLEZ Libia Iris, HIDALGO-CONTRERAS Juan Valente & GOMEZ-MERINO Fernando Carlos, 2017, "Aluminum enhances growth and sugar concentration, alters macronutrient status and regulates the expression of NAC transcription factors in rice", *Frontiers in Plant Science*, vol. 8, article 73
- MOSS Michael R., 2000, "Landscape ecology: the need for a discipline?", *Problemy Ekologii Krajobrazu*, 6: 174-187
- MOUGENOT Bernard, ZANTE Patrick & MONTOROL Jean-Pierre, 1990, "Détection et évolution saisonnière des sols salés et acidifiés du domaine fluvio-marin de basse Casamance au Sénégal, par imagerie satellitaire", In : Lafrance P. (ed.), Dubois J.M. (ed.), *Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse*, Montrouge, J. Libbey Eurotext: 173-179
- MUGICA Julie, MALLET Cyril et HENNEQUIN Vincent, 2008, *Étude de l'évolution géomorphologique récente de la côte sableuse aquitaine*, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (service géologique national français), BRGM/RP-56874-FR, 165 p.
- MUTERT E.; 1999: "Suitability of Soils for Oil Palm in Southeast Asia", *Better Crops International*, 13, 1: 36-38
- MWORIA John K., 2011, "Invasive Plant Species and Biomass Production", In: *Savannas, Biomass and Remote Sensing of Biomass*, Dr. Islam Atazadeh (Ed.), InTech, 35-56
- NEKOLA Jeffrey C., ALLEN Craig D., BROWN James H., BURGER Joseph R., DAVIDSON Ana D., FRISTOE Trevor S., HAMILTON Marcus J., HAMMOND Sean T., KODRIC-BROWN Astrid, MERCADO-SILVA Norman & OKIE Jordan G., 2013, "The Malthusian-Darwinian dynamic and

the trajectory of civilization", *Trends in Ecology & Evolution*, 28, 3: 127-130, (RG)

NELSON Paul, RHEBERGEN Tiemen, BERTHELSEN Suzanne, WEBB Michael, BANABAS Murom, OBERTHÜR Thomas, DONOUGH Chris, RAHMADSYAH, INDRASUARA Kooseni & LUBIS Ahmad, 2011, "Soil acidification under oil palm: rates and effects on yield", *Better crops*, 95, 4, 22-25

NICHOLAIDES J.J., BANDY D.E., SANCHEZ P.A., BENITES J.R., VILLACHICA J.H., COUTU A.J. & VALVERDE C.S., 1985, "Agricultural alternatives for the Amazon Basin", *BioScience*, 35, 279-285

OPDECAMP Luc, 1988a, *Étude de la toxicité aluminomanganesique des sols d'altitude du Burundi*, Rapport scientifique final du contrat de recherche TSD-A-411- RU(MR) entre l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU) et la Commission des Communautés Européennes (CCE), 123 pp.

OPDECAMP Luc, MUSONI Innocent & GOURDIN Jacques, 1988, "Effets stimulants et toxiques de l'aluminium sur la croissance des plantes cultivées dans les sols humifères acides du Burundi", *Publication ISABU*, n° 129, 1-26, (RG)

OPDECAMP Luc, GOURDIN Jacques & OTOUL Christian, 1990, "Exploitation vivrière et fourragère des sols alliques d'altitude du Burundi", *Publication ISABU*, n° 145, 1-42, (RG)

OPDECAMP Luc, 1997, *Discussion d'un modèle et de paramètres écologiques et économiques pour la gestion de l'écosphère tropicale humide*, Alterthèses asbl, 38 pp, (RG)

OPDECAMP Luc, 1998, *Discussion thermodynamique des relations entre la pédogenèse acide, la biodiversité et les systèmes agraires dans l'écosphère tropicale humide*, Alterthèses asbl, 30 pp, (RG)

OPDECAMP Luc, 2015, *Les agropédosystèmes dans l'agropédopaysage*, 11 pp, (RG)

OSAKI Mitsuru, WATANABE Toshihiro & TADANO Toshiaki, 1997, "Beneficial effect of aluminum on growth of plants adapted to low pH soils", *Soil Science and Plant Nutrition*, 43:3, 551-563, (RG)

OSWALD W., 1897, "Studien über die Bildung und Umwandlung fester Körper", *Z. Phys. Chem.*, 22, 289-330

OXMAN Neri, 2016, "Age of entanglement, an inaugural essay for the Journal of Design of Science, *JoDS*, en ligne, <<http://jods.mitpress.mit.edu/pub/AgeOfEntanglement>>

PAPY Louis, 1977: "Les Landes de Gascogne: la maîtrise de l'eau dans la lande humide", in: *Norais*, n° 95 ter, Novembre 1977, *Géographie rurale*. pp. 199-210

PAVAN Marcos A., BINGHAM F.T. & PRATT P.F., 1982, "Toxicity of aluminium to coffee in ultisols and oxisols amended with CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub> and CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 1201-1207

PELTZER Duane A., WARDLE David A., ALLISON Victoria J., BAISDEN W. Troy, BARDGETT Richard D., CHADWICK Oliver A. et al., 2010, "Understanding ecosystem retrogression", *Ecological Monographs*, 80,4, 509-529, (RG)

PÉREZ-SANDOVAL Reyna, GOMEZ-GUERRERO Armando, FIERROS-GONZALEZ Aurelio & HORWATH William R., 2012, "Site productivity of clone and seed raised plantations of *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis* in Southeast Mexico", *Open Journal of Forestry*, 2, 4, 225-231

- PIRARD Romain, DAL SECCO Lise & WARMAN Russell, 2016, "Do timber plantations contribute to forest conservation?", *Environmental Science & Policy*, 57, 122–130
- POOZESH Vahid, 2007, *Réponse des graminées des prairies permanentes à l'acidité, à l'aluminium et à la fertilisation (N, P): relations avec les traits fonctionnels*, Thèse de Doctorat à l'Institut national polytechnique de Toulouse, 138 pp., (RG)
- POTTIER Aude, 2010, "Les ambiguïtés du paysage forestier des Landes de Gascogne", *Projets de Paysages* [En ligne ]
- POUX Xavier, NARCY J.-B. et RAMAIN Blandine, 2009a, "Le saltus: un concept historique pour mieux penser aujourd'hui les relations entre agriculture et diversité", *Courrier de l'environnement de l'INRA*, n° 57, 23-34.
- POUX Xavier, NARCY J.-B. et RAMAIN Blandine, 2009b, "Réinvestir le saltus dans la pensée agronomique moderne: vers un nouveau front eco-politique?", *L'Espace Politique*, Revue en ligne de géographie politique et de géopolitique, 9,3
- PREISER Rika, PEREIRA Laura M. & BIGGS Reinette (Oonise), 2017, "Navigating alternative framings of human-environment interactions: variations on the theme of 'Finding Nemo'", *Anthropocene*, 20, 83–87
- PROCTOR J., ANDERSON J.M., CHAI P. & H.W. VALLACK, 1983, "Ecological studies in four contrasting rain forests in Gunung Mulu National Park, Sarawak. I. Forest environment: structure and floristics", *J. Ecol.*, 71: 237-260
- RAYMOND Richard, LUGINBÜHL Yves, SEGUIN Jean-François, CEDELLE Quentin et GRARE Hélène, 2015, *Les atlas du paysage. Méthode pour l'identification, la caractérisation et la qualification des paysages*, République française, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie
- REINECKE J., WULF M., BAETEN L., BRUNET J., DECOCQ G., DE FRENNE P., DIEKMANN M., GRAAE B.J., HEINKEN T., HERMY M., JAMONEAU A., LENOIR J., PLUE J., ORCZEWSKA A., VAN CALSTER H., VERHEYEN K. & NAAF T., 2016, "Acido-and neutrophilic temperate forest plants display distinct shifts in ecological pH niche across north-western Europe", *Ecography*, 39 (12): 1164-1175, (RG)
- RICHARDS, P.W., 1996, *The tropical rain forest*, second edition, Cambridge university press, 575 p.
- RICHARDSON Sarah J., PELTZER Duane A., ALLEN Robert B., McGLONE Matt S. & PARFITT Roger L., 2004, "Rapid development of phosphorus limitation in temperate rainforest along the Franz Josef soil chronosequence", *Oecologia*, 139, 267–276
- RICHBURG J.S. & ADAMS F., 1970, "Solubility and hydrolysis of aluminium in soil solutions and saturated paste extracts", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 34, 728-734
- RIZZO Davide, MARRACCINI Elisa, LARDON Sylvie, DEBOLINI Marta, BENOIT Marc & THENAIL Claudine, 2013, "Farming systems designing landscapes: land management units at the interface between agronomy and geography", *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 113, 2: 71-86
- ROBARGE W.P. & COREY R.B., 1979, "Adsorption of phosphate hydroxy-aluminium species on a cation exchange resin", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43, 481-487

ROBERTS Patrick, HUNT Chris, ARROYO-KALIN Manuel, EVANS Damian & BOIVIN Nicole, 2017, "The deep human prehistory of global tropical forests and its relevance for modern conservation", *Nature plants*, 3, art. 17093, (RG)

ROGER Alain, 1997, *Court traité du paysage*, Gallimard, essais folio, 249 pp.

ROSSI Georges, 2000, *L'ingérence écologique. Environnement et développement rural du Nord et du Sud*, Paris, CNRS éditions

RUF François, 2011, "The myth of complex cocoa agroforests: the case of Ghana", *Human Ecology*, 39, 373–388, (RG)

SALJNIKOV Elmiré & CAKMAK Dragman, 2011, "Phosphorus: Chemism and Interactions", in: *Principles, application and assessment in soil science*, Dr. Burcu E. Ozkaraova Gungor (Ed.), InTech

SAMPOUX JP., 2006, *. Étude des déterminants environnementaux de la structuration spatiale de la diversité spontanée inter et intra spécifique des fétuques à feuilles fines*, 6ème Colloque National des Ressources Génétiques, La Rochelle (2006)

SANCHEZ Pedro A., BANDY D.E., VILLACHICA J.H. & NICHOLAIDES J.J., 1982, "Amazon Basin soils: Management for continuous crop production", *Science*, 216, 821-827

SANCHEZ Pedro A., VILLACHICA J.H. & BANDY D.E., 1983, "Soil fertility dynamics after clearing a tropical rainforest in Peru", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 1171-1178

SANCHEZ Pedro A., PALM Cheryl A. and BUOL Stanley W., 2003; "Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics", *Geoderma*, 114, 157–185

SASAKI T., YAMAMOTO Y., EZAKI B., KATSUHARA M., AHN S. J., RYAN P. R. et al., 2004, "A wheat gene encoding an aluminum-activated malate transporter", *Plant J.*, 37, 645–653. doi: 10.1111/j.1365-313X.2003.01991.x

SCHNEIDER A., FRIEDL M. A., MCIVER D. K. & WOODCOCK C. E., 2003, "Mapping urban areas by fusing multiple sources of coarse resolution remotely sensed data", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69, 1377–1386

SCHNEIDER Annemarie, FRIEDL Mark A. & POTERE David, 2010, "Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: new methods and datasets based on urban ecoregions", *Remote Sensing of Environment*, 114, 1733–1746

SCHWARTZ Dominique, 1997, "Forêts et savanes d'Afrique centrale: une histoire holocène mouvementée", *Lettre n°6 du Programme International Géosphère Biosphère-Programme Mondial de Recherches sur le Climat*, CNRS, France, 14-22

SCHROTH Götz, SEIXAS Rosangela, DA SILVA L.F., TEIXEIRA W.G. & ZECH W., 2000, "Nutrient concentrations and acidity in ferralitic soil under perennial cropping, fallow and primary forest in central Amazonia", *European Journal of Soil Science*, 51(2), 219-231, (RG)

SCHROTH Götz, GARCIA Edenise, GRISCOM Bronson Winthrop, TEIXEIRA Wenceslau Gerales and BARROS Lucyana Pereira, 2016; "Commodity production as restoration driver in the Brazilian Amazon? Pasture re-agro-forestation with cocoa (*Theobroma cacao*) in southern Para", *Sustain Sci*, 11:277–293, doi 10.1007/s11625-015-0330-8

SCHWARTZ Dominique, 1997, "Forêts et savanes d'Afrique centrale : une histoire holocène mouvementée", In: *Lettre n°6 du Programme International Géosphère Biosphère-Programme Mondial de Recherches sur le Climat*, CNRS, France

SHAMSHUDDIN Jusop, PARAMANANTHAN S. & MOKHTAR Nik, 1986, "Mineralogy and surface charge properties of two acid sulfate soils from peninsular Malaysia", *Pertanika*, 9(2),167-176, (RG)

SHAMSHUDDIN Jusop, MUHRIZAL Sarwani, FAUZIAH Ishak & VAN RANST Eric, 2004, "A laboratory study of pyrite oxidation in acid sulfate soils", *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35 (1 & 2), 117-129, (RG)

SILVA I.R., NOVAIS R.F., JHAM G. N., BARROS N. F., GEBRIM F. O., NUNES F. N., NEVES J. C. L. & LEITE F. P., 2004, "Responses of eucalypt species to aluminum: the possible involvement of low molecular weight organic acids in the Al tolerance mechanism", *Tree Physiology*, 24, 1267-1277

SILVERTOWN Jonathan, POULTON Paul, JOHNSTON Edward, EDWARDS Grant, HEARD Matthew & BISS Pamela M, 2006, "The Park Grass Experiment 1856-2006: its contribution to ecology", *Journal of Ecology*, 94, 801-814

SINGH J.S. and GUPTA S.R.;,1977, "Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems", *The botanical review*, 43, 4, 449-528.

SIVASUBRAMANIAM S. & TALIBUDEEN O.; 1971: "Effect of aluminium on growth of tea (*Camelia sinensis*) and its uptake of potassium and phosphorus", *Tea Q.*, 43, 4-13

SMIT Jac, NASR Joe & RATTA Annu, 2001, "Urban agriculture yesterday and today", In: *Urban agriculture: food jobs and sustainable cities*, The urban agriculture network (second edition with permission of UNDP)

SNAYDON R.W., 1970, "Rapid population differentiation in a mosaic environment. I Response of *Anthoxanthum odoratum* L. to soils", *Evolution*, 24, 257-269

SOIL SURVEY STAFF, 2014, Keys to soil taxonomy, Twelfth edition, United States Department of Agriculture, National Resources Conservation Service

SOTTIAUX Guy, OPDECAMP Luc, BIGURA Célestin et FRANKART Raymond, 1998, *Carte des sols du Burundi - échelle 1/250.000<sup>e</sup> - Notice explicative*, AGCD (Administration générale de la coopération au développement), Publication du service agricole n° 9, 142 p.

SOW Mamadou, 2003, "Innovations en aménagement des sols de mangrove pour la riziculture: Partie 1 - Cas du périmètre de Yangoyah (Guinée)", *Étude et Gestion des Sols*, 10, 2, 95-106,

SOW Mamadou et BARRY M.B., 2003, "Innovations en aménagement des sols de mangrove pour la riziculture, Partie 2 - Résultats agronomiques", *Étude et Gestion des Sols*, 10, 2, 107-119

SUING Guillaume, 2016, *ÉVOLUTION: La preuve par MARX - Dépasser la légende noire de Lyssenko*, Paris, Éditions Delga

TANG VAN HAI, TRUONG THI NA & LAUDELOUT Henri, 1989, "Effect of aluminium on the mineral nutrition of rice", *Plant and Soil*, 114 (2), 173-185

THIERRON V. and LAUDELOUT H., 1996, "Contribution of root respiration to total CO<sub>2</sub> efflux from the soil of a deciduous forest", *Can. J. For. Res.*, 26,: 1142-1148

- TOLRA Roser, VOGEL-MIKUS Katarina,HAJIBOLAND Roghieh,KUMP Peter, PONGRAC Paula, KAULICH Burkhard, GIANONCELLI Alessandra, BABIN Vladimir, BARCELO Juan, REGVAR Marjana & POSCHENRIEDER Charlotte, 2011, "Localization of aluminium in tea (*Camellia sinensis*) leaves using low energy X-ray fluorescence spectro-microscopy", *Journal of Plant Research*, 124, 1, 165–172, (RG)
- TOURRAND J.F., VEIGA J.B., BURLAMAQUI A.B., POCCARD-CHAPUIS R., PIKETTY M.G., 2006, "L'Amazonie pâturée", *Renc. Rech. Ruminants*, 13, 345-348
- TSAYEM DEMAZE Moïse, 2008, "Quand le développement prime sur l'environnement: la déforestation en Amazonie brésilienne", *Mondes en développement*, 143, 97-116, DOI 10.3917/med.143.0097
- TSUJI Masaki, KUBOI Toru & KONISHI Shigeki, 1994, "Stimulatory effects of aluminum on the growth of cultured roots of tea", *Soil Science and Plant Nutrition*, 40,3: 471-476, DOI: 10.1080/00380768.1994.10413324
- TURNER Benjamin L. & LALIBERTÉ Etienne, 2015, "Soil development and nutrient availability along a 2 million-year coastal dune chronosequence under species-rich mediterranean shrubland in southwestern Australia", *Ecosystems*, 18, 287–309
- VANDERPOOTEN Michel, 2012, *3000 ans de révolution agricole. Techniques et pratiques agricoles de l'Antiquité à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle*, Paris, L'Harmattan
- VAN BREEMEN N., MULDER J. and DRISCOLL C.T., 1983, "Acidification and alkalization of soils", *Plant and Soil*, 75, 283-308
- VAN MIEGROET Helga. and COLE D. W.; 1985: "Acidification sources in Red Alder and Douglas-fir soils -- Importance of nitrification", *Soil Science Society of America Journal*, 49, 1274-1279
- VIDAL Roland, 2011, "Construire des territoires partagés entre la ville et l'agriculture", in: Conseil Régional de Bretagne (Rennes), *Entre ville et campagne, un paysage à inventer*, Coll. "Ateliers techniques du paysage", 13-36.
- VIDAL Roland, 2014, *L'Agriurbanisme - En 40 pages*, Format Kindle, UPPR éditions
- VIENNET Jean-Christophe, 2015, *Minéraux argileux aluminisés des sols : caractérisation structurale par modélisation des diffractogrammes de rayons X et détermination des mécanismes de formation par approche expérimentale*,Thèse de doctorat, Sciences de l'environnement, Université de Poitiers, France, 189 p.
- WANG Jianwu, LUO Shiming & FENG Yuanjiao, 2000, "Aluminum forms in acid sulfate soils", *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11(5), 735-40, (Abstract), (RG)
- WARDLE David A. , WALKER Lawrence R. & BARDGETT Richard D., 2004, "Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences", *Science*, 305, 509-513
- WARDLE David A., BARDGETT Richard D., WALKER Lawrence R., PELTZER Duane A. and LAGERSTRÖM Anna; 2008: "The response of plant diversity to ecosystem retrogression: evidence from contrasting long-term chronosequences", *Oikos*, 117, 93-103, doi: 10.1111/j.2007.0030-1299.16130.x
- WATANABE Toshihiro, JANSEN Steven & OSAKI Mitsuru, 2005, "The beneficial effect of aluminium and the role of citrate in Al accumulation in *Melastoma malabathricum*", *New Phytologist*, 165, 773–780

WATANABE Toshihiro, JANSEN Steven & OSAKI Mitsuru, 2006, "Al-Fe interactions and growth enhancement in *Melastoma malabathricum* and *Miscanthus sinensis* dominating acid sulphate soils", *Plant, Cell and Environment*, 29, 2124–2132, (RG)

WATSON James E. M. & VENTER Oscar, 2017, "A global plan for nature conservation", *Nature*, 550, 48-49

WEINSTEIN Steven & PAVLIC Theodore P., 2017, "Noise and function", in: S.I Walker, P.C.W. Davies and G.F.R. Ellis (ed), *From matter to life, information and causality*, Cambridge university press, 174-198

WICKE Birka, SIKKEMA Richard, DORNBURG Veronika and FAAIJ André; 2011, "Exploring land use changes and the role of palm oil production in Indonesia and Malaysia", *Land Use Policy*, 28, 193–206.

WYNS Robert, CORNU Sophie et PROGNON Caroline, 2014, "Régolithe et sol: l'interface entre lithosphère et atmosphère", *Geosciences*, BRGM, 8-15

ZEMUNIK Graham, TURNER Benjamin L., LAMBERS Hans and LALIBERTÉ Etienne; 2016, "Increasing plant species diversity and extreme species turnover accompany declining soil fertility along a long-term chronosequence in a biodiversity hotspot", *Journal of Ecology*, doi: 10.1111/1365-2745.12546