

Le paradigme du piège pédogénétique dans la fertilité des sols latéritiques en région de montagne tropicale humide

(Cas de la localité de Dschang, Ouest Cameroun)

L. L. E. Efen^(1, 2, 3, 4*) et B. M. Michel Mbog⁽¹⁾

1) Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, Université de Dschang, B.P. 67, Dschang, Cameroun

2) Département des Sciences du Sol, Faculté d'Agronomie et des Sciences Agricoles, Université de Dschang, B.P. 222 Dschang, Cameroun

3) Centre de Recherche Agro Alimentation (CRAA), Lubumbashi, République Démocratique du Congo

4) Institut Supérieur d'Études Sociales (ISES), Lubumbashi, R.D. Congo

* Auteur correspondant : lenaickefeno2011@gmail.com

RÉSUMÉ

Cette synthèse conceptuelle analyse la fertilité des sols latéritiques (terme qui englobe ici les ferralsols, la plinthite, les pétroplinthites, ainsi que les matériaux indurés et non indurés) lesquels couvrent plus d'un tiers des zones intertropicales. Ces sols résultent d'une altération supergène intense sous climats chauds et humides, avec accumulation d'oxydes/hydroxydes de fer et d'aluminium, lessivage de la silice et des bases, et formation d'une minéralogie dominée par la kaolinite, la goethite et l'hématite. Ils présentent des contraintes chimiques sévères (acidité, toxicité aluminique, fixation du phosphore, faible capacité d'échange cationique) et physiques (induration, faible profondeur utile). Malgré des contraintes chimiques significatives (acidité, toxicité aluminique, fixation du phosphore, faible CEC) et physiques (induration, faible profondeur), évidentes, les sols latéritiques représentent un paradoxe agronomique majeur en dissimulant un potentiel agricole.

L'originalité de ce travail est de conceptualiser le « Piège Pédogénétique Latéritique », défini comme l'ensemble des contraintes physico-chimiques (héritage kaolinitique-oxydique, acidité, faible pouvoir tampon, fixation du phosphore, toxicité aluminique) et physiques (induration, faible profondeur utile) qui, par leur interaction, maintiennent ces sols dans un état de faible fertilité et réduisent l'efficacité des pratiques correctives conventionnelles à travers l'interaction de trois mécanismes : (a) l'héritage minéralogique et la dynamique acide, qui engendrent des contraintes physicochimiques structurelles ; (b) l'influence de la topographie et des transferts latéraux sur la différenciation spatiale de la fertilité ; (c) les cycles biogéochimiques du couvert

Comment citer cet article :

Efen L. L. E. et Mbog B. M., 2026 -
Le paradigme du piège pédogénétique
dans la fertilité des sols latéritiques en
région de montagne tropicale humide
(cas de la localité de Dschang, Ouest
Cameroun), *Étude et Gestion des Sols*, 33,
175-200

forestier et l'influence du climat tropical de montagne (à tonalité tempérée) et du volcanisme, qui participent à la formation d'un horizon A andique en surface.

L'approche méthodologique combine une analyse critique de la littérature sur les sols latéritiques avec une application à une toposéquence de la localité de Dschang (Ouest Cameroun) à titre illustratif. Elle montre que les solutions conventionnelles (engrais solubles, chaulage isolé) échouent car elles traitent les symptômes sans s'attaquer aux causes minéralogiques et pédogénétiques.

Le caractère paradigmatique de la proposition réside dans le changement de perspective qu'elle impose : passer d'une approche corrective à une gestion systémique des contraintes. Des stratégies de gestion intégrée sont suggérées, combinant amendements organo-minéraux, agroforesterie et gestion de la matière organique. L'application à la région de Dschang illustre la mise en œuvre d'une gestion différenciée adaptée aux spécificités topographiques et pédologiques.

Mots-clés

Latérites, piège pédogénétique, contraintes de fertilité, toposéquence, gestion intégrée des sols, Dschang (Cameroun)

SUMMARY

THE PARADIGM OF THE PEDOGENETIC TRAP IN THE FERTILITY OF LATERITIC SOILS IN HUMID TROPICAL MOUNTAIN REGION (Case of the locality of Dschang, Western Cameroon)

This conceptual synthesis analyzes the fertility of lateritic soils (a term that here encompasses Ferralsols, plinthite, petroplinthite, as well as indurated and non-indurated materials) which cover more than one third of intertropical areas. These soils result from intense supergene weathering under hot and humid climates, with accumulation of iron and aluminum oxides/hydroxides, leaching of silica and bases, and formation of a mineralogy dominated by kaolinite, goethite and hematite. They exhibit severe chemical constraints (acidity, aluminum toxicity, phosphorus fixation, low cation exchange capacity) and physical constraints (induration, shallow effective depth). Despite significant chemical constraints (acidity, aluminum toxicity, phosphorus fixation, low CEC) and physical constraints (induration, shallow depth), lateritic soils represent a major agronomic paradox by concealing an agricultural potential.

The originality of this work is to conceptualize the "Lateritic Pedogenetic Trap", defined as the set of physicochemical constraints (kaolinitic-oxidic inheritance, acidity, low buffering capacity, phosphorus fixation, aluminum toxicity) and physical constraints (induration, shallow effective depth) which, through their interaction, maintain these soils in a state of low fertility and reduce the effectiveness of conventional corrective practices via the interplay of three mechanisms: (a) mineralogical inheritance and acidic dynamics, which generate structural physicochemical constraints; (b) the influence of topography and lateral transfers on the spatial differentiation of fertility; (c) the biogeochemical cycles of the forest cover and the influence of the tropical mountain climate (with temperate overtones) and volcanism, which contribute to the formation of an andic A horizon at the surface.

The methodological approach combines a critical review of the literature on lateritic soils with an application to a toposequence in the Dschang region (Western Cameroon) for illustrative purposes. It shows that conventional solutions (soluble fertilizers, liming alone) fail because they treat the symptoms without addressing the mineralogical and pedogenetic causes.

The paradigmatic nature of the proposal lies in the shift in perspective it imposes: moving from a corrective approach to systemic constraint management. Integrated management strategies are suggested, combining organo-mineral amendments, agroforestry and organic matter management. The application to the Dschang region illustrates the implementation of differentiated management adapted to topographical and pedological specificities.

Key-words

Laterites, pedogenetic trap, fertility constraints, toposequence, integrated soil management, Dschang (Cameroon)

RESUMEN

EL PARADIGMA DE LA TRAMPA PEDOGENÉTICA EN LA FERTILIDAD DE SUELOS LATERÍTICOS EN REGIÓN DE MONTAÑA TROPICAL HÚMEDA (Caso de la localidad de Dschang, Oeste de Camerún)

Esta síntesis conceptual analiza la fertilidad de los suelos lateríticos (término que aquí engloba los Ferralsoles, la plintita, las petroplintitas, así como los materiales endurecidos y no endurecidos) los cuales cubren más de un tercio de las zonas intertropicales. Estos suelos son el resultado de una intensa alteración supergénica bajo climas cálidos y húmedos, con acumulación de óxidos/hidróxidos de hierro y aluminio, lavado de sílice y bases, y formación de una mineralogía dominada por caolinita, goethita y hematita. Presentan severas limitaciones químicas (acidez, toxicidad por aluminio, fijación de fósforo, baja capacidad de intercambio catiónico) y físicas (endurecimiento, escasa profundidad útil). A pesar de limitaciones químicas significativas (acidez, toxicidad por aluminio, fijación de fósforo, baja CIC) y físicas (endurecimiento, escasa profundidad), los suelos lateríticos representan una paradoja agronómica mayor al ocultar un potencial agrícola.

La originalidad de este trabajo consiste en conceptualizar la «Trampa Pedogenética Laterítica», definida como el conjunto de limitaciones fisicoquímicas (herencia caolínico-oxídica, acidez, bajo poder tampón, fijación de fósforo, toxicidad por aluminio) y físicas (endurecimiento, escasa profundidad útil) que, mediante su interacción, mantienen estos suelos en un estado de baja fertilidad y reducen la eficacia de las prácticas correctivas convencionales a través de la interacción de tres mecanismos: (a) la herencia mineralógica y la dinámica ácida, que generan limitaciones fisicoquímicas estructurales; (b) la influencia de la topografía y los transferencias laterales en la diferenciación espacial de la fertilidad; (c) los ciclos biogeoquímicos de la cubierta forestal y la influencia del clima tropical de montaña (con matices templados) y del vulcanismo, que contribuyen a formar un horizonte A ándico en superficie.

El enfoque metodológico combina una revisión crítica de la literatura sobre suelos lateríticos con una aplicación a una toposecuencia de la región de Dschang (Oeste de Camerún) a título ilustrativo. Muestra que las soluciones convencionales (fertilizantes solubles, enclavado aislado) fracasan porque tratan los síntomas sin abordar las causas mineralógicas y pedogenéticas.

El carácter paradigmático de la propuesta reside en el cambio de perspectiva que impone: pasar de un enfoque correctivo a una gestión sistémica de las limitaciones. Se sugieren estrategias de manejo integrado, combinando enmiendas órgano-minerales, agroforestería y gestión de la materia orgánica. La aplicación a la región de Dschang ilustra la implementación de un manejo diferenciado adaptado a las especificidades topográficas y edafológicas.

Palabras clave

Lateritas, trampa pedogenética, imitaciones de fertilidad, toposecuencia, manejo integrado de suelos, Dschang (Camerún)

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte et justification : le défi des sols latéritiques

Dans le paradigme du piège pédogénétique latéritique, les sols latéritiques — terme qui englobe ici les ferralsols, la plinthite, les pétroplinthites ainsi que les matériaux indurés et non indurés ne sont pas considérés comme des sols « stériles » par essence, mais comme des systèmes pédologiques verrouillés par l'interaction de contraintes physico-chimiques héritées et actives. Couvrant plus d'un tiers des surfaces intertropicales (Duchaufour, 2001 ; FAO, 2006), ils incarnent un paradoxe agronomique majeur : bien qu'ils présentent des contraintes sévères (acidité, toxicité aluminique, fixation du phosphore, faible capacité d'échange cationique, induration, faible profondeur utile), ils supportent néanmoins une part importante de l'agriculture vivrière et de la sécurité alimentaire dans les régions tropicales, du fait de leur vaste répartition (Sanchez, 2019 ; Driessen et Deckers, 2001). Ce paradoxe est l'une des manifestations du piège pédogénétique : ces sols ne sont ni totalement improductifs, ni faciles à améliorer par les pratiques conventionnelles.

Certaines terres latéritiques restent sous-utilisées, principalement en raison d'une perception de marginalité liée à des difficultés agronomiques plutôt qu'à une absence totale d'activité agricole (Amorim *et al.*, 2017). À l'inverse, de nombreux sols latéritiques sont cultivés de manière continue, mais les rendements y restent faibles, pénalisés par des pratiques inadaptées et un déficit en technologies appropriées. Pour dépasser le stade expérimental et transformer durablement

ces terres en paysages agricoles productifs, une approche coordonnée associant chercheurs, agriculteurs et décideurs est toutefois essentielle (Wei *et al.*, 2025). Cette transition vers des technologies durables suppose de reconnaître l'existence du piège pédogénétique. Il convient cependant de souligner que la perception de marginalité, si elle persiste, risque d'entretenir une négligence à l'égard de ces sols, en dépit de leur potentiel avéré pour la sécurité alimentaire et la durabilité environnementale.

Avant d'aborder un cas particulier, il convient de préciser les principaux paradoxes liés à ces sols à la lumière du paradigme :

- Les sols latéritiques sont à la fois chimiquement pauvres (faible rétention des nutriments, carences en azote et en phosphore) et physiquement contraignants (induration). La prédominance de kaolinite et d'oxydes de fer entraîne une fixation rapide des nutriments appliqués, rendant les engrais conventionnels inefficaces (Sanchez et Buol, 1975 ; Smithson et Sanchez, 2001). Plus de 40 % des sols tropicaux sont affectés par l'infertilité acide (Smithson et Giller, 2002). Malgré ces contraintes, ils constituent l'essentiel du potentiel agricole de vastes régions intertropicales, du fait de leur vaste répartition et montrent une résilience face aux changements climatiques, ce qui peut être exploité pour une agriculture durable (Pal, 2016). C'est précisément cette dualité (contraintes majeures mais étendue considérable) qui définit le piège pédogénétique.
- Les approches conventionnelles de fertilisation (engrais solubles, chaulage isolé) échouent fréquemment, non parce que les sols seraient « stériles », mais parce que leur minéralogie spécifique (dominance de kaolinite et d'oxydes de fer et d'aluminium) neutralise rapidement les intrants classiques. Cet échec n'est pas accidentel : il est la

conséquence directe du piège, qui maintient le système dans un état de faible fertilité malgré des apports extérieurs, tant que l'on ne s'attaque pas simultanément à l'ensemble des verrous (acidité, fixation du P, faible CEC, toxicité Al).

La vision traditionnelle de ces sols, considérés comme stériles (Maignien, 1958 ; Boyer, 1982), est désormais dépassée. Leur matrice minérale unique, dominée par la kaolinite et les oxydes de fer et d'aluminium (Muñoz *et al.*, 2022 ; Wisawapipat *et al.*, 2010), génère certes des contraintes majeures, mais ces contraintes ne signifient pas une impossibilité absolue de production. Des solutions existent : le chaulage peut réduire la toxicité de l'aluminium et la fixation du phosphore, tout en améliorant la capacité d'échange cationique (Wisawapipat *et al.*, 2010 ; Prasetyo *et al.*, 2016). L'ajout de matière organique et d'engrais appropriés est également recommandé pour améliorer la fertilité et maintenir la productivité (Prasetyo *et al.*, 2016 ; Zannah *et al.*, 2016). En outre, la prévention de l'érosion est cruciale pour maintenir la structure du sol et empêcher l'exposition de la plinthe, qui peut durcir de façon irréversible (Muñoz *et al.*, 2022). C'est précisément cette dualité des sols contraignants mais néanmoins cultivables qui fonde la nécessité d'un nouveau paradigme de gestion : non plus centré sur la recherche d'un « potentiel latent » non démontré, mais sur une compréhension systémique du piège pédogénétique et sur des pratiques adaptées à chacun de ses verrous. Ce paradigme s'applique particulièrement aux régions de montagne tropicale humide, où l'altitude et les fortes précipitations accentuent l'acidification, le lessivage et l'induration.

1.2. Énoncé du problème : le piège pédogénétique latéritique

La problématique centrale de cette synthèse bibliographique (et non d'une étude de cas expérimentale) gravite autour du concept de « Piège Pédogénétique Latéritique ». Par cette expression, nous désignons l'ensemble des contraintes physico-chimiques et physiques héritées de la pédogenèse qui, par leurs interactions, maintiennent les sols latéritiques dans un état de faible fertilité et réduisent l'efficacité des pratiques correctives conventionnelles (définition explicitée dans le résumé et reprise ici).

Ce piège fonctionne par l'interaction de trois mécanismes interdépendants qui s'articulent spécifiquement dans les régions de montagne tropicale humide :

1. **L'héritage minéralogique (kaolinite, goethite, hématite) et la dynamique acide**, à l'origine de contraintes physico-chimiques structurelles (Sanchez, 2019 ; Bridges et Batjes, 1996). Dans ces régions, l'altération intense sous climat chaud et humide génère une minéralogie dominée par des phases cristallisées à faible activité chimique, responsable de l'acidité persistante, de la faible capacité d'échange cationique et de la forte fixation du phosphore.

2. **L'influence de la topographie et des transferts latéraux sur la différenciation spatiale de la fertilité** (Boulet, 1978a, 1978b ; Beauvais et Colin, 1993). En milieu montagnard, les pentes abruptes accentuent le ruissellement, l'érosion différentielle et la redistribution des matériaux, créant une mosaïque de sols allant des sommets cuirassés (bloqués physiquement) aux bas-fonds colluviaux (moins contraignants mais toujours soumis aux verrous chimiques). Cette topographie agit comme un multiplicateur du piège.

3. **Les cycles biogéochimiques – notamment la dynamique de la matière organique** sous couvert forestier, l'activité des racines et des micro-organismes – qui, dans les contextes de montagne tropicale humide, interagissent avec le climat à tonalité tempérée et, localement, avec le volcanisme pour former un horizon A andique en surface. Cet horizon superficiel peut temporairement adsorber certains éléments, mais il ne supprime pas les contraintes héritées en profondeur. Les cycles biogéochimiques peuvent même renforcer le piège en accélérant la minéralisation de la matière organique et la libération d'acides.

Cette triple contrainte (minéralogique, topographique et biogéochimique) constitue ce que nous appelons le « piège pédogénétique latéritique ». Elle explique l'échec systémique des approches de fertilisation conventionnelles (Sanchez, 2019). Les solutions standard (engrais minéraux, chaulage isolé) échouent car elles traitent les symptômes sans s'attaquer aux causes profondes, intrinsèquement liées à la genèse et à l'évolution des sols. Dans les régions de montagne tropicale humide, cet échec est encore plus prononcé en raison de la combinaison d'une forte pluviométrie (lessivage accéléré), de températures modérées (ralentissant certaines transformations) et de pentes fortes (érosion et transferts latéraux). Ainsi, le piège pédogénétique n'est pas une fatalité absolue, mais un verrouillage systémique qui impose une gestion intégrée, simultanée et adaptée à chaque composante (chaulage, matière organique, cultures tolérantes, lutte anti-érosive).

1.3. Objectifs de la synthèse

La présente revue de la littérature a pour objectif de structurer les connaissances existantes sur les contraintes de fertilité des sols latéritiques dans les régions de montagne tropicale humide. Une toposéquence caractéristique d'une telle région (par exemple, celle documentée dans les hauts plateaux d'Afrique centrale) peut être mobilisée à titre d'illustration des concepts discutés, mais cette synthèse ne constitue pas une étude de cas expérimentale. Ce choix permet d'ancrer les mécanismes généraux dans des conditions climatiques et lithologiques (fortes précipitations, altitude, altération intense, différenciation topographique) qui offrent un cadre propice à l'observation des interactions entre héritage pédogénétique, cycles biogéochimiques et contraintes agronomiques.

En cohérence avec la problématique du « piège pédogénétique latéritique » (défini comme l'ensemble des contraintes physico-chimiques et physiques maintenant une faible fertilité par interactions systémiques), les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Caractériser les fondements du piège pédogénétique à travers l'analyse des assemblages minéralogiques (kaolinite, oxydes de Fe et Al) et des processus pédogénétiques le long de toposéquences, en s'appuyant sur la littérature disponible ;
- Identifier et hiérarchiser les contraintes pédogénétiques (fixation du phosphore, toxicité aluminique, faible capacité d'échange cationique, induration, faible pouvoir tampon, faible disponibilité en azote) ainsi que leur variabilité spatiale en fonction de la topographie, du contexte bioclimatique et de l'héritage lithologique ;
- Proposer des pistes de gestion durable fondées sur la compréhension des mécanismes de blocage (chaulage raisonné, apports organiques, pratiques culturales adaptées, lutte anti-érosive), sans préjuger d'un « potentiel latent » non démontré dans les matériaux indurés ou les nodules ferrugineux.

Ces objectifs répondent aux questions de recherche suivantes, formulées dans le cadre du paradigme :

1. Quels sont les mécanismes minéralogiques, topographiques et biogéochimiques qui entretiennent le piège pédogénétique latéritique ?

(Notamment : rôle de la minéralogie kaolinitique-oxydique, de l'acidité structurale, de la fixation du phosphore, de la toxicité de l'aluminium, du faible pouvoir tampon, de l'induration, et de la redistribution latérale des matériaux sur les versants).

2. Comment ces contraintes varient-elles spatialement dans un paysage de montagne tropicale humide ?

(En fonction de la position topographique – sommet cuirassé, versant érodé, bas-fond colluvial – et de la lithologie sous-jacente, sans que jamais aucune configuration ne supprime totalement le piège).

3. Quelles stratégies agronomiques permettent de contourner ou d'atténuer ces contraintes ?

(En ciblant simultanément plusieurs verrous – correction de l'acidité, apports de matière organique, utilisation de cultures tolérantes, gestion de l'eau et de l'érosion – plutôt que des interventions isolées).

Cette synthèse se veut ainsi un cadre conceptuel intégrateur pour comprendre et gérer les sols latéritiques en montagne tropicale humide, en dépassant les approches partielles et en reconnaissant la nature systémique du piège pédogénétique.

2. DÉMARCHÉ MÉTHODOLOGIQUE

La présente étude est une synthèse bibliographique construite dans le cadre du paradigme du piège pédogénétique latéritique. La démarche méthodologique comporte trois étapes.

2.1. Recherche documentaire

Les requêtes ont été conduites dans les bases de données Scopus, Web of Science et Google Scholar. Compte tenu de la largeur du terme « latérite » (qui englobe les ferralsols, oxisols, plinthite, pétroplinthite, matériaux indurés et non indurés), les mots-clés suivants ont été utilisés séparément ou en combinaison selon les besoins : laterite, ferralsol, oxisol. Les processus d'altération et de formation des sols ont été explorés avec *weathering* et *pedogenesis* (deux termes complémentaires et non incompatibles, car l'altération est un processus clé de la pédogenèse). Les contraintes de fertilité ont été abordées à travers des variables spécifiques : phosphorus fixation, aluminum toxicity, ainsi que low CEC, acidity. Enfin, la recherche géographique a été conduite à deux échelles : (i) régionale (Afrique tropicale, Amérique du Sud tropicale, Asie du Sud-Est), (ii) locale (exemples de toposéquences typiques des régions de montagne tropicale humide), sans combiner ces échelles dans une même requête pour éviter les incompatibilités. Aucune localité particulière n'a été privilégiée : l'objectif est de dégager des mécanismes génériques applicables à l'ensemble des régions de montagne tropicale humide.

La recherche a été complétée par l'exploration des bibliographies des articles clés (méthode « en boule de neige ») et par la consultation d'ouvrages fondateurs (monographies, thèses).

2.2. Critères de sélection

Les critères d'inclusion ont privilégié les publications scientifiques (articles de revues, monographies de référence), sans restriction de date initiale afin de couvrir l'évolution historique des concepts (depuis les premières descriptions des latérites jusqu'aux avancées récentes sur les mécanismes de fixation et de toxicité), mais avec une attention particulière aux travaux postérieurs à 1990 qui intègrent les connaissances modernes en minéralogie et en géochimie des sols. Les thèses doctorales ont été consultées pour leur apport détaillé sur des contextes locaux, sans en faire un critère systématique.

2.3. Organisation de l'analyse

Le corpus de références a été organisé autour de quatre thèmes centraux, directement articulés autour du paradigme du piège pédogénétique :

- Généralités sur les latérites : définitions, minéralogie (kaolinite, gibbsite, goethite, hématite, absence de phases amorphes dans les profils très évolués), processus de ferralitisatation et de latéritisation, héritage paléoclimatique.
- Contraintes de fertilité constitutives du piège : fixation du phosphore, toxicité aluminique, faible capacité d'échange cationique (CEC), acidité persistante, faible pouvoir tampon, faible disponibilité en azote, induration et obstacles physiques.
- Facteurs de différenciation spatiale et temporelle du piège : topographie et toposéquences, transferts latéraux (érosion, colluvionnement), lithodépendance, pédogenèse active vs héritage ancien, rôle du climat de montagne tropicale humide (fortes précipitations, température modérée, alternances hydriques).
- Stratégies de gestion adaptées au piège : chaulage raisonné, apports de matière organique, utilisation de cultures tolérantes à l'acidité et à la faible disponibilité du phosphore, lutte anti-érosive, travail du sol limité, et renoncement aux approches basées sur un « potentiel latent » non démontré des nodules ou cuirasses.

Cette organisation permet de répondre à la problématique du piège pédogénétique latéritique sans recourir à la notion non validée de « réservoirs géochimiques dans les nodules » ou de « régénération spontanée par altération des cuirasses ». L'analyse est systématique, comparative et générique, applicable à l'ensemble des régions de montagne tropicale humide.

3. DÉFINITIONS ET ÉVOLUTION CONCEPTUELLE : de la latérite au piège pédogénétique

3.1. Évolution historique et clarification terminologique

Le concept de « latérite », forgé par Buchanan (1807), a une histoire terminologique mouvementée. Dans le cadre du paradigme du piège pédogénétique, il est essentiel de retracer cette évolution car la confusion terminologique a longtemps masqué la nature systémique des contraintes de fertilité. D'abord défini de manière purement morphologique par sa couleur rouge et sa capacité à durcir (Walther, 1989 ; Ségalen, 1993), ce critère visuel, bien qu'utile sur le terrain, s'est avéré réducteur face à la diversité des sols tropicaux (Eswaran *et al.*, 1992). Cette réduction a contribué à une vision simpliste – les latérites comme « sols stériles » – sans comprendre les mécanismes profonds du piège.

Le cadre conceptuel a ensuite évolué vers une compréhension pédogénétique intégrant plusieurs processus qui concourent à la formation des sols latéritiques : ferralitisatation

(désilicification et accumulation de sesquioxydes), plinthitisatation (formation d'un matériau riche en fer pouvant s'indurer), et lessivage des bases. Les classifications modernes (Ferralsols, Oxisols) (Soil Survey Staff, 2014 ; IUSS Working Group WRB, 2022) ont affiné la description, mais le terme générique « latérite » reste utile car il englobe une gamme plus large de matériaux (ferralsols, plinthite, pétroplinthite, cuirasses, horizons indurés ou non). C'est précisément cette diversité qui permet de comprendre le piège pédogénétique : selon le degré d'évolution et la position dans le paysage, les contraintes (fixation du P, toxicité Al, induration) s'expriment différemment, mais aucune configuration ne supprime totalement le piège.

Contrairement à une idée répandue, il n'existe pas d'ambiguïté fondamentale entre géologie et pédologie : la pédologie est une discipline de la géologie de surface. Les deux approches étudient les mêmes objets à des échelles différentes. Dans le paradigme du piège, cette complémentarité est cruciale :

- Pour le géologue, la latérite est considérée comme un matériau hautement altéré riche en oxydes secondaires de fer et d'aluminium, contenant souvent du quartz et de la kaolinite (Eswaran *et al.*, 1990). En outre, une « latérite » désigne une formation d'altération supergène, qui peut être indurée en surface (cuirasse) ou rester meuble en profondeur (Yoboue *et al.*, 2019). La vision restrictive d'une simple « roche indurée » est dépassée. Cette vision géologique met l'accent sur l'héritage – des matériaux formés sur des échelles de temps très longues (millions d'années) – qui constitue la composante stable du piège.
- Pour le pédologue, il s'agit d'un sol issu de l'altération de roches sous climat tropical humide, caractérisé par un cortège minéralogique dominé par les minéraux argileux (kaolinite) et les oxydes/hydroxydes de fer et d'aluminium, mais pouvant également contenir des minéraux primaires résiduels (quartz, etc.), essentiels pour comprendre la fertilité et le développement des sols (Ofem *et al.*, 2023). Cette vision pédologique met l'accent sur les dynamiques actuelles (bioturbation, lessivage, cycles biogéochimiques) qui peuvent moduler l'expression du piège sans le supprimer.

Les signatures géochimiques (appauvrissement en bases, désilicification) sont communes aux deux approches, tandis que les états physiques (induré ou meuble) et les rôles écologiques diffèrent selon la position dans le paysage et le degré d'évolution. Cette distinction est importante pour comprendre le piège pédogénétique tel qu'on le définit : celui-ci résulte de l'interaction entre un héritage géologique (minéralogie kaolinitique-oxydique, induration résiduelle) et des processus pédologiques actuels (acidification, fixation, lessivage, érosion) qui entretiennent un état de faible fertilité. Aucune des deux approches prises isolément ne rend compte de la totalité du piège. C'est leur intégration qui fonde le paradigme proposé.

Ainsi, dans les régions de montagne tropicale humide, la compréhension du piège pédogénétique nécessite de dépasser

les querelles terminologiques passées (latérite vs ferralsol vs oxisol) pour se concentrer sur les mécanismes fonctionnels : héritage minéralogique, contraintes chimiques et physiques, interactions spatiales (toposéquences) et temporelles (paléoclimats vs dynamiques actuelles). Ce paradigme offre un cadre unifié pour diagnostiquer et gérer durablement ces sols.

3.2. Critères chimiques et minéralogiques

Dans le paradigme du piège pédogénétique latéritique, les critères chimiques et minéralogiques ne sont pas de simples descripteurs académiques : ils constituent le fondement matériel des contraintes de fertilité. Pour dépasser les définitions purement morphologiques (celles basées uniquement sur la couleur rouge ou la capacité à durcir), des critères chimiques ont été proposés, qui éclairent directement les mécanismes du piège.

Martin et Doyne (1927) ont établi qu'un sol dont le rapport massique $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est inférieur à 2,0 peut être qualifié de « latéritique », et celui dont le rapport est inférieur à 1,33 constitue une « latérite » vraie. Ce rapport met surtout en évidence l'intensité de la désilicification au cours de la latéritisation ; il est souvent couplé au rapport $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ pour intégrer le rôle du fer. Or, c'est précisément cette désilicification avancée qui engendre la dominance de minéraux à faible activité chimique (kaolinite, gibbsite, oxydes de fer et d'aluminium), responsables de la faible capacité d'échange cationique (CEC), de la forte fixation du phosphore et de l'acidité persistante, trois verrous centraux du piège pédogénétique.

Le fer est un élément crucial des latérites, influençant de manière significative leur formation et leurs caractéristiques (Ahmad et Teh, 2002). Contrairement à ce qu'ont pu écrire Martin et Doyne (1927), le fer est bien un élément essentiel des latérites, même si le rapport alumine-silice reste un bon indicateur de l'avancement de l'altération. Budihal et Pujar (2018) confirment que ce ratio constitue une métrique fiable pour évaluer le degré de latéritisation, indiquant le degré de kaolinisation et d'enrichissement en fer. Au fur et à mesure de l'évolution des latérites, la transition entre des compositions riches en silice et des compositions riches en fer reflète l'altération progressive des matériaux parents. Dans le cadre du piège, un rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ très bas ($< 1,33$) signale une altération extrême, associée à une CEC inférieure à 5 cmol/kg et à une capacité de fixation du phosphore très élevée.

Ces seuils géochimiques matérialisent le continuum d'altération, c'est-à-dire la progression graduelle depuis des sols faiblement altérés (encore riches en bases et en silice) jusqu'aux latérites fortement désilicifiées. Ce continuum correspond à une intensification progressive du piège pédogénétique : plus l'altération est avancée, plus les contraintes chimiques (acidité, toxicité Al, fixation P) sont sévères.

À l'inverse, Fermor (1911) fixait des seuils de 86 % et 90 % de Fe_2O_3 pour définir la latérite, montrant l'importance du fer.

Cette importance tient au processus même de latéritisation : l'accumulation et la précipitation du fer proviennent principalement de sources externes, par le mouvement du fer ferreux dissous qui s'oxyde et précipite sous forme d'oxydes ferriques, contribuant ainsi à la formation de plinthisite et de pierre de fer (Ahmad et Teh, 2002). Or, ces oxydes de fer (goethite, hématite) sont les principaux sites d'adsorption spécifique du phosphore, l'un des verrous majeurs du piège. La présence de fer dans les sols tropicaux joue un rôle crucial dans les processus d'altération, en particulier par le biais des oxydes de fer tels que la goethite. Ces oxydes favorisent la réactivité de surface, ce qui est essentiel pour la rétention des nutriments. Les recherches montrent que les latérites, formées par l'altération chimique intense, contiennent des concentrations élevées d'oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium, bien que les proportions exactes puissent varier selon les études (Herbillion et Nahon, 1988 ; Vilar *et al.*, 2010 ; Acevedo-Sandoval *et al.*, 2004). En outre, certains chercheurs soulignent que la diversité des conditions environnementales et des matériaux parentaux peut influencer la composition des latérites, rendant difficile l'établissement d'un consensus sur les pourcentages exacts d'oxydes de fer et d'aluminium (Ghosh et Guchhait, 2019). Dans le paradigme du piège, c'est moins le pourcentage absolu qui importe que la réactivité de surface de ces oxydes, qui piège les nutriments.

Toutefois, bien que le fer soit vital pour le développement de la latérite (plinthisite, nodules, cuirasses), certains chercheurs, comme Bonifas (1959), estiment que le rapport alumine-silice à lui seul ne saurait rendre pleinement compte de la complexité de la formation latéritique, car d'autres facteurs (conditions climatiques, composition du matériau parental, dynamique hydrique) jouent un rôle tout aussi important. Cette mise en garde est essentielle pour le piège pédogénétique : les seuils chimiques ne sont que des indicateurs ; les mécanismes d'interaction (fixation, toxicité, faible tampon) dépendent aussi de l'organisation spatiale, de l'histoire paléoclimatique et des dynamiques biotiques actuelles.

L'approche moderne, intégrée dans le paradigme du piège, combine donc à la fois : (i) l'assemblage minéralogique caractéristique (dominance de la kaolinite, des oxydes/hydroxydes de fer (goethite, hématite) et des oxydes d'aluminium (gibbsite)) qui impose une faible CEC et une forte fixation du phosphore ; (ii) les processus pédogénétiques qui conduisent à leur formation : ferralitisation (désilicification et accumulation de sesquioxydes), lessivage des bases, et éventuellement induration. Ces processus incluent l'altération chimique, les transferts hydriques, l'activité biologique, etc., et ils entretiennent l'acidité et la toxicité aluminique.

Sur la base de ces critères, on peut formuler une définition combinée de la latérite (terme générique) dans le cadre du piège pédogénétique latéritique :

Une latérite est un matériau d'altération supergène, développé sous climat tropical humide, caractérisé par un

cortège minéralogique dominé par la kaolinite et les oxydes/hydroxydes de fer et d'aluminium, présentant un rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ généralement inférieur à 2 et un rapport $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ faible, résultant d'une forte désilicification, d'un lessivage des bases et d'une accumulation/précipitation de fer (y compris par des apports externes), et pouvant se présenter sous forme meuble (ferralsol, plinthite) ou indurée (pétroplinthite, cuirasse).

Cette combinaison minéralogique et géochimique est le substrat direct du piège pédogénétique : elle engendre et entretient les contraintes de faible CEC, de forte fixation du phosphore, d'acidité, de toxicité aluminique et d'induration. Cette perspective dynamique relie ainsi la composition du sol à son histoire évolutive et aux mécanismes pédogénétiques qui conditionnent son comportement agronomique actuel, en particulier dans les régions de montagne tropicale humide où l'altération est intense et les contraintes topographiques exacerbent le piège.

3.3. Plinthite : un concept clé pour comprendre le piège pédogénétique latéritique

Dans le paradigme du piège pédogénétique latéritique, la notion de plinthite occupe une place centrale car elle matérialise à la fois l'intensité des processus d'altération et l'un des verrous physiques majeurs du piège. La nécessité de clarifier la terminologie a conduit à l'introduction du concept de plinthite (USDA, 1975 ; Eswaran *et al.*, 1990). La plinthite est un matériau pédologique ferrugineux (et non alumineux) qui se forme dans les régions tropicales et subtropicales, souvent sous forme de concentrations redox cimentées rouge foncé dans une matrice grise (Doolittle *et al.*, 2005). Sa formation résulte de l'accumulation d'oxydes de fer dans les climats tropicaux humides, sous l'influence conjuguée de la température, de la roche mère et des régimes d'humidité du sol (Eze *et al.*, 2014). Ce matériau est susceptible de durcir de manière irréversible en pétroplinthite sous l'effet de cycles répétés d'humectation et de dessiccation. Le processus de durcissement est irréversible et produit de la pétroplinthite, qui peut obstruer le drainage et limiter la profondeur d'enracinement (Bockheim, 2014 ; Martins *et al.*, 2018). Dans les régions de montagne tropicale humide, ces cycles d'humectation-dessiccation sont fréquents en raison des alternances saisonnières et des pentes, ce qui accentue la formation de plinthite et son durcissement.

Sa formation est gouvernée par les conditions redox d'une nappe fluctuante : en période humide, le fer est réduit et mobilisé ; en période sèche, il s'oxyde et précipite sous forme d'oxydes/hydroxydes de fer (goethite, hématite). La plinthite sert ainsi d'indicateur des processus pédogénétiques avancés, reflétant l'altération historique et la transformation minérale des sols (Bockheim, 2014). Dans le cadre du piège, la présence de plinthite signale que le sol a subi une forte altération et une

redistribution du fer, deux facteurs qui contribuent à l'acidification, à la faible CEC et à la fixation du phosphore.

3.3.1. Dynamique des nutriments et dualité fonctionnelle dans le piège

Contrairement à certaines hypothèses non validées, les nutriments tels que le calcium, le magnésium et le potassium sont généralement lessivés à partir des sols en plinthite, car le processus de durcissement ne piège pas ces éléments (Bockheim, 2014). L'accumulation d'oxydes de fer modifie principalement les propriétés physiques du sol, entraînant le développement de couches durcies. Cependant, une nuance récente doit être apportée : plusieurs travaux montrent que la plinthite peut constituer une source de nutriments, en particulier de fer et d'aluminium, lesquels sont essentiels à la croissance des plantes (Yoboue *et al.*, 2019). Sa nature dure peut toutefois limiter la pénétration et le drainage des racines, réduisant ainsi la disponibilité effective des nutriments dans le profil du sol (Bockheim, 2014). Ainsi, dans le paradigme du piège, la plinthite présente une dualité fonctionnelle :

- Source potentielle de certains éléments mineurs (Fe, Al) – mais ces éléments ne sont pas les facteurs limitants majeurs dans les sols latéritiques (ce sont plutôt P, N, Ca, Mg, K).
- Barrière physique majeure pour l'accès aux ressources du sol (induration, obstruction du drainage, limitation de l'enracinement).

Aucune preuve solide ne permet en revanche d'affirmer qu'elle constitue un réservoir significatif de nutriments majeurs (Ca, Mg, K). Dans le cadre du piège pédogénétique, la plinthite agit donc essentiellement comme un facteur limitant physique qui renforce les contraintes chimiques en empêchant l'exploitation des horizons sous-jacents et en favorisant le ruissellement.

3.3.2. Rôle dans l'évolution du paysage et expression du piège

Au-delà du seul profil pédologique, la présence de plinthite affecte la morphologie du paysage, influençant les modèles d'érosion et le transport des sédiments, qui sont essentiels pour comprendre l'évolution des sols au fil du temps (Vanwalleghem *et al.*, 2013). Sa formation peut mener au développement d'horizons pédologiques uniques ayant un impact sur l'hydrologie locale et les modèles de végétation (Valentin *et al.*, 1987). Dans les régions de montagne tropicale humide, les plinthites et cuirasses associées se concentrent souvent sur les sommets d'interfluvies et les versants supérieurs, créant des zones de blocage où le piège est maximal. Cette dimension paysagère renforce l'idée que la plinthite n'est pas seulement un obstacle agricole, mais aussi un moteur de la géodiversité tropicale – et un élément constitutif du piège pédogénétique à l'échelle du paysage.

3.3.3. Implications pour l'agriculture et la gestion dans le cadre du piège pédogénétique latéritique

La présence de plinthis limite considérablement la productivité agricole en réduisant les réserves en eau utiles et en compliquant le drainage (Eze *et al.*, 2014 ; Doolittle *et al.*, 2005). L'occurrence de la plinthis à la surface ou à proximité de celle-ci crée des sols superficiels ou incultivables, avec un volume d'enracinement limité, rendant ces environnements marginaux ou impropres à une production agricole durable (Cooper *et al.*, 2020 ; Kumar *et al.*, 2019 ; O'Brien *et al.*, 2019 ; Oluwatosin *et al.*, 2020 ; Pereira-De-Oliveira *et al.*, 2019). Des pratiques de gestion, telles que la rupture mécanique des couches dures et l'utilisation d'amendements inorganiques, peuvent atténuer certains effets négatifs (Martins *et al.*, 2018). Cependant, dans le paradigme du piège, il faut garder à l'esprit que ces interventions mécaniques sont coûteuses et souvent temporaires, car la plinthis a tendance à se reformer ou à s'exposer de nouveau par érosion. Une gestion durable doit privilégier la prévention de l'exposition de la plinthis (par un couvert végétal permanent, un travail du sol limité) plutôt que sa fragmentation systématique (Mukalay *et al.*, 2026). Il est donc essentiel de comprendre ces dynamiques – à la fois bénéfiques (apport de Fe/Al, rôle dans l'évolution du paysage) et limitantes (induration, drainage, encombrement racinaire) – pour mettre en place des stratégies de gestion des terres efficaces. La plinthis, bien que présentant des défis pour l'agriculture en raison de sa formation de plaques dures, joue également un rôle important dans la formation des sols et l'évolution du paysage, ce qui indique des interactions complexes entre les propriétés du sol et les conditions environnementales, en particulier dans les régions tropicales.

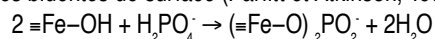
3.3.4. L'échec des approches conventionnelles : un verrou pédogénétique latéritique

L'échec des approches conventionnelles n'est pas dû à une mauvaise dose ou à un mauvais timing, mais à une incompatibilité fondamentale entre ces pratiques et la nature du verrou pédogénétique. Les engrais solubles traitent la carence (symptôme) sans s'attaquer au piégeage ; le chaulage traite l'acidité sans modifier la matrice ; le labour fragmente sans dissoudre. Ces pratiques sont symptomatiques d'une agriculture « corrective » qui ajoute ce qui manque, alors que le sol possède des réserves mais les maintient verrouillées. Cette analyse rejoint les conclusions de Sanchez (2019) et de Quantin et Becquer (2025) qui appellent à un changement de paradigme vers une gestion par activation des réservoirs internes.

3.3.4.1. Limites des pratiques conventionnelles

Inefficacité du chaulage : Bien que le chaulage puisse neutraliser l'acidité du sol, il ne modifie pas la matrice du sol et n'améliore pas la disponibilité des nutriments à long terme (Regasa *et al.*, 2025 ; Hue, 2022). En effet, le chaulage (apport de CaCO_3 ou de chaux) est une pratique courante pour atténuer l'acidité, mais son efficacité sur sols latéritiques se heurte à plusieurs verrous. **Premièrement**, la faible capacité d'échange cationique (CEC) due à la prédominance de kaolinite et de gibbsite limite la rétention du calcium, qui est rapidement lessivé par les fortes pluies tropicales (Laço *et al.*, 2025 ; Friesen *et al.*, 1982). **Deuxièmement**, la matrice minéralogique (gibbsite, goéthite) confère un fort pouvoir tampon acide : l'hydrolyse de l'aluminium échangeable ($\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$) entraîne une remontée temporaire du pH, mais celui-ci revient à sa valeur d'équilibre (4,5-5,0) après quelques mois (Friesen *et al.*, 1982 ; Kryzevicius *et al.*, 2019). **Troisièmement**, le chaulage ne modifie en rien l'induration physique des horizons profonds (plinthis, pétroplinthis) ni la capacité de fixation du phosphore par les oxydes (Friesen *et al.*, 1982). Des études de terrain confirment que l'effet du chaulage sur les sols ferrallitiques est généralement de courte durée, ne dépassant pas une à deux saisons culturales (von Uexküll et Mutert, 1995 ; Haynes, 2014).

Piégeage des éléments nutritifs : Les engrais solubles peuvent remédier à des carences immédiates mais ne parviennent pas à libérer les nutriments déjà présents dans le sol (Torres *et al.*, 2024). Par exemple, l'inefficacité de la fertilisation phosphatée : l'apport d'engrais solubles (superphosphate, DAP) est rapidement inactivé par les oxydes de Fe et Al (goéthite, hématite, gibbsite). Le mécanisme (Parfitt, 1978 ; Borggaard, 1983) est une adsorption par échange de ligand formant des complexes bidentés de surface (Parfitt et Atkinson, 1976) :



Ces complexes ont une constante de stabilité très élevée ($K_{\text{ads}} \approx 10^{12} \text{ M}^{-1}$) et des énergies de liaison $\text{Fe}-\text{O}-\text{P}$ de 120–150 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, rendant le processus quasi irréversible à l'échelle du cycle cultural (Parfitt, 1978).

Rôle limité de la matière organique seule : fortes températures et humidité entravent l'accumulation durable des stocks organiques (Gigou, 1996). Les amendements (compost, fumier) peuvent temporairement améliorer le pH, complexer l'aluminium et augmenter le phosphore disponible (Indriyati *et al.*, 2023 ; Omokaro *et al.*, 2024). Par exemple, le fumier de poulet réduit significativement l'aluminium échangeable et augmente le phosphore assimilable (Indriyati *et al.*, 2023). Cependant, dans les horizons indurés, la matière organique est quasiment absente, limitant son efficacité (Fallavier *et al.*, 1988). De plus, la minéralisation rapide sous climat tropical ne permet pas d'accumuler des stocks organiques suffisants pour modifier durablement la minéralogie (Gigou, 1996). Ainsi, les

amendements organiques seuls ne peuvent lever ni le verrou du phosphore ni l'induration physique (Fallavier *et al.*, 1988).

Contre-productivité du labour profond : Le labour profond est parfois préconisé pour briser les horizons indurés, améliorer l'aération et l'infiltration, et fragmenter les niveaux plinithiques discontinus afin d'accroître la profondeur exploitable par les racines (Mukalay *et al.*, 2026). Toutefois, cette pratique s'avère contre-productive : elle perturbe la structure du sol sans améliorer la solubilité ni la disponibilité des éléments nutritifs (Mathew et Rani, 2023). D'abord, le broyage mécanique de la fraction grossière (> 2 mm), qui représente plus d'un tiers du sol, n'est que partiel et laisse subsister des nodules durs (Bourman et Ollier, 2002 ; Martins *et al.*, 2018). Ensuite, en exposant les horizons profonds très acides (pH4.9) (Efeno *et al.*, 2025), le labour met au jour une terre fine (< 2 mm) riche en Al échangeable, ce qui entrave la croissance des plantes (Kochian *et al.*, 2015 ; Moreau, 1996). Cette exposition peut entraîner une baisse du rendement des cultures, comme l'ont montré des études où des amendements du sol étaient nécessaires pour atténuer les effets de l'acidité (Farina et Channon, 1988). Enfin, il détruit la structure micro-agrégée des horizons supérieurs, favorisant l'érosion et la formation de croûtes de battance (Ferrara *et al.*, 2012).

Ainsi donc, ces approches relèvent d'une agriculture « corrective » qui ajoute ce qui manque, alors que le sol possède des réserves mais les maintient verrouillées. Cette analyse rejoint Sanchez (2019) et Quantin et Becquer (2025) qui appellent à un changement de paradigme : passer d'une logique d'apport à une logique d'activation des potentiels internes.

Piège de la fraction meuble et l'invisibilité des réservoirs : La pratique consistant à baser les recommandations agronomiques sur la seule analyse de la fraction fine des sols (inférieure à 2 mm) néglige de fait l'importance cruciale de la fraction grossière, d'autant que les protocoles usuels excluent également les horizons situés à plus d'un mètre de profondeur. Si la fraction fine fournit des nutriments immédiatement disponibles, la fraction grossière agit comme un réservoir géochimique majeur. Whitney et Zabowski (2004) montrent ainsi, sur un échantillonnage de dix-sept séries de sols variés (Alaska, Oregon, Porto Rico, Washington), que la proportion d'azote total contenue dans cette fraction varie de 0,3 à 37 % selon les sols, cette valeur augmentant avec la masse de fragments grossiers. Dans un cas extrême (un Cryorthent contenant 92 % de fragments grossiers) elle atteint même 67 %, ce qui souligne l'effet de masque exercé par les grosses particules sur les bilans conventionnels. Par ailleurs, pour les horizons sous-jacents à un mètre de profondeur, la fraction grossière renferme encore 7 à 35 % de l'azote du profil, avec une concentration moyenne de 0,03 % d'azote observée dans l'ensemble des horizons minéraux génétiques. En définitive, leurs résultats indiquent qu'en excluant la fraction grossière et les horizons profonds, on pourrait omettre

jusqu'à la moitié de l'azote total du sol, ce qui compromet sérieusement la fiabilité des bilans azotés classiques. En outre, des travaux complémentaires montrent que cette fraction grossière améliore significativement l'absorption d'éléments tels que l'azote et le phosphore, surpassant parfois les capacités de la fraction fine (Smaill *et al.*, 2014). L'exclusion systématique de cette fraction dans les protocoles usuels conduit donc à une sous-estimation marquée des ressources nutritives disponibles. Pour affiner ces évaluations, des méthodes non destructives ont été développées afin de mesurer l'impact des différentes classes granulométriques sur les propriétés du sol et de mieux appréhender le rôle de la fraction grossière. En effet, il est montré que les sables (à particules de taille supérieure à 50 microns) ne peuvent pas être considérés comme chimiquement inertes (Oliver et Letourmy, 1992). Toutefois, selon les mêmes auteurs, la fraction fine conserve une importance déterminante pour les propriétés d'échange du sol et la pénétration racinaire, ce qui peut justifier son usage prédominant dans les recommandations agronomiques courantes.

3.3.4.2. Intégration dans le concept de piège pédogénétique latéritique

Dans le cadre de notre concept de « piège pédogénétique latéritique », la plinthise est retenue comme :

- un indicateur de processus pédogénétiques avancés (altération intense, mobilisation du fer) ;
- un facteur limitant physique majeur (induration, drainage réduit, enracinement contraint) ;
- et, sous réserve, une source mineure de fer et d'aluminium (mais pas de nutriments majeurs comme Ca, Mg, K) ;
- un acteur de l'évolution des paysages tropicaux (érosion, hydrologie, végétation), qui contribue à la différenciation spatiale du piège.

Cette vision intégrée permet de sortir d'une lecture uniquement contraignante de la plinthise pour reconnaître sa contribution à la dynamique des sols et des paysages, tout en justifiant les précautions agronomiques nécessaires. Dans les régions de montagne tropicale humide, la plinthise et ses dérivés indurés (pétoplinthises, cuirasses) sont des composantes quasi-incontournables du piège pédogénétique : elles matérialisent l'héritage paléoclimatique et renforcent les contraintes physiques, rendant d'autant plus nécessaire une gestion intégrée des sols.

3.4. Proposition d'un vocabulaire opérationnel

Dans le cadre du paradigme du piège pédogénétique latéritique, une clarification terminologique est indispensable pour éviter les confusions historiques et pour désigner précisément les objets pédologiques dont les contraintes interagissent pour maintenir un état de faible fertilité. Les classifications modernes distinguent les phases meubles (plinthise) (Bockheim, 2014)

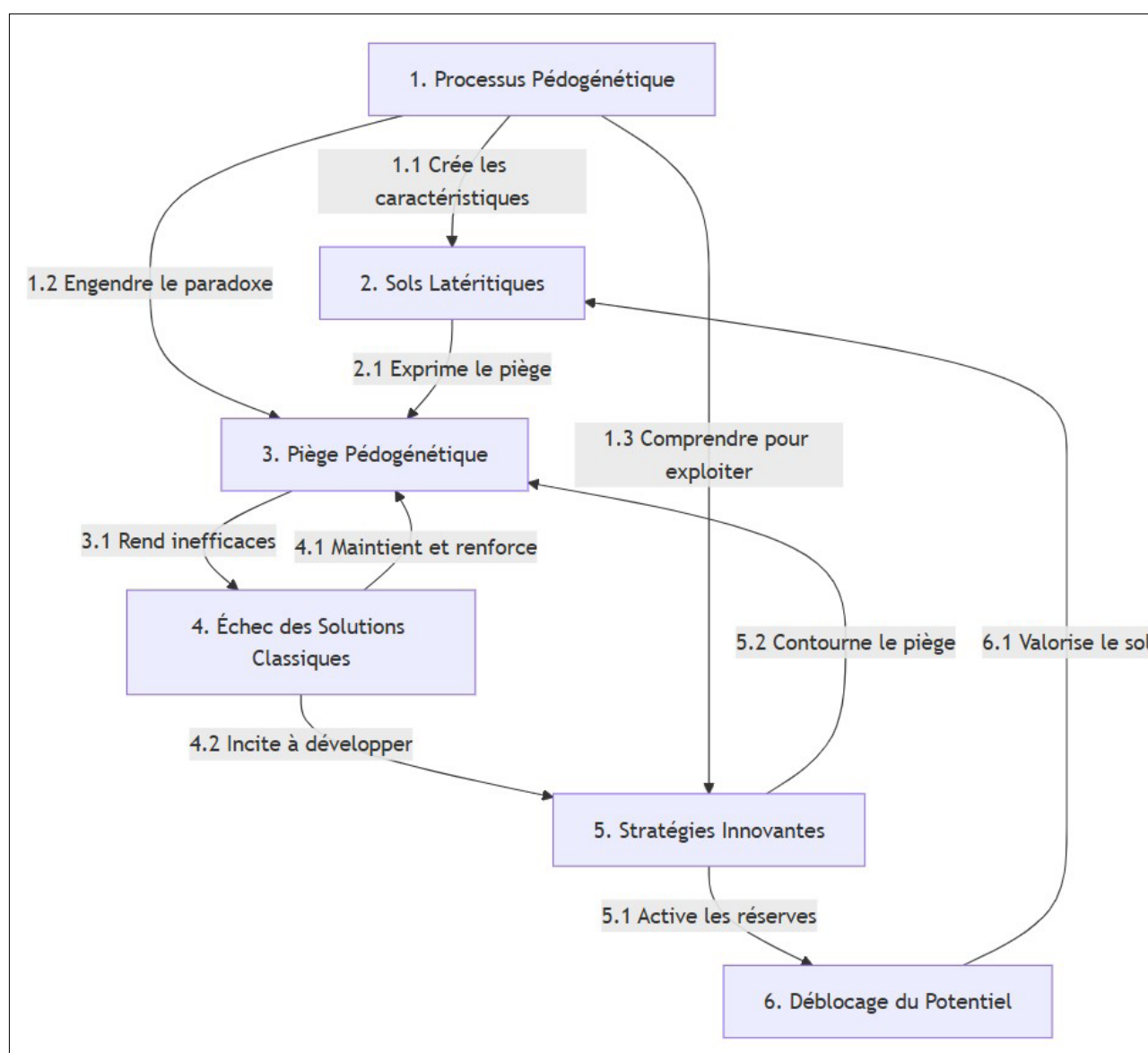
des phases indurées (pétoplinthite, cuirasses) (Borilli *et al.*, 2013). Cette distinction permet de mieux décrire la variabilité des matériaux latéritiques et de relier leurs propriétés physiques (induration, porosité, drainage) aux processus géochimiques et pédogénétiques qui les ont formés. Elle ne présuppose pas l'existence d'un « piège » au sens de blocage de nutriments, mais fournit un cadre descriptif utile que nous utilisons ici comme base pour caractériser les composantes du piège.

La classification des sols plinthiques (qu'ils présentent des horizons à plinthite non indurée ou déjà cimentés en pétoplinthite) est influencée par les conditions environnementales dominantes, qui dictent le régime hydrique du sol et les processus de

formation (le Roux et du Preez, 2006). Des études indiquent que la présence de concrétions ferrugineuses varie de manière significative en fonction de la géologie et des facteurs climatiques sous-jacents, ce qui a un impact sur le développement de la plinthite et de la pétoplinthite (Bilong, 1992 ; Perkins et Lawrence, 1982). Dans les régions de montagne tropicale humide, ces variations lithologiques et climatiques se traduisent par une forte hétérogénéité spatiale du piège pédogénétique : sommets cuirassés, versants à plinthite affleurante ou sub-affleurante, bas-fonds colluviaux aux horizons meubles mais toujours chimiquement contraints. L'intensité des précipitations et la fluctuation des nappes phréatiques affectent la solubilité

Figure 1 : Paradigme du piège pédogénétique : processus, échecs et stratégies d'activation

Figure 1 : Pedogenetic Trap Paradigm: Processes, Failures, and Activation Strategies



et la précipitation du fer, contribuant à la formation de nodules riches en hématite (Gaviria, 1993). Cependant, il est important de noter que la dégradation des cuirasses ferrugineuses, observée dans certaines régions d'Afrique de l'Ouest, peut également influencer la distribution et la composition des sols, remettant en question la stabilité des formations ferrugineuses (Leprun, 1977).

Dans cet article, le terme « sols latéritiques » est utilisé pour désigner l'ensemble des matériaux d'altération supergène sous climat tropical humide, incluant les ferralsols, la plinthe, les pétroplinthites, les cuirasses, qu'ils soient indurés ou non. Ils sont caractérisés par un cortège minéralogique dominé par la kaolinite et les oxydes/hydroxydes de fer et d'aluminium, et présentent des contraintes agronomiques liées à leur héritage géochimique et pédogénétique (acidité, faible CEC, fixation du phosphore, induration). Cette définition large est cohérente avec l'approche du piège, car elle englobe tous les matériaux qui peuvent contribuer, par leurs interactions, au verrouillage de la fertilité.

Cette mise au point terminologique et conceptuelle clarifie le cadre utilisé dans la suite de l'article, où le « piège pédogénétique latéritique » est défini non par la présence de nutriments « piégés » (notion non validée), mais par l'interaction systémique des contraintes physico-chimiques et physiques qui limitent la fertilité et réduisent l'efficacité des pratiques correctives conventionnelles. Ainsi :

- La plinthe meuble représente un stade actif ou récent de mobilisation du fer, associé à une nappe fluctuante ; elle est un indicateur de processus redox qui participent à l'acidification et à la redistribution des éléments.
- La pétroplinthite et les cuirasses constituent la forme indurée, héritée ou récente, qui agit comme une barrière physique (obstacle racinaire, drainage, érosion) et contribue à la différenciation spatiale du piège.
- Les ferralsols (horizons meubles au-dessus ou latéralement) sont le siège des contraintes chimiques actives : faible CEC, fixation du P, toxicité Al, acidité.

En adoptant ce vocabulaire opérationnel, on peut analyser le piège pédogénétique comme un système à plusieurs compartiments (meuble, induré, de surface, profond) dont les interactions (lessivage, érosion, bioturbation, cycles hydriques) entretiennent un état de faible fertilité. Cette approche permet de sortir des visions simplistes (latérite = sol stérile) ou trop optimistes (latérite = réservoir caché de nutriments) pour fonder une gestion réaliste et intégrée.

3.5. Architecture conceptuelle du paradigme du piège pédogénétique latéritique

Le diagramme systémique (*Figure 1*) représente l'architecture conceptuelle du paradigme, articulée autour de six niveaux hiérarchiques qui décrivent l'enchaînement logique allant de

la genèse des sols latéritiques à leur gestion durable. Cette architecture s'applique à l'ensemble des régions de montagne tropicale humide où ces sols se sont développés sous l'effet de l'altération intense, des fortes précipitations et de la différenciation topographique.

Niveau 1 – La genèse

Le processus pédogénétique (ferrallitisation, latéritisation, lessivage des bases, accumulation d'oxydes) constitue le point de départ incontournable. Il façonne à la fois la matrice des sols latéritiques (dominance kaolinite – oxydes de Fe/Al) et le paradoxe fondamental qui caractérise le piège : des sols chimiquement pauvres et physiquement contraignants, mais néanmoins cultivés sur de vastes étendues. Son rôle triple (minéralogique, géochimique et structural) en fait l'architecte et le gardien du système.

Niveau 2 – La matérialisation

Les sols latéritiques (ferralsols, plinthe, pétroplinthites, cuirasses, horizons indurés ou non) représentent l'incarnation physique du processus pédogénétique. Ils expriment dans leur structure hétérogène et leurs propriétés chimiques spécifiques l'ensemble des contraintes et potentialités du système : faible capacité d'échange cationique (CEC), acidité persistante, fixation du phosphore, toxicité aluminique, faible pouvoir tampon, faible disponibilité en azote, induration et faible profondeur utile. C'est à ce niveau que se matérialise le support matériel du piège.

Niveau 3 – Le cœur du problème

Le piège pédogénétique latéritique émerge comme le paradoxe opérationnel. Il crée une situation où les faibles réserves minérales (et les nutriments apportés) deviennent rapidement indisponibles pour les plantes en raison des mécanismes d'adsorption, de précipitation ou de blocage physique (obstacle racinaire). Ce verrouillage systémique invalide les approches conventionnelles telles que les engrais solubles seuls ou le chaulage isolé, car ces pratiques traitent les symptômes sans s'attaquer aux causes minéralogiques et structurales.

Niveau 4 – L'impasse

L'échec des solutions classiques – bien documenté dans la littérature agronomique tropicale – n'est pas un simple échec technique ponctuel, mais un révélateur de l'inadéquation fondamentale entre les méthodes standardisées (développées pour des sols tempérés ou peu évolués) et la complexité du système pédologique latéritique. Cette impasse impose une refonte des cadres d'intervention.

Niveau 5 – La rupture

Des stratégies de gestion adaptées – apports organiques (composts, paillages), chaulage raisonné, utilisation de cultures tolérantes à l'acidité et à la faible disponibilité du phosphore, agroforesterie, travail du sol limité, lutte anti-érosive – sont nécessaires pour contourner ou atténuer les contraintes. Ces

stratégies ne reposent pas sur l'hypothèse non validée de « réserves minérales cachées » dans les nodules ou cuirasses, mais sur une compréhension systémique des mécanismes de blocage. La rupture consiste à passer d'une approche corrective (ajout d'intrants) à une gestion intégrée du piège.

Niveau 6 — La transformation

La mise en œuvre cohérente et durable de ces stratégies permet une amélioration progressive de la productivité agricole, sans bouleversement miracle. Cette transformation repose sur une compréhension fine des mécanismes pédogénétiques à différentes échelles (du profil de sol au paysage), sur le suivi à long terme des indicateurs de fertilité (pH, phosphore disponible, matière organique, toxicité Al), et sur l'adaptation des pratiques aux spécificités topographiques (sommets cuirassés, versants, bas-fonds). Le piège n'est pas « supprimé » mais contourné et atténué, permettant une exploitation durable des terres latéritiques en régions de montagne tropicale humide.

4. CONTEXTE PÉDOGÉOGRAPHIQUE DE DSCHANG : une illustration régionale du piège latéritique

Cette section ne constitue pas une étude de cas expérimentale au sens strict, mais une illustration régionale du piège pédogénétique latéritique, fondée sur l'analyse critique des travaux publiés sur Dschang et sur des zones aux conditions bioclimatiques similaires (haute altitude tropicale humide, précipitations annuelles > 2 000 mm, relief accidenté, alternance de socles cristallins et de couvertures volcaniques). Elle vise à montrer concrètement comment le concept de piège pédogénétique, défini théoriquement dans les sections précédentes (héritage minéralogique kaolinitique-oxydique, acidité structurelle, fixation du phosphore, toxicité aluminique, faible pouvoir tampon, induration résiduelle), s'observe et se particularise dans un contexte de montagne tropicale humide comme celui des hauts plateaux de l'Ouest Cameroun.

Dans ce milieu, l'altitude (>1 400 m) tempère les températures (22–24 °C en moyenne) mais n'atténue pas l'intensité des précipitations (2 355 mm·an⁻¹) (Kengni *et al.*, 2009), qui entretiennent un lessivage puissant et une acidification prononcée. La topographie accidentée (dénivelés de plusieurs dizaines à centaines de mètres) génère une forte différenciation spatiale des sols : sommets cuirassés hérités, versants érodés à sols minces et jeunes, bas-fonds colluviaux aux profils plus épais mais toujours soumis aux mêmes contraintes chimiques. De plus, la dualité lithologique (granites/gneiss d'un côté, basaltes et roches volcano-sédimentaires de l'autre) permet d'illustrer la lithodépendance du piège – non pour trouver une roche-mère « miracle », mais pour montrer que les contraintes persistent, seules leurs intensités variantes.

Ainsi, Dschang offre un terrain d'observation représentatif des mécanismes de verrouillage décrits dans le paradigme. Les données locales disponibles (analyses minéralogiques, géochimiques, pédologiques) confirment l'absence de phases amorphes généralisées, la dominance des oxydes cristallisés, la faible CEC et la forte fixation du phosphore. Cette section applique donc le concept général au contexte régional, sans prétendre à l'exhaustivité expérimentale, mais avec l'ambition de fournir un exemple pédagogique et heuristique pour les zones de montagne tropicale humide d'Afrique centrale et d'ailleurs.

4.1. Héritage paléoclimatique et dynamiques actuelles

Dans le paradigme du piège pédogénétique latéritique, les sols de Dschang ne peuvent être compris comme un simple produit des conditions actuelles. Ils résultent d'une superposition d'héritages anciens (paléoclimatiques et lithologiques) et de dynamiques contemporaines (biotiques, hydriques, anthropiques). Cette dualité temporelle est au cœur du piège, car les contraintes héritées (acidité, faible CEC, fixation du P, induration) persistent à l'échelle millénaire, tandis que les processus actuels (bioturbation, lessivage, érosion) les réactivent ou les modulent sans les supprimer.

4.1.1. Héritage paléoclimatique : l'empreinte du passé

Les processus de latéritisation à Dschang résultent d'une superposition d'héritages anciens et de dynamiques contemporaines, comme cela a été documenté dans de nombreux contextes tropicaux (Beauvais *et al.*, 1991 ; Tardy *et al.*, 1988). Les cuirasses ferrugineuses, véritables marqueurs paléoclimatiques, témoignent d'une alternance entre phases de dégradation et de formation sous des régimes climatiques distincts (Tardy et Roquin, 2000 ; Beauvais *et al.*, 1991). Ces marqueurs révèlent un historique des phases de dégradation et de formation, conformément aux conclusions de Tardy et Roquin (2000) sur les implications climatiques des formations latéritiques.

Le concept de lithodépendance et d'évolution temporelle des systèmes latéritiques est bien établi (Tardy *et al.*, 1988). Ce concept met en évidence la relation entre la composition latéritique du sol et les formations géologiques sous-jacentes, ce qui suggère que les caractéristiques minéralogiques sont conservées par rapport aux matériaux parents (Tardy *et al.*, 1988). Les cuirasses (« plastrons ») de Dschang indiquent des phases de latéritisation accentuée, ce qui suggère des climats historiques plus humides que les conditions actuelles (Tardy et Roquin, 2000). Ces formations font office d'archives paléoclimatiques, préservant les preuves des oscillations climatiques au fil du temps. Les principaux composants des

profils latéritiques, tels que l'hématite et la goethite, peuvent être datés à l'aide de la méthode (U-Th) /He, fournissant des informations géochronologiques sur les événements météorologiques passés. Des changements dans la composition minérale, tels que l'augmentation de la concentration de Th et la substitution d'Al dans la goethite, indiquent des transitions vers des conditions plus humides au cours du Néogène tardif (Heller *et al.*, 2022).

À Dschang, la présence d'hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) et de gibbsite $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ dans les cuirasses au sommet des interfluvés témoigne d'une désilicification extrême, indiquant des conditions paléoclimatiques plus chaudes et plus humides qu'actuellement (Bitom, 1988 ; Nahon, 1991 ; Tardy, 1993a). Ce cortège minéral reflète une latéritisation ancienne. Des études menées en Afrique centrale (Beauvais et Mazaltari 1988 ; Tardy, 1997) montrent des cuirasses riches en hématite sur les sommets d'interfluvés et en gibbsite sur les pentes boisées. Ces minéraux conservent la trace d'une évolution climatique débutant au Mésozoïque (environ 100 millions d'années) avec un apogée à l'Éocène (environ 50 millions d'années). Des accumulations ferrugineuses dérivant d'anciennes couvertures pédologiques ont également été documentées en Afrique centrale (Martin et Volkoff, 1990 ; Alexandre, 2002 ; Bitom et Volkoff, 1993 ; Beauvais, 2009).

4.1.2. Dynamiques actuelles :

un système actif, mais verrouillé

Contrairement à certains points de vue, ces sols ne devraient pas être considérés comme des « paléolatérites » fixes, car ils sont en évolution continue et s'adaptent à l'évolution des conditions environnementales (Tardy et Roquin, 2000). Des processus actifs tels que l'altération, le lessivage et la redistribution de la texture sont en cours, sous l'effet de facteurs environnementaux tels que les précipitations et la température (Bourgeon et Gunnell, 1998 ; Furian, 1994). La bioturbation joue un rôle important dans le mouvement vertical et latéral des particules du sol, contribuant à la santé et à la structure du sol (Modenesi-Gauttieri *et al.*, 2011). L'interaction entre les processus anciens et actuels garantit la résilience des sols tropicaux, des facteurs anthropiques et géologiques influençant leur évolution (Bourgeon et Gunnell, 1998 ; Furian, 1994).

Des études récentes montrent que les horizons mous sous-jacents aux plastrons constituent des écosystèmes dynamiques, où les interactions microbiennes et végétales contribuent activement à la transformation du sol (Wild et Daval, 2025 ; Chandra et Enespa, 2019). Cette activité biologique favorise non seulement la dégradation progressive des plastrons (par l'amélioration de la structure et du cycle des nutriments) mais aussi la formation d'horizons argileux meubles et la redistribution latérale des particules fines. Par ailleurs, l'accumulation continue de colluvions sur les pentes inférieures témoigne de l'influence persistante des facteurs biotiques et climatiques sur le cycle

de latéritisation. La présence de deux générations distinctes de colluvions reflète notamment des phases climatiques successives, soulignant le rôle de l'érosion et de l'altération continues (Modenesi et Toledo, 1993). Les systèmes racinaires et les communautés microbiennes participent également au développement des profils pédologiques, comme observé dans divers écosystèmes (Verboom et Pate, 2006). Toutefois, bien que l'accent soit mis sur les contributions biotiques, il est essentiel de considérer l'interaction avec les facteurs abiotiques (climat et géologie) qui jouent un rôle tout aussi crucial dans la définition des profils et des processus du sol au fil du temps (Ponge, 1999).

La macrofaune du sol (fourmis, termites) joue un rôle déterminant dans la déstructuration et la transformation des horizons, en augmentant la porosité et en mélangeant les matériaux. En milieu tropical humide, cette action biologique contrôle activement la genèse des sols, le cycle des éléments et les réactions chimiques (Lucas *et al.*, 1996). Les processus d'altération et de restructuration restent actifs à différentes positions du paysage. En profondeur, les cycles alternés d'humectation et de dessiccation favorisent la redistribution du fer et la formation d'horizons tachetés (Ferry *et al.*, 2003) ; en surface, l'érosion et la dégradation modifient constamment les couvertures pédologiques héritées (Fritsch *et al.*, 1990). Ainsi, malgré un héritage paléoclimatique marqué, la pédogenèse à Dschang demeure un système dynamique, piloté par des interactions complexes entre la biologie, le climat, la topographie et la lithologie.

4.1.3. Lien avec le piège pédogénétique

Cette dualité temporelle est essentielle pour comprendre le piège pédogénétique latéritique : les contraintes héritées (acidité structurale, faible CEC, fixation du P, induration) sont des propriétés acquises sur des millions d'années et ne peuvent être annulées par les pratiques agricoles à court terme. Les dynamiques actuelles (bioturbation, lessivage, érosion, activités microbiennes) modifient localement la distribution des matériaux et la surface d'échange, mais elles ne transforment pas la minéralogie kaolinitique-oxydique en profondeur. Au contraire, elles peuvent renforcer le piège : par exemple, l'érosion préférentielle des fines argileuses appauvrit encore la CEC en surface, tandis que la bioturbation expose des horizons indurés. Ainsi, malgré une apparence de renouvellement, le système reste verrouillé par son héritage paléoclimatique.

4.2. Modèle intégratif : dualité temporelle du piège pédogénétique

Le modèle intégratif de la dualité temporelle du piège pédogénétique à Dschang met en évidence l'interaction entre les processus de formation des sols anciens et actuels. Ce modèle biphasique fait la distinction entre :

- La structure héritée (Reintam et Lang, 1999) : caractérisée par des cuirasses stables formées au cours de millions d'années. Ces horizons profonds constituent la composante stable du piège pédogénétique, façonné par les conditions climatiques agressives du passé. Bien que stables, ces structures ne sont pas fixes ; elles se dégradent lentement, apportant des nutriments aux couches supérieures, mais cette dégradation est trop lente pour lever les contraintes.
- La pédogenèse à surface active : les horizons superficiels (ferralsols, sols bruns) se développent sur une échelle décennale à millénaire, influencés par le biocycle et les pratiques agricoles actuelles (Pereira, 2017). L'expression du piège pédogénétique (acidité, toxicité Al, fixation du P, faible CEC) est particulièrement évidente dans ces couches actives, ce qui a un impact direct sur la viabilité agricole.

Bien que le modèle souligne l'importance des processus anciens et actuels, il est essentiel de prendre en compte le fait que les changements environnementaux rapides, tels que les changements climatiques, peuvent perturber ces dynamiques établies, entraînant potentiellement une dégradation des sols et une réduction de la productivité agricole. Dans le contexte de Dschang, cela signifie que le piège pédogénétique pourrait s'aggraver si les précipitations augmentent (accélération du lessivage) ou si les sécheresses s'intensifient (accumulation de sels, induration).

4.2.1. Signature minéralogique et géochimique

Dans le paradigme du piège pédogénétique latéritique, la signature minéralogique et géochimique des sols de Dschang constitue le fondement même des contraintes de fertilité. L'analyse minéralogique doit être distinguée selon le substrat géologique (basaltes, granites, gneiss, roches volcano-sédimentaires), car la composition exacte varie. On observe néanmoins une prédominance générale de phases stables caractéristiques des milieux tropicaux fortement altérés (Tardy, 1993b ; Nahon, 1991), qui participent directement au verrouillage chimique et physique :

- Phases alumineuses : Si la gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$) est souvent le produit final d'une altération intense en climat tropical sous fort lessivage, la kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) se forme dans des conditions moins drastiques et constitue une phase de transition fréquente (Herrmann *et al.*, 2007 ; Anand *et al.*, 1985). À Dschang, la prédominance de la gibbsite atteste ainsi d'une désilicification avancée, reflétant un haut degré d'altération (Varajão *et al.*, 2002). Cette association minéralogique engendre deux contraintes majeures : une très faible capacité d'échange cationique (CEC), qui limite la disponibilité des nutriments, et une fixation accrue du phosphore, liée à la grande surface spécifique et à la réactivité de ces minéraux (Varajão *et al.*, 2002). Enfin, si ces phases cristallines dominent dans les sols fortement altérés, il ne faut

pas négliger le rôle des phases alumino-silicatées amorphes (type allophane, de composition générale $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{SiO}_2)_{2,1-2} \cdot n\text{H}_2\text{O}$), qui, dans les sols moins évolués, peuvent offrir des voies alternatives pour la rétention et la disponibilité des éléments nutritifs (Velde et Meunier, 2008).

- Oxydes de fer : Les oxydes de fer dominants sont la goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$), aux teintes jaunes à brun-jaune, et l'hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), qui confère la coloration rouge caractéristique des sols fortement altérés (Torrent et Barrón, 2002). Leur formation résulte de l'intense altération météorique sous les conditions climatiques régionales (Marcelino *et al.*, 2010 ; Lelong, 1967). Comme le soulignent Torrent et Barrón (2002), ces minéraux constituent par ailleurs les principaux sites d'adsorption spécifique du phosphore, renforçant ainsi le piège pédogénétique par la rétention quasi irréversible de cet élément.

Absence de phases amorphes :

- Processus de transformation : Les minéraux amorphes tels que les allophanes et la ferrihydrite sont généralement instables dans les environnements très soumis aux intempéries, ce qui entraîne leur conversion en formes cristallines stables (Bonifas, 1959 ; Ambrosi, 1990). La prédominance de minéraux cristallins suggère des processus d'altération avancés, entraînant une réduction des phases amorphes réactives qui stabilisent généralement la matière organique et les nutriments (Kleber *et al.*, 2005).
- Rétention des éléments nutritifs : Alors que les minéraux amorphes peuvent lier efficacement les nutriments, leur rareté à Dschang limite la capacité du sol à retenir les nutriments, comme on le voit dans les sols moins évolués où ces phases sont plus abondantes (Gebhardt, 1976).
- Quartz résiduel : très stable, il s'accumule dans les fractions sableuses. En revanche, les phases amorphes (allophanes, ferrihydrite) sont généralement absentes des sols latéritiques très évolués comme ceux de Dschang, car elles se transforment avec le temps en minéraux cristallisés (kaolinite, goethite, hématite). L'affirmation d'un rôle de ces phases dans les sols de Dschang n'est pas soutenue par les données locales.
- Support des données locales : L'affirmation concernant l'absence de ces phases amorphes à Dschang est renforcée par des études minéralogiques locales, qui montrent une nette prédominance de minéraux cristallins (Bonifas, 1959).

À l'inverse, certains chercheurs soutiennent que les phases amorphes peuvent jouer un rôle dans la fertilité du sol et la rétention des nutriments, en particulier dans les sols moins évolués (Basile-Doelsch *et al.*, 2014). Cependant, dans le contexte de la localité de Dschang, les preuves confirment fortement la prédominance des minéraux cristallins par rapport aux minéraux amorphes (Bilong, 1992), ce qui indique un profil de sol très évolué, typique du piège pédogénétique où les phases réactives ont disparu.

Géochimie et contraintes sur la fertilité :

La géochimie (c'est-à-dire la composition chimique élémentaire) de ces sols impose de fortes contraintes sur la fertilité (Efeno *et al.*, 2026 ; Efeno *et al.*, 2025) :

- pH acide (< 5,5), maintenu par l'hydrolyse de l'aluminium (Al^{3+}) libéré dans la solution du sol et par l'absence quasi totale de cations basiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) lessivés (van Breemen *et al.*, 1983). Cette acidité chronique est l'un des moteurs du piège, car elle solubilise l'aluminium toxique et empêche toute correction naturelle.
- Capacité d'échange cationique (CEC) très faible (< 5 cmol/kg), caractéristique des sols dominés par la kaolinite et les oxydes de fer et d'aluminium, limitant fortement la rétention des nutriments (Juo et Franzluebbers, 2003). Cette faible CEC empêche les sols de Dschang de retenir les engrais apportés, qui sont lessivés ou fixés.
- Forte capacité de fixation du phosphore (CFP > 500 mg P/kg), due à l'abondance d'oxydes/hydroxydes de fer et d'aluminium qui adsorbent spécifiquement les ions phosphate (Borggaard, 1983 ; Sarazin *et al.*, 1982). Ce mécanisme est central dans le piège pédogénétique, car il rend le phosphore quasi indisponible pour les cultures malgré les apports.

La signature minéralogique et géochimique des sols de Dschang ne constitue donc pas une simple description : elle est le substrat matériel du piège pédogénétique latéritique. L'absence de phases amorphes, la dominance de minéraux cristallins à faible activité chimique (kaolinite, gibbsite, goethite, hématite), l'acidité maintenue par l'aluminium et la très faible CEC créent un système auto-entretenu de faible fertilité. Les pratiques conventionnelles (engrais solubles, chaulage isolé) se heurtent à cette réalité minéralogique. Une gestion intégrée, combinant matière organique, chaulage raisonné et cultures adaptées, est nécessaire pour atténuer (mais pas supprimer) les effets de ce piège.

4.2.2. Mécanismes de verrouillage chimique

Dans le paradigme du piège pédogénétique latéritique proposé pour la localité de Dschang, la faible fertilité des sols ne résulte pas d'une contrainte unique, mais de l'interaction systémique de plusieurs mécanismes chimiques qui se renforcent mutuellement. Cette section justifie pourquoi les sols développés sur socles cristallins (granites, gneiss) — largement représentés sur le long de la toposéquence — présentent des contraintes sévères, bien que les sols sur roches volcaniques (basaltes) puissent montrer des atténuations relatives grâce à une meilleure structure et à des réserves minérales initiales plus élevées (Bilong, 1992). Conformément au concept de piège, les pratiques correctives conventionnelles (engrais solubles, chaulage isolé) échouent car elles traitent les symptômes sans s'attaquer aux causes minéralogiques et pédogénétiques profondes (Sanchez, 1976 ; Sposito, 1989).

1. FIXATION DU PHOSPHORE

Mécanisme de fixation du phosphore

Efeno *et al.* (2025) confirment que la forte capacité de fixation du phosphore dans les sols de Dschang est liée à l'abondance d'oxydes de fer (goethite, hématite) et d'aluminium (gibbsite), qui adsorbent spécifiquement les ions phosphate. Cette fixation rend le phosphore quasi indisponible pour les cultures malgré les apports d'engrais solubles, ce qui constitue un verrou majeur du piège pédogénétique. En conséquence, d'importantes carences en nutriments impactent les rendements des cultures. Cet effet peut être partiellement corrigé par des amendements spécifiques tels que le silicate de calcium (Jamet, 1986), mais la persistance du verrouillage chimique limite l'efficacité à long terme.

Analyse comparative avec d'autres types de sols

Les sols développés sur des roches volcaniques, telles que les basaltes (présents localement dans la localité de Dschang), peuvent être soumis à des contraintes similaires mais présentent souvent une meilleure structure et des réserves minérales initiales plus élevées, ce qui peut atténuer certains problèmes de fertilité (Bilong, 1992).

En revanche, les sols situés sur des roches ultrabasiques, présentent des caractéristiques physico-chimiques extrêmes avec une teneur élevée en oxyde de fer, ce qui complique encore la disponibilité des éléments nutritifs (Latham, 1975).

Ainsi, bien que les sols latéritiques de Dschang soient caractérisés par une faible fertilité due à la fixation du phosphore, des stratégies telles que des amendements spécifiques du sol peuvent contribuer à atténuer ces effets. Cependant, la nature persistante de l'immobilisation du phosphore pose des défis permanents pour la productivité agricole dans les régions où ces types de sols sont présents, notamment la localité de Dschang.

2. TOXICITÉ DE L'ALUMINIUM

Toxicité de l'aluminium dans les sols acides

La toxicité aluminique se manifeste par une perturbation de la division cellulaire et de la respiration racinaire, provoquant enflure, fissuration, rigidité accrue et morphologie altérée des racines (Bhalerao et Prabhu, 2013 ; Rahman et Upadhyaya, 2021 ; Efeno *et al.*, 2026). À Dschang, Efeno *et al.* (2026) confirment l'occurrence de ces symptômes sur les cultures locales, soulignant l'impact régional de cette contrainte. Ces atteintes limitent l'absorption des nutriments essentiels (calcium, magnésium et potassium), compromettant ainsi la santé et le développement des plantes (Bhalerao et Prabhu, 2013 ; Xiao et Wang, 2006). À l'échelle globale, environ 40 % des terres arables sont affectées par des sols acides, faisant de la toxicité aluminique une contrainte majeure sur les rendements

des cultures (Krstic *et al.*, 2012). Par ailleurs, la sensibilité à l'aluminium varie considérablement selon les géotypes, ce qui conditionne la capacité des différentes variétés à prospérer en milieu acide (Rahman et Upadhyaya, 2021).

Mécanismes de toxicité de l'aluminium dans le contexte de Dschang

L' Al^{3+} provoque des déséquilibres ioniques en interagissant avec d'autres ions, perturbant ainsi les processus cellulaires (Saha *et al.*, 2022).

Il interfère avec l'absorption et le transport de nutriments essentiels tels que le calcium, le magnésium et le potassium, et affecte l'approvisionnement en eau des plantes (Bhalerao et Prabhu, 2013).

La solubilisation de l'aluminium est renforcée par un pH bas, qui peut être d'origine naturelle (altération des granites et gneiss sous climat humide) ou accéléré par des activités humaines telles que les pratiques agricoles et les pluies acides (Delhaize et Ryan, 1995).

Dans la localité de Dschang, l'horizon A andique (influencé par le volcanisme) peut temporairement adsorber une partie de l'aluminium, mais sous cet horizon superficiel, les horizons profonds latéritiques restent très acides et riches en Al^{3+} échangeable. Des données spécifiques sur les seuils de toxicité de l' Al^{3+} pour les cultures locales (maïs, haricot, manioc, etc.) et sur la capacité tampon réelle restent limitées, ce qui souligne la nécessité d'études complémentaires.

3. FAIBLE POUVOIR TAMPON ET ACIDIFICATION PERSISTANTE

Les sols latéritiques présentent un faible pouvoir tampon, ce qui les empêche de neutraliser les apports acides issus de la nitrification des engrais ou des dépôts atmosphériques, conduisant à une acidification chronique (Ulrich, 1986). Dans la localité de Dschang, les sols latéritiques sont caractérisés par une acidité marquée ($pH < 4,8$) et une faible capacité d'échange cationique ($CEC < 14 \text{ cmol}^+/kg$), entraînant une toxicité aluminique et des carences nutritionnelles (Sperrle *et al.*, 2022 ; Efen *et al.*, 2025).

4. FAIBLE DISPONIBILITÉ DE L'AZOTE

À ces contraintes s'ajoute une faible disponibilité de l'azote (N). Les sols latéritiques sont généralement pauvres en matière organique (moins de 2-3 % de carbone organique dans les horizons de surface cultivés), en raison d'une minéralisation rapide sous climat chaud et humide. La teneur en azote total est donc faible, et la minéralisation nette limitée, ce qui constitue une contrainte supplémentaire pour la nutrition des cultures, souvent compensée par des apports d'engrais azotés ou des légumineuses.

Ces mécanismes (fixation du P, toxicité Al, faible pouvoir tampon, faible disponibilité de N) interagissent pour verrouiller le système dans un état de faible fertilité quasi-permanente (Beauvais, 2009 ; Boulet, 1974). Ils reflètent le piège pédogénétique latéritique observé à Dschang, où minéralogie, géochimie et processus biogéochimiques contribuent au verrouillage du système (Tardy et Roquin, 1992).

Interaction des deux verrous dans le piège pédogénétique

À Dschang, la combinaison climat tropical de montagne à tonalité tempérée (précipitations annuelles ~2 355 mm, altitude ~1 400 m) et volcanisme andique participe à la formation d'un horizon A andique en surface, mais n'annule pas les contraintes profondes. Le piège pédogénétique latéritique fonctionne par l'action couplée : l'acidité solubilise Al^{3+} (toxicité racinaire), tandis que les oxydes de fer et d'aluminium fixent le phosphore. Ces deux mécanismes se renforcent mutuellement, limitant fortement la fertilité (Sanchez, 1976 ; Sposito, 1989). Les corrections conventionnelles isolées (chaulage ou apport de phosphore soluble sans amendement organique) échouent car elles ne traitent qu'un seul verrou à la fois, sans modifier l'héritage minéralogique.

4.2.3. Rôle de la lithologie mère

Dans le paradigme du piège pédogénétique latéritique, la composition minéralogique des sols de Dschang est influencée de manière significative par la nature de la roche-mère, qui influe sur l'expression des contraintes dans ces sols. Toutefois, comme le souligne notre modèle conceptuel, la lithologie n'est qu'un facteur parmi d'autres (climat, topographie, biosphère, temps) et, dans le contexte tropical humide de Dschang, aucune roche-mère ne permet de sortir complètement du piège pédogénétique : les contraintes de fixation du phosphore, de toxicité aluminique, de faible pouvoir tampon et de faible disponibilité en azote restent présentes, seules leurs intensités varient.

Influence de la roche basaltique

Les roches basaltiques, riches en fer, magnésium et calcium, donnent des sols dominés par la kaolinite, la gibbsite, la goéthite et l'hématite, avec une faible capacité d'échange cationique (CEC) et une fixation élevée du phosphore due à la lixiviation des cations basiques lors de la latéritisation (Herbillion et Nahon, 1988 ; Bonifas, 1959). Dans la localité de Dschang, les basaltes sont présents sous forme de coulées ou de petits massifs issus du volcanisme de la ligne du Cameroun. Les sols qui en dérivent (andosols ou sols brunifiés) présentent une meilleure structure et des réserves minérales initiales plus élevées que les sols sur granites, mais ils subissent néanmoins une forte fixation du phosphore et une acidification progressive sous l'effet des fortes précipitations. Ainsi, le piège pédogénétique est atténué mais pas supprimé.

Influence de la roche granitique

En revanche, les sols dérivés du granite (et des gneiss) se caractérisent par une fertilité plus faible, une acidité plus élevée et une sensibilité accrue à l'érosion, en raison de l'absence de la concentration de potassium supposée dans les nodules d'altération (Kabore *et al.*, 2020 ; Abaga *et al.*, 2023). À Dschang, le versant B de notre toposéquence est typiquement développé sur granite homogène : les sols sont acides, sableux, à très faible CEC (< 3 cmol/kg), avec une induration possible en profondeur (carapace ferrugineuse). Le piège pédogénétique y est maximal, car la faible réserve minérale en bases accélère l'acidification et la toxicité aluminique, tandis que l'absence de minéraux primaires résiduels riches en potassium rend impossible toute correction naturelle par altération.

Sur roches carbonatées

Ce type de substrat est absent à Dschang (aucune formation calcaire connue dans le secteur). La référence à Quesada *et al.* (2010) sur les sols d'Amazonie n'est pas transposable ici. Par conséquent, les sols de la région ne bénéficient pas de l'effet tampon naturel que pourraient apporter des carbonates.

Sur roches détritiques (sédiments remaniés)

Les sols développés sur matériaux colluviaux ou alluviaux (piedmonts, bas-fonds) peuvent présenter une meilleure texture et une CEC légèrement plus élevée (jusqu'à 22-25 cmol/kg) (Efeno *et al.*, 2025), mais ils restent soumis aux mêmes contraintes de fixation du P et d'acidité. Dans la localité de Dschang, ces sols occupent les positions de bas de versant (par exemple, la forêt galerie en fond de vallée). L'héritage latéritique y est souvent mélangé à des apports récents, ce qui dilue partiellement les contraintes, mais le piège pédogénétique persiste car les oxydes de fer et d'aluminium sont toujours présents en quantité suffisante.

Implications pour la gestion à Dschang

En pratique, la connaissance de la lithologie mère à Dschang (Kwekam, 2005) permet d'anticiper les différences de texture et de sensibilité à l'érosion, mais elle ne révèle pas de « potentiel caché » à activer. Les stratégies de gestion doivent donc être les mêmes sur tous les substrats : chaulage pour corriger l'acidité, apports de matière organique, et utilisation de cultures tolérantes à l'aluminium et à faible besoin en phosphore. Aucune stratégie spécifique basée sur la dissolution de minéraux primaires résiduels n'est justifiée, car dans le contexte tropical humide de Dschang, ces minéraux ont été largement lessivés ou transformés en kaolinite et oxydes. Le piège pédogénétique latéritique impose ainsi une gestion intégrée et différenciée selon la position topographique, mais pas selon un hypothétique avantage minéralogique spécifique d'une roche-mère particulière.

4.2.4. Phases amorphes, nodules et cuirasses : contraintes et réalités pédologiques

Dans le paradigme du piège pédogénétique latéritique, les phases amorphes (allophanes, ferrihydrite, imogolite) et les formes indurées (nodules ferrugineux, cuirasses) sont souvent envisagées comme des composantes pouvant influencer la fertilité. Cependant, l'analyse critique des données disponibles pour la localité de Dschang montre que ces constituants ne constituent pas une issue au piège, mais bien des contraintes supplémentaires, sauf dans des contextes très spécifiques.

Phases amorphes : présence limitée aux sols volcaniques

Dans les sols latéritiques de Dschang, la présence de phases amorphes (allophanes, ferrihydrite, imogolite) n'est pas systématique. À l'état actuel des connaissances, ces phases ne sont signalées que dans les horizons de surface à caractère andique des sols développés sur couverture volcanique (basaltes récents). Dans les sols développés sur socle cristallin (granites, gneiss), qui couvrent la majeure partie des versants de notre toposéquence, les phases amorphes sont absentes ou négligeables. Il convient donc de ne pas généraliser leur rôle bénéfique (complexation de la matière organique, amélioration de la structure) à l'ensemble des sols de Dschang.

Contraintes physiques majeures des nodules et cuirasses

Les nodules ferrugineux et les cuirasses (pétoplinthite) constituent avant tout des obstacles physiques dans le paysage de Dschang. Ils limitent la pénétration des racines, réduisent la réserve utile en eau, et favorisent le ruissellement et l'érosion, en particulier sur les fortes pentes des versants orientaux et occidentaux de la région (Bourman et Ollier, 2002 ; Podwojewski et Bourdon, 1996). La fixation du phosphore par les oxydes de fer et d'aluminium est bien documentée (Hinsinger, 2001), mais il n'a pas été démontré que les nodules ou cuirasses de Dschang contiennent des quantités significatives de cations basiques (Ca, Mg, K) ou d'oligo-éléments mobilisables. Au contraire, le lessivage intense caractéristique de la latéritisation sous climat tropical humide (2 355 mm de pluie par an) élimine ces éléments.

Absence de « réservoirs » dans les nodules et cuirasses

Contrairement à certaines hypothèses non validées, les nodules et cuirasses de Dschang ne constituent pas des « réservoirs pédogénétiques » exploitables. Aucune étude locale n'a démontré une libération lente de cations ou de phosphore à partir de ces matériaux par des processus biologiques ou chimiques. Les allophanes et la ferrihydrite, lorsqu'ils sont présents (uniquement sur les rares affleurements basaltiques de la ligne du Cameroun), peuvent effectivement complexer la matière organique et améliorer la structure (Lehmann et Kleber, 2015), mais ce cas est limité aux sols volcaniques andiques, qui ne représentent qu'une faible superficie à Dschang. Ainsi,

dans le cadre du piège pédogénétique, ces phases amorphes ne permettent pas de sortir du verrouillage général.

Gestion des contraintes :

propositions réalistes pour Dschang

Pour les Ferralsols de Dschang (développés sur granite et gneiss), la gestion doit se concentrer sur l'atténuation des contraintes chimiques et physiques, sans spéculer sur une valorisation des nodules ou cuirasses :

- Chaulage raisonné : pour corriger l'acidité et réduire la toxicité aluminique (Sumner et Noble, 2003). Cette pratique est indispensable sur le versant B (granite) où le pH est le plus bas.
- Apports de matière organique (composts, paillage, résidus de culture) : pour améliorer la CEC, la structure et la disponibilité du phosphore par compétition avec les oxydes.
- Utilisation de cultures tolérantes : espèces adaptées à l'acidité et à la faible disponibilité du P (certaines légumineuses, sorgho, etc.).
- Travail du sol limité : pour ne pas détruire la structure et ne pas exposer les horizons indurés (carapaces ferrugineuses proches de la surface sur certains sommets).
- Sur les sommets d'interfluves cuirassés, il n'est pas réaliste de « fragmenter la cuirasse » par des apports organiques ; ces zones sont mieux conservées sous forêt ou pâturages extensifs. Sur les versants, des pratiques anti-érosives (bandes enherbées, courbes de niveau) sont prioritaires.

Absence de validation des hypothèses optimistes

Aucune étude de suivi à long terme à Dschang n'a démontré une augmentation durable du pH de 0,5 à 1 point ni un triplement du P disponible uniquement par les pratiques décrites antérieurement. Les références citées (Tematio *et al.*, 2011 ; Yemefack, 2006) ne valident pas l'idée que nodules et cuirasses deviennent des réservoirs exploitables. Cette affirmation est donc retirée du présent manuscrit, car elle entretient une illusion de sortie du piège pédogénétique.

4.3. Organisation spatiale et différenciation des toposéquences

4.3.1. Gradient pédologique le long des versants

La toposéquence de Dschang représente un modèle exemplaire de l'organisation spatiale des sols latéritiques sous l'influence combinée de facteurs biogéochimiques et de processus géomorphologiques (Boulet, 1978a ; Bourgeon et Pedro, 1992). Cette différenciation topographique illustre parfaitement le concept de chronoséquence spatiale où la position dans le paysage conditionne l'intensité et la nature des processus pédogénétiques (Tardy, 1993a ; Lucas, 2001). L'analyse détaillée de cette organisation révèle une division

fonctionnelle tripartite le long des versants, chaque unité topographique développant des assemblages minéralogiques, des structures de sol et des contraintes agronomiques spécifiques.

4.3.2. Sommets et interfluves :

archives paléoenvironnementales

Caractéristiques structurales

Les sommets et interfluves de Dschang présentent des cuirasses ferrugineuses indurées d'épaisseur variable (2-8 mètres) formant une carapace continue qui fossilise le paysage (Beauvais et Chardon, 2021). L'assemblage minéralogique est dominé par l'hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) avec des teneurs atteignant 70-80 %, accompagnée de gibbsite résiduelle (Schwertmann et Taylor, 1989). La texture massive à vésiculaire, avec la présence de structures pisolithiques et vermiculaires, témoigne de conditions paléoclimatiques distinctes des actuelles (Nahon, 1991). La porosité très faible (5-15 %) limite considérablement l'infiltration et crée un régime hydrologique perché (Bourman et Ollier, 2002).

Processus géochimiques actifs

La désilication extrême, avec des rapports $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ inférieurs à 1,3, résulte d'une hydrolyse différentielle prolongée sous un climat tropical humide (Tardy, 1997). L'accumulation résiduelle différentielle du Fe et de l'Al se produit par dissolution préférentielle des silicates et exportation des cations basiques (Tardy et Nahon, 1985). La cimentation ferrugineuse procède par la précipitation des oxydes lors des cycles redox saisonniers, suivant une évolution minéralogique progressive bien établie : ferrihydrite — goethite — hématite (Schwertmann, 1988 ; Cornell et Schwertmann, 2003).

Contraintes pédologiques majeures

L'induration physique crée une barrière impénétrable à la pénétration racinaire, limitant l'exploration du profil (Maignien, 1958). La fixation intense du phosphore, avec une capacité de rétention > 500 mg P/kg, verrouille la disponibilité de cet élément essentiel (Parfitt, 1978 ; Borggaard, 1983). La faible capacité d'échange cationique ($\text{CEC} < 3 \text{ cmol}^+\text{/kg}$) résulte de la dominance minéralogique des oxydes et de la kaolinite (Juo et Franzluebbers, 2003).

4.3.3. Versants médians : interface dynamique

Dynamique pédologique complexe

Les versants médians constituent une zone de transition active caractérisée par la formation de nodules ferrugineux de taille décimétrique à centimétrique (Tardy, 1993b). Les processus de néogenèse impliquent la redistribution et la reconcentration des oxydes suivant des gradients hydriques et

redox (Schwertmann et Murad, 1983). L'alternance des phases mobiles et immobiles est finement contrôlée par les fluctuations redox saisonnières (Fendorf *et al.*, 2000). La structure des horizons montre une succession verticale caractéristique : horizons nodulaires — horizons tachetés — horizons d'altération (Bocquier, 1973).

Mécanismes de redistribution latérale

Les transferts latéraux préférentiels de colloïdes ferrugineux et alumineux sont amplifiés par la pente et l'exposition (Kretzschmar et Schäfer, 2005). Les processus de lessivage, favorisés par la texture hétérogène, conduisent à un tri minéralogique avec un enrichissement relatif en kaolinite dans les horizons supérieurs. Le remaniement biologique par l'activité racinaire et la faune du sol module significativement ces redistributions (Uroz *et al.*, 2009).

Interfaces et fronts dynamiques

Les zones de transition entre matériaux meubles et indurés représentent des interfaces biogéochimiques critiques (Beauvais, 2009). Les fronts d'altération progressent vers l'amont par le démantèlement graduel des cuirasses, suivant des cinétiques contrôlées par le climat et la bioturbation (Burke *et al.*, 2019). Les échanges bidirectionnels entre phases mobiles (solutions, colloïdes) et phases fixées (nodules, cuirasses) créent un système dynamique complexe (Do Nascimento *et al.*, 2004).

4.3.4. Bas de versants et dépressions : zones d'accumulation

Processus sédimentaires et pédogénétiques :

Les bas de versants et les dépressions accumulent un colluvium épais (1-3 mètres) d'origine mixte, combinant les produits du démantèlement des cuirasses et des apports allochtones (Fritsch *et al.*, 2011). L'enrichissement en phases argileuses montre une dominance de la kaolinite avec l'apparition de smectites dans des conditions hydromorphes localisées (Eswaran *et al.*, 1990). Des apports organiques significatifs, issus de la biomasse végétale et de l'érosion des horizons de surface, améliorent les propriétés chimiques (Wagai et Mayer, 2007). La stratification complexe archive l'histoire des dépôts et des changements environnementaux (Tardy et Roquin, 1998).

Amélioration des propriétés hydrauliques :

La capacité de rétention en eau augmente significativement (150-250 mm/m contre 80-150 mm/m sur les sommets) grâce à une meilleure structuration de la porosité (Lal et Sanchez, 1992). Le développement d'une macroporosité biologique active améliore l'infiltration et la circulation de l'air (Tisdall et Oades, 1982). Le régime hydrique plus stable atténue les stress hydriques saisonniers et permet le maintien de l'activité biologique en saison sèche (Legros, 2007 ; Sanchez, 2019).

Potentialités et contraintes agronomiques :

La fertilité chimique relative, avec une CEC pouvant atteindre 8-12 cmol⁺/kg, offre un potentiel agricole accru (Buol *et al.*, 2011). Cependant, la persistance des limitations en phosphore, malgré l'enrichissement en matière organique, nécessite des stratégies de fertilisation adaptées (Hinsinger, 2001). Les risques d'engorgement temporaire dans les dépressions fermées exigent une gestion hydrique attentive (van Breemen, 1988). La sensibilité à l'érosion lors d'événements pluvieux intenses requiert des mesures de conservation spécifiques.

5. VALIDATION LOCALE DES STRATÉGIES DE GESTION (CAS DE DSCHANG)

Les stratégies de gestion adaptées au piège pédogénétique — chaulage raisonné, apports de matière organique, cultures tolérantes, lutte anti-érosive et travail du sol limité — ne sont pas de simples recommandations théoriques issues d'une revue de littérature. Des travaux récents menés à Dschang par Efeno *et al.* (2026) en quantifient l'efficacité locale, apportant une validation empirique aux principes du paradigme proposé.

Selon cette étude, l'efficacité des stratégies varie significativement en fonction de la position topographique, reflétant la différenciation spatiale du piège pédogénétique. Sur les sommets, caractérisés par des sols superficiels et des cuirasses affleurantes, les cordons pierreux — adoptés par 40 % des agriculteurs — réduisent l'érosion de 60 % en ralentissant le ruissellement et en favorisant l'infiltration. Sur les mi-pentes, où l'érosion hydrique est la contrainte dominante, les terrasses associées à des haies vives (*Gliricidia sepium*) — adoptées par 25 % des agriculteurs — diminuent le ruissellement de 50 % et stabilisent les sols. Dans les bas-fonds, qui concentrent les colluvions et bénéficient d'une meilleure réserve hydrique, les amendements organiques (compost, fumier) — adoptés par 42 % des agriculteurs — augmentent les rendements de 35 % en améliorant la structure du sol, la rétention en eau et la disponibilité des nutriments.

Ces résultats confirment que la gestion du piège pédogénétique ne peut être uniforme : elle doit être différenciée selon la topographie, chaque unité du paysage (sommets cuirassés, versant érodé, bas-fond colluvial) nécessitant des interventions spécifiques. Les cordons pierreux sont ainsi plus adaptés aux sommets où la contrainte principale est l'érosion, tandis que les amendements organiques sont plus pertinents dans les bas-fonds où la contrainte principale est la faible fertilité chimique. Cette validation locale renforce la robustesse du paradigme du piège pédogénétique, en démontrant que les solutions conventionnelles uniformes (engrais solubles, chaulage isolé) échouent là où des approches topographiquement ciblées réussissent.

Toutefois, Efeno *et al.* (2026) soulignent un paradoxe majeur qui nuance ces résultats prometteurs : bien que ces techniques soient efficaces, elles sont abandonnées au profit de pratiques intensives (labour profond, engrais chimiques) en raison de l'insécurité foncière (affectant 78 % des agriculteurs) et de la pression pour des rendements immédiats. Ce paradoxe est illustré par le contraste entre le taux d'adoption des pratiques efficaces (25 à 42 %) et celui des engrais minéraux (85 % pour l'urée), qui contribuent pourtant à l'acidification ($\text{pH} < 4,8$) et à la dégradation structurale des sols. Par conséquent, l'efficacité technique des stratégies adaptées ne suffit pas à garantir leur adoption : celle-ci dépend également de facteurs socio-économiques et institutionnels qui dépassent le seul cadre agronomique.

Ainsi donc, les données de Dschang valident localement les principes du piège pédogénétique : les stratégies adaptées (cordons pierreux, terrasses, haies, amendements organiques) sont efficaces pour atténuer les contraintes spécifiques à chaque topographie, mais leur mise en œuvre durable nécessite une prise en compte des obstacles socio-économiques. Cette validation empirique renforce la nécessité d'une approche intégrée, combinant recommandations techniques et mécanismes institutionnels (sécurisation foncière, incitations économiques, renforcement des capacités), pour que les solutions identifiées par le paradigme puissent être effectivement adoptées par les agriculteurs.

CONCLUSION

La conceptualisation du « Piège Pédogénétique Latéritique » proposée dans cette synthèse offre un cadre unifié pour comprendre la faible fertilité persistante des sols latéritiques en région de montagne tropicale humide, illustrée par le cas de Dschang (Ouest Cameroun). Ce piège ne désigne pas un « réservoir de nutriments latent » – notion non démontrée – mais l'ensemble des contraintes physico-chimiques (héritage kaolinique-oxydique, acidité, fixation du phosphore, toxicité aluminique, faible CEC) et physiques (induration, faible profondeur utile) qui, par leurs interactions, réduisent l'efficacité des pratiques correctives conventionnelles et maintiennent les sols dans un état de faible fertilité.

L'analyse des toposéquences locales montre que ces contraintes se répartissent différemment dans le paysage : les sommets cuirassés sont des zones de blocage physique majeur, les versants médians présentent une dynamique de formation de nodules liée à la dégradation des cuirasses, et les bas de versants accumulent des matériaux plus meubles mais restent soumis au lessivage et à l'engorgement saisonnier. La lithologie mère module l'expression des contraintes, mais ne révèle aucun « potentiel caché » valorisable.

Les stratégies de gestion durable doivent donc s'appuyer sur des pratiques éprouvées : chaulage raisonné pour corriger l'acidité et réduire la toxicité aluminique, apports organiques réguliers pour améliorer la CEC et la structure, utilisation de cultures tolérantes à l'aluminium et à faible besoin en phosphore, et mesures anti-érosives adaptées à chaque unité topographique. En revanche, l'idée d'un « modèle économique circulaire » basé sur le broyage des nodules ou l'utilisation des cuirasses comme amendements ne repose sur aucune donnée locale et doit être considérée comme une hypothèse de recherche non validée.

Ce travail invite à poursuivre les recherches sur la quantification précise des contraintes, l'évaluation des pratiques de gestion intégrée, et l'étude des interactions entre cycles biogéochimiques et minéralogie dans ces environnements contraignants. Il fournit une base conceptuelle pour repenser la gestion des sols latéritiques tropicaux, non en cherchant à « activer » un potentiel inexistant, mais en adaptant les pratiques aux réalités pédologiques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs adressent leurs vifs remerciements au Pr. TEMATIO Paul pour ses judicieux commentaires sur la version initiale du manuscrit, ainsi qu'aux relecteurs anonymes dont les remarques et suggestions ont permis d'en améliorer la qualité et de consolider le cadre conceptuel de l'étude.

BIBLIOGRAPHIE

- Abaga N.O.Z., Nfoumou V., Mvoubou M. (2023). Influence of the parent rock nature on the mineralogical and geochemical composition of ferralsols used for sedentary agriculture in the Paleoproterozoic Franceville sub-basin (Gabon). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 17(4), 1778–1789. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v17i4.38>
- Acevedo-Sandoval O., Ortiz-Hernández E., Cruz-Sánchez M., Cruz-Chávez E. (2004). El papel de óxidos de hierro en suelos. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 485–497.
- Ahmad A.R., Teh G.H. (2002). Laterite revisited: mode of formation. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*. 45, 11–18. <https://doi.org/10.7186/BGSM45200202>
- Alexandre J. (2002). Les cuirasses latéritiques et autres formations ferrugineuses tropicales : Exemple du Haut Katanga méridional. Musée Royal de l'Afrique Centrale — Tervuren, Belgique *Annales, Sciences Géologiques*, Vol. 107. <https://www.kaowarsom.be/documents/ALEXANDRE.pdf>
- Ambrosi J.-P. (1990). Modélisation thermodynamique de l'altération latéritique dans le système $\text{Fe(2)O(3)} - \text{Al(2)O(3)} - \text{SiO(2)} - \text{H(2)O}$. Thèse de doctorat <http://theses.fr/1990POIT2327>
- Amorim J.V.A., Frota J.C.O., Valladares G.S., Cabral L.J.R.S., Guimarães C.C.B., Coelho R.M., de Aquino R.P. (2017). Adequabilidade do uso agrícola das terras do sertão central do Ceará (Adequability of agricultural land use on the central hinterland of Ceará). 10(1), 228–238. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20170012>

- Anand R.R., Gilkes R.J., Armitage T.M., Hilyer J.W. (1985). Feldspar weathering in lateritic saprolite. *Clays and Clay Minerals*, 33(1), 31-43. doi:10.1346/CCMN.1985.0330104
- Basile-Doelsch I., Amundson R., Balesdent J., Borschneck D., Bottero J.Y., De Junet A., Doelsch E., Legros S., Levard C., Masion A., Meunier J.-D., Rose J. (2014). Andic soils: mineralogical effect onto organic matter dynamics, organic matter effects onto mineral dynamics, or both? *Geophysical Research Abstracts*, 16 : 1 p. European Geosciences Union General Assembly, 2014-04-27/2014-05-02, Vienne (Autriche). <http://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014EGUGA..1611451B/abstract>
- Beauvais A. (2009). Ferricrete biochemical degradation on the rainforest-savannas boundary of Central African Republic. *Geoderma*, 150 (3-4), 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.02.023>
- Beauvais A., Bocquier G., Paquet H. (1991). Les Cuirasses Ferrugineuses de République Centrafricaine : Marqueurs Paléoclimatiques. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 26(1), 45-62.
- Beauvais A., Colin F. (1993). Formation and transformation processes of iron duricrust systems in tropical humid environment. *Chemical Geology*, 106(1-2), 77-101.
- Beauvais A., Mazaltari D. (1988). Etude des cuirasses latéritiques dans la région de Dembia-Zémio en Centrafrique. Pétrographie, minéralogie et géochimie. Study of lateric ferricretes in Dembia-Zémio area, Centrafrique. Petrography, mineralogy and geochemistry. *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, 41(1), 47-69. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes/15-08/27777.pdf
- Bhalerao S.A., Prabhu D.V. (2013). Aluminium toxicity in plants—a review. *Journal of Applicable Chemistry*, 2(3), 447-474.
- Bilong P. (1992). Caractères des sols ferrallitiques à plinthite et à pétroplinthite développés sur roches acides dans la zone forestière du sud du Cameroun Comparaison avec les sols développés sur roches basiques. *Cahiers ORSTOM.Série Pédologie*, 27(2), 203-224. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/cahiers/PTP/41460.PDF
- Bitom D. (1988). Organisation et évolution d'une couverture ferrallitique en zone tropicale humide (Cameroun) : genèse et transformation d'ensembles ferrugineux indurés profonds. <http://www.theses.fr/1988POIT2327>
- Bitom D., Volkoff B. (1993). Altération déferuginisante des cuirasses massives et formation des horizons gravillonnaires ferrugineux dans les sols de l'Afrique centrale humide. *Compt. Rend. Acad. Sci., Paris*, 316, 1447-1454. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/b_fdi_33-34/38499.pdf
- Bockheim J.G. (2014). Soils with Plinthite In: *Soil Geography of the USA*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06668-4_25
- Bocquier G. (1973). Génèse et Évolution de Deux Toposéquences de Sols Tropicaux du Tchad. Interprétation Biogéodynamique. [Mémoire ORSTOM No. 62]. ORSTOM. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_2/memoires/05969.pdf
- Bonifas M. (1959). Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. Mémoires du service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine N°17. Université de Strasbourg. 159 pp. https://www.persee.fr/doc/sgeol_0080-9020_1959_mon_17_1
- Borggaard O.K. (1983). Effect of Surface Area and Mineralogy of Iron Oxides on their Surface Charge and Anion-Adsorption Properties. *Clays Clay Miner.* 31, 230-232 (1983). <https://doi.org/10.1346/CCMN.1983.0310309>
- Borilli S.P., Martins C.B., Roncato B., Migueli A.K., Lange M.C. (2013). Efetividade na aplicação de novas técnicas ea permanência no meio rural: um estudo das propriedades familiares dos alunos do Colégio Agrícola Estadual de Toledo. *Rev. Ciênc. Empres. UNIPAR, Umuarama*, v. 14, n. 1, p. 83-109
- Boulet (1974). Toposéquences de Sols Tropicaux en Haute-Volta : Équilibres Dynamiques et Bioclimats [Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg].
- Boulet R. (1978a). Toposéquences de Sols Tropicaux en Haute-Volta. Équilibre et déséquilibre pédobioclimatique.
- Boulet R. (1978b). Existence de systèmes à forte différenciation latérale en milieu ferrallitique guyanais : un nouvel exemple de couvertures pédologiques en déséquilibre. *Science du Sol*, 2, 75-92.
- Bourgeon G., Gunnell Y. (1998). Evolution des continents, géographie des sols et potentialités globales. In : *Congrès mondial des sciences du sol = World congress of soil science = Congreso mundial de la ciencia del suelo*. AISS ; AFES. Montpellier : CIRAD, 2 p. Congrès Mondial de Science du Sol. 16, Montpellier, France, 20 Août 1998/26 Août 1998. <https://agritrop.cirad.fr/391454/>
- Bourgeon G., Pédro G. (1992). Rôle majeur du drainage climatique dans la différenciation altéritique et pédologique des sols des régions chaudes. Exemple du passage sols fersiallitiques-sols ferrallitiques au Sud du Karnataka (Inde). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre*, 314 : 717-725.
- Bourman R.P., Ollier C.D. (2002). A Critique of the Schellmann Definition and Classification of Laterite. *Catena* 47(2), 117-131. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00178-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00178-3)
- Boyer J. (1982). Les sols ferrallitiques : facteurs de fertilité et utilisation des terres. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 19(4), 285-299.
- Bridges E.M., Batjes N.H. (1996). Soil gaseous emissions and global climate change. *Geography*, 81(4), 155-169. <https://doi.org/10.1080/20436564.1996.12452541>
- Buchanan F. (1807). A Journey from Madras through the Countries of Mysore, Canara, and Malabar. Volume 2. East India Company. 599 pages. <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.31946>
- Budihal R., Pujar G. (2018). Major and Trace Elements Geochemistry of Laterites from the Swarnagadde Plateau, Uttar Kannada District, Karnataka, India. *Journal of Geosciences and Geomatics*. 6(1), 12-20. <http://pubs.sciepub.com/jgg/6/1/2>
- Buol S.W., Southard R.J., Graham R.C., McDaniel P.A. (2011). *Soil Genesis and Classification* (6th ed.). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9780470960622>
- Chandra P., Enespa (2019). Soil-microbes-plants: Interactions and ecological diversity. In: Varma A., Tripathi S., Prasad R. (eds) *Plant Microbe Interface*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19831-2_6
- Cooper M.W., Brown M.E., Niles M.T., El Qadi M.M. (2020). Text mining the food security literature reveals substantial spatial bias and thematic broadening over time. *Global Food Security* 26, 100392. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100392>
- Cornell R.M., Schwertmann U. (2003). *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses* (2nd ed.). Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/3527602097>
- Delhaize E., Ryan P.R. (1995). Aluminum Toxicity and Tolerance in Plants. *Plant Physiology*, 107(2), 315-321. <https://doi.org/10.1104/PP.107.2.315>
- Do Nascimento G.M., Constantino V.R., Landers R., Temperini M.L. (2004). Aniline polymerization into montmorillonite clay: a spectroscopic investigation of the intercalated conducting polymer. *Macromolecules*, 37(25), 9373-9385.
- Doolittle J.A., Daigle J.J., Kelley J.A., Tuttle J.W. (2005). Using GPR to Characterize Plinthite and Ironstone Layers in Ultisols. *Soil Survey Horizons*, 46: 179-184. <https://doi.org/10.2136/sh2005.4.0179>
- Driessen P.M., Deckers J.A. (2001). Lecture notes on the major soils of the world. FAO. <http://www.fao.org/3/y1899e/y1899e00.htm>
- Duchaufour P. (2001). *Introduction à la science du sol : sol, végétation, environnement*. 6e édition. Dunod. 488 pages.
- Efeno L.L.E., Tamfuh P.A., Kome G.K., Ibrahim A., Enang R.K., Wouatong A.L.S. (2025). Soil characteristics, taxonomy and land suitability of a lateritic mantle for rain-fed maize (*Zea mays*) agriculture in the Cameroon Western Highlands. *African Journal of Agricultural Research*, 21(2), 147-161. <https://doi.org/10.5897/AJAR2025.16856>
- Efeno L.L.E., Tamfuh P.A., Mushagalusa A.B., Ibrahim A., Mazinga M.K., Ilonga S.B., Wouatong A.L.S. (2026). Agricultural resilience in west

- cameroon: Strategies for adapting to the challenges of lateritic soils and climate change. *Soil Security*, 22, 100220. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2025.100220>
- Eswaran H., De Coninck F., Varghese T. (1990). Role of Plinthite and Related Forms in Soil Degradation. In: Lal, R., Stewart, B.A. (eds) *Advances in Soil Science*. *Advances in Soil Science*, vol 11. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3322-0_3
- Eswaran H., Kimble J., Cook T., Beinroth F.H. (1992). Soil Diversity in the Tropics: Implications for Agricultural Development. In *Myths and Science of Soils of the Tropics* (eds R. Lal and P.A. Sanchez). <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub29.c1>
- Eze P.N., Udeigwe T.K., Meadows M.E. (2014). Plinthite and Its Associated Evolutionary Forms in Soils and Landscapes: A Review. *Pedosphere*. 24(2), 153–166. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(14\)60002-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60002-3)
- Fallavier P., Babre D., Aventurier A., Bartoli F., Philipp R. (1988). Caractérisation et évolution du statut de l'aluminium des sols tropicaux acides. Comptendu de fin d'étude d'une recherche financée par le Ministère de la Recherche et de la Technologie. Décision d'aide n. 85.L.0911. Montpellier : CIRAD-GERDAT, 105 p.
- FAO (2006). World Reference Base for Soil Resources 2006. FAO. <http://www.fao.org/3/a-a0510e.pdf>
- Farina M.P.W., Channon P. (1988). Acid-subsoil amelioration: I. A comparison of several mechanical procedures. *Soil Science Society of America Journal*, 52(1), 169-175. <https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200010030x>
- Fendorf S.E., Wielinga B.W., Hansel C.M. (2000). Redox Processes and Biogeochemical Interactions in the Soil Environment. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 70, pp. 1-56). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(01\)70007-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(01)70007-4)
- Fermor L.L. (1911). What is laterite? *Geological Magazine*, 8 (10), 454-462. <https://doi.org/10.1017/S0016756800116619>
- Ferrara G., Farrag K., Brunetti G. (2012). The effects of rock fragmentation and/or deep tillage on soil skeletal material and chemical properties in a Mediterranean climate. *Soil use and management*, 28(3), 394-400. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00423.x>
- Ferry B., Freycon V., Paget D. (2003). Genèse et fonctionnement hydrique des sols sur socle cristallin en Guyane. *Revue forestière française*, 55(sp), 37-59. <https://hal.science/hal-03449385v1/document>
- Friesen D.K., Juo A.S.R., Miller M.H. (1982). Residual value of lime and leaching of calcium in a kaolinitic Ultisol in the high rainfall tropics. *Soil Science Society of America Journal*, 46(6), 1184-1189. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600060013x>
- Fritsch E., Morin G., Bedidi A., Bonnin D., Balan E., Caqueneau S., Calas G. (2011). Lateritic and Bauxitic Materials. In G.J.H. McCall (Ed.), *Encyclopedia of Geochemistry* (pp. 1-10). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4496-0_183
- Fritsch E., Valentin C., Morel B., Leblond P. (1990). La couverture pédologique : interactions avec les roches, le modelé et les formes de dégradation superficielles. Structure et fonctionnement d'un petit bassin versant, 31-57.
- Furian S. (1994). Morphogenese pedogenese en milieu tropical humide de la serra do mar, bresil : contribution de l'alteration a une dynamique active de glissement. Thèse de doctorat. <http://www.theses.fr/1994CAEN1155>
- Gaviria S. (1993). Évolution minéralogique et géochimique du fer et de l'aluminium dans des sols ferrallitiques hydromorphes des Llanos orientales de Colombie (Doctoral dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy 1).
- Gebhardt H. (1976). Bildung und Eigenschaften amorpher Tonbestandteile in Böden des gemäßigt-humiden Klimabereichs. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 139(1), 73-89.
- Ghosh S., Guchhait S.K. (2019). Geochemical properties and lateritization processes. In *Laterites of the Bengal Basin: Characterization, Geochronology and Evolution* (pp. 83-94). Cham : Springer International Publishing.
- Gigou J. (1996). La dynamique de la matière organique et de l'azote dans les sols tropicaux des zones humides et très humides. In : Pichot Jean-Pascal (ed.), Sibelet Nicole (ed.), Lacoëuilhe Jean Joseph (ed.). *Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides : actes*. Montpellier : CIRAD-SAR, p. 194-206. (Colloques). Séminaire Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides, 1995-11-13/1995-11-17, Montpellier (France).
- Haynes R.J. (2014). A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(6), 831-844. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400202>
- Heller B., Gautheron C., Morin G., Allard T. (2022). Reading the Climate Signals Hidden in Lateritic Iron Duricrusts. In *Geological Society of America Abstracts* (Vol. 54, p. 378923). <https://doi.org/10.1130/abs/2022AM-378923>
- Herbillion A.J., Nahon D. (1988). Laterites and Laterization Processes In: Stucki, J.W., Goodman, B.A., Schwertmann, U. (eds) *Iron in Soils and Clay Minerals*. NATO ASI Series, vol 217. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4007-9_22
- Herrmann L., Anongrak N., Zarei M., Schuler U., Spohrer K. (2007). Factors and processes of gibbsite formation in Northern Thailand. *Catena*, 71(2), 279-291. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.01.007>
- Hinsinger P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes : A review. *Plant and Soil*. 237. 173-195. [10.1023/A:1013351617532](https://doi.org/10.1023/A:1013351617532)
- Hue N. (2022). Soil Acidity : Development, Impacts, and Management. In: Giri B., Kapoor R., Wu Q.S., Varma A. (eds) *Structure and Functions of Pedosphere*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8770-9_5
- Indriyati L.T., Nugroho B., Hazra F. (2023). Detoksifikasi Aluminium dan Ketersediaan Fosfor dalam Tanah Masam Melalui Aplikasi Bahan Organik. *Indonesian Journal of Agricultural Sciences/Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 28(1), 10. <https://doi.org/10.18343/jipi.28.1.10>
- IUSS Working Group WRB (2022). World Reference Base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria
- Jamet R. (1986). Les oxydisols de la Polynésie française : caractérisation et fertilité. *Cah. ORSTOM, série Pédologie* vol. XXII, no 3. 1986 : 285-299. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/cahiers/PTP/26011.PDF
- Juo A.S.R., Franzluebbers K. (2003). *Tropical Soils: Properties and Management for Sustainable Agriculture*. (New York ; online edn, Oxford Academic, 12 Nov. 2020). <https://doi.org/10.1093/oso/9780195115987.001.0001>
- Kabore F., Hien E., Mare T.B., Ouattara K., Zombré P. (2020). Caractéristiques morpho-pédologiques et potentialités agricoles de sols développés sur roches dolomitiques dans le bassin de Taoudéni au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14(6), 2333-2351. <https://doi.org/10.4314/IJBCS.V14I6.32>
- Kengni L., Tekoudjou H., Tematio P., Pamo T.E., Tankou C.M., Lucas Y., Probst J.L. (2009). Rainfall variability along the southern flank of the Bambouto mountain (West-Cameroon). *Journal of the Cameroon academy of sciences*, 8(1), 45-52.
- Kleber M., Mikutta R., Torn M.S., Jahn R. (2005). Poorly crystalline mineral phases protect organic matter in acid subsoil horizons. *European Journal of Soil Science*, 56(6), 717-725. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00706.x>
- Kochian L.V., Piñeros M.A., Liu J., Magalhaes J.V. (2015). Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. *Annual review of plant biology*, 66, 571-598. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043014-114822>
- Kretzschmar R., Schäfer T. (2005). Metal Retention and Transport on Colloidal Particles in the Environment. *Elements*, 1(4), 205-210. <https://doi.org/10.2113/gselements.1.4.205>

- Krstic D., Djalovic I., Nikezic D., Bjelic D. (2012). Aluminium in acid soils: chemistry, toxicity and impact on maize plants. Food production—approaches, challenges and tasks, 13, 231-242. <https://doi.org/10.5772/33077>
- Kryzevicius Z., Karcauskiene D., Álvarez-Rodríguez E., Zukauskaitė A., Slepeliene A., Volungevicius J. (2019). The effect of over 50 years of liming on soil aluminium forms in a Retisol. The Journal of Agricultural Science, 157(1), 12-19. <https://doi.org/10.1017/S0021859619000194>
- Kumar B., Sarkar N.C., Maity S., Maiti R. (2019). Effect of different levels of Sulphur and boron on the growth and yield of sesame under red-laterite soils. Research on Crops, 20, 515–524. <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2019.074>
- Kwekam M. (2005). Géologie et géochimie des formations plutoniques et métamorphiques de la région de Dschang (Ouest-Cameroun). Thèse de Doctorat, Université de Yaoundé I, 245 p.
- Lal R., Sanchez P.A. (eds.) (1992). Myths and Science of Soils of the Tropics. Soil Science Society of America. Book Series:SSSA Special Publications. 10.2136/sssaspecpub29
- Latham M. (1975). Les sols d'un massif de roches ultrabasiques de la côte ouest de Nouvelle Calédonie : le Boulinda : 2ème partie. Les sols à accumulation ferrugineuse relative. Cahiers ORSTOM. Série Pédologie, 13(2), 159–172. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:18520>
- Laço A., Berbecea A., Laço I., Crista F., Crista L., Sala F., Radulov I. (2025). Mitigating Soil Acidity: Impact of Aglime (CaCO₃) Particle Size and Application Rate on Exchangeable Aluminium and Base Cations Dynamics. Sustainability, 17(18), 8135. <https://doi.org/10.3390/su17188135>
- le Roux P.A.L., du Preez C.C. (2006). Nature and distribution of South African plinthic soils: Conditions for occurrence of soft and hard plinthic soils. The South African Journal of Plant and Soil, 23(2), 120–125. <https://doi.org/10.1080/02571862.2006.10634741>
- Legros J.-P. (2007). Les Grands Sols du Monde. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Lehmann J., Kleber M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. Nature 528, 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Lelong Y. (1967). Détermination quantitative par voie chimique des constituants minéralogiques de produits argileux d'altération tropicale. Bulletin du Groupe français des Argiles, 19(1), 49–67. <https://doi.org/10.3406/ARGIL.1967.1062>
- Leprun J.C. (1977). IV. La dégradation des cuirasses ferrugineuses. Etude et importance du phénomène pédologique en Afrique de l'Ouest. Sciences Géologiques, bulletins et mémoires, 30(4), 265-273.
- Lucas Y. (2001). The Role of Plants in Controlling Rates and Products of Weathering: Importance of Biological Pumping. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 29(1), 135-163. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.29.1.135>
- Lucas Y., Nahon D., Cornu S., Eyrolle F. (1996). Genèse et fonctionnement des sols en milieu équatorial. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série 2a : Sciences de la Terre, 322 (1), p. 1-16
- Maignien R. (1958). Le Cuirassement des Sols en Guinée [Mémoire Service Carte Géologique Alsace-Lorraine No. 16]. Service Carte Géologique Alsace-Lorraine.
- Marcelino V., Stoops G., Schaefer C.E. (2010). Oxidic and related materials: Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths, Pages 305-327. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53156-8.00014-3>
- Martin D., Volkoff B. (1990). Signification paléoclimatique des cuirasses et des nappes de nodules ferrugineux dans les sols d'Afrique centrale (rive droite du Zaïre). Géodynamique de la surface. Les paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique. Orstom, Paris, 129-135. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes/11-10/34778.pdf
- Martin F.J., Doyné H.C. (1927). Laterite and lateritic soils in Sierra Leone. The Journal of Agricultural Science, 17(4), 530-547. <https://doi.org/10.1017/S0021859600018815>
- Martins A.P.B., Santos G.G., de Oliveira V.Á., Maranhão D.D.C., Collier L.S. (2018). Reversibility of the Hardening Process of Plinthite and Petrolinthe in Soils of the Araguaia River Floodplain under Different Treatments. Revista Brasileira De Ciencia Do Solo, 42. <https://doi.org/10.1590/18069657RBCS20170191>
- Mathew A.M., Rani B. (2023). Subsoil Acidity Amelioration for Improved Soil Productivity. International Journal of Environment and Climate Change, 13(10), 2573–2580. <https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i102923>
- Modenesi M.C., de Toledo M.C.M. (1993). Morfogenese quaternária e intemperismo: colúvios do Planalto do Itatiaia. Revista do Instituto Geológico (Descontinuada), 14(1), 45-53. <https://doi.org/10.5935/0100-929X.19930004>
- Modenesi-Gauttieri M.C., de Toledo M.C.M., Hiruma S.T., Taioli F., Shimada H. (2011). Deep weathering and landscape evolution in a tropical plateau. Catena, 85(3), 221–230. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2011.01.006>
- Moreau R. (1996). Modifications morphologiques d'un sol ferrallitique de Côte d'Ivoire sous différents modes de mise en culture. 11 pp.
- Mukalay J.B., Meersmans J., Wellens J., Sikuzani Y.U., Mukonzo E.K.L., Colinet G. (2026). Soil fertility and maize response to subsoil deep tillage and termite mound amendments in strongly weathered plinthic soils. Geoderma Regional, e01066. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2026.e01066>
- Muñoz M.A., O'Hallorans J.M., Lugo W.I. (2022). Chemical and mineralogical properties of Guanajibo clay (Plinthic Kandiodults). Journal of Agriculture of The University of Puerto Rico, 106(1), 71-89. <https://doi.org/10.46429/jaupr.v106i1.21055>
- Nahon D.B. (1991). Introduction to the Petrology of Soils and Chemical Weathering. Wiley-Interscience. 336 pages
- O'Brien F.J.M., Almaraz M., Foster M.A., Hill A.F., Huber D.P., King E.K., Langford H., Lowe M.A., Micken B.S., Miller V.S., Moore O.W., Mathes F., Gleeson D., Leopold M. (2019). Soil salinity and pH drive soil bacterial community composition and diversity along a lateritic slope in the Avon River critical zone observatory, Western Australia. Frontiers in Microbiology 10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01486>
- Ofem K.I., John K., Ediene V.F., Kefas P.K., Ezeaku V.I., Pawlett M. (2023). Pedological data for the study of soils developed over a limestone bed in a humid tropical environment. Environmental Monitoring and Assessment, 195(5), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11229-2>
- Oliver R., Letourmy P. (1992). Rôle respectif des différentes fractions granulométriques d'un sol dans ses propriétés physico-chimiques : mise au point d'une méthode non destructive. L'Agronomie Tropicale (1975), 46 (1) : 41-50.
- Oluwatoshin G.A., Are K.S., Adeyolu O.D., Idowu O.J. (2020). Characteristics and agricultural potential of soils with plinthic materials in the savanna ecology of south western Nigeria. Archives of Agronomy and Soil Science, 66(13), 1794–1811. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1696017>
- Omokaro G.O., Osarhiemen I.O., Idama V., Airueghian E.O., West S.T., Igbigbi F.E., Nnake D.C., Obolokor E., Ahmed A., Omoshie V.O. (2024). The role of organic amendments and their impact on soil restoration: A review. Asian Journal of Environment & Ecology, 23(11), 41-52. <https://doi.org/10.9734/ajeel/2024/v23i11620>
- Pal D.K. (2016). Importance of Pedology of Indian tropical soils in their Edaphology. In A Treatise of Indian and Tropical Soils (pp. 153-174). Cham: Springer International Publishing.
- Parfitt R.L. (1978). Anion Adsorption by Soils and Soil Materials. Advances in Agronomy (Vol. 30, pp. 1-50). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60702-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60702-6)
- Parfitt R.L., Atkinson R.J. (1976). Phosphate adsorption on goethite (α-FeOOH). Nature 264, 740–742 (1976). <https://doi.org/10.1038/264740a0>
- Pereira J.S. (2017). Pedogênese e morfogênese na superfície de São José dos Ausentes (RS) no quaternário tardio: evidências em paleofundo de vale na bacia hidrográfica do rio dos Touros. http://tede.unioeste.br/bitstream/tede/2980/5/Josielle_Pereira_2017.pdf

- Pereira-De-Oliveira L., Macedo L., Neto J., Santos D., Silva H. (2019). Viability of lateritic soil as alkaline activated precursor. MATEC Web Conf. 274, 01004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927401004>.
- Perkins H.F., Lawrence B. (1982). Sesquioxide segregation in plinthic and nonplinthic counterpart soils. Soil Science, 133(5), 314-318.
- Podwojewski P., Bourdon E. (1996). Induration and physical degradation of lateritic soils. Soil Science, 161(9), 587-599.
- Ponge J.F. (1999). Biodégradation des sols forestiers : causes et remèdes. La Forêt Privée-revue forestière européenne, 248, 55-60. https://hal.science/hal-00504089v1/file/BIODEGRADATION_DES_SOLS_FORESTIERS.pdf
- Prasetyo B.H., Suharta N., Subagyo H., Hikmatullah H. (2016). Chemical and mineralogical properties of ultisols of sasamba area, east kalimantan. Indonesian Journal of Agricultural Science, 2(2), 37-47. <https://doi.org/10.21082/IJAS.V2N2.2001.P37-47>
- Quantin C., Becquer T. (2025). Tropical Soils and Sustainable Management. In Agricultural Soil Science (eds Y. Coquet et J. Michelin). pp. 249-271. <https://doi.org/10.1002/9781394361809.ch9>
- Quesada C.A., Lloyd J., Anderson L.O., Fyllas N.M., Schwarz M., Czimczik C.I. (2010). Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. Biogeosciences, 8, 1415-1440. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1415-2011>
- Rahman R., Upadhyaya H. (2021). Aluminium Toxicity and Its Tolerance in Plant: A Review. Journal of Plant Biology, 64(2), 101-121. <https://doi.org/10.1007/S12374-020-09280-4>
- Regasa A., Haile W., Abera G. (2025). Synergistic Effects of Lime with Organic and Inorganic Fertilizers on Soil Acidity and Crop Productivity. Journal of Chemical, Environmental and Biological Engineering. Volume 9, Issue 2. <https://doi.org/10.11648/j.jcebe.20250902.14>
- Reintam L., Lang V. (1999). The progress of pedogenesis within areas of prehistoric agriculture. International Conference on Parallel Architectures and Compilation Techniques, 415-431.
- Saha B., Chowdhara B., Chowra U., Kumar Panda C. (2022). Aluminum Toxicity and Ionic Homeostasis in Plants, in: Response of Field Crops to Abiotic Stress. CRC Press, Boca Raton, pp. 79-90. <https://doi.org/10.1201/9781003258063-7>
- Sanchez P.A. (1976). Properties and Management of Soils in the Tropics. Wiley-interscience publications. John Wiley and son, New York. 618 pp.
- Sanchez P.A. (2019). Properties and Management of Soils in the Tropics (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316809785>
- Sanchez P.A., Buol S.W. (1975). Soils of the Tropics and the World Food Crisis. Science, 188(4188), 598-603. <https://doi.org/10.1126/science.188.4188.598>
- Sarazin G., Michard G., Nahon D. (1982). Chemical equilibria in ferrallitic soils of Cameroon. Geochimica et Cosmochimica Acta, 46(11), 2107-2115
- Schwertmann U. (1988). Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments. In: Stucki J.W., Goodman B.A., Schwertmann U. (eds) Iron in Soils and Clay Minerals. NATO ASI Series, vol 217. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4007-9_11
- Schwertmann U., Murad E. (1983). Effect of pH on the formation of goethite and hematite from ferrihydrite. Clays and Clay Minerals, 31(4), 277-284. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1983.0310405>
- Schwertmann U., Taylor R.M. (1989). Iron oxides. In Minerals in Soil Environments (eds J.B. Dixon and S.B. Weed). <https://doi.org/10.2136/sssabookser1.2ed.c8>
- Ségalen P. (1993). Les sols ferrallitiques : une synthèse. Cahiers ORSTOM, Série Pédologie, Volume XXVIII, N°2, 215-226 pp.
- Smaill S.J., Clinton P.W., Allen R.B., Davis M.R. (2014). New evidence indicates the coarse soil fraction is of greater relevance to plant nutrition than previously suggested. Plant and soil, 374(1), 371-379.
- Smithson P.C., Giller K.E. (2002). Appropriate farm management practices for alleviating N and P deficiencies in low-nutrient soils of the tropics. Plant and Soil, 245(1), 169-180. <https://doi.org/10.1023/A:1020685728547>
- Smithson P.C., Sanchez P.A. (2001). Plant nutritional problems in marginal soils of developing countries. In Plant nutrient acquisition: New perspectives (pp. 32-68). Tokyo: Springer Japan.
- Soil Survey Staff (2014). Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C.
- Sperrle F., Ceneda D., El-Assady M. (2022). Lotse: A practical framework for guidance in visual analytics. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 29(1), 1124-1134.
- Sposito G. (1989). The Chemistry of Soils. Third Edition (New York, 2016; online edn, Oxford Academic, 12 Nov. 2020), <https://doi.org/10.1093/oso/9780190630881.001.0001>
- Sumner M.E., Noble A.D. (2003). Soil acidification: the world story. In Handbook of Soil Acidity (pp. 1-28). Marcel Dekker.
- Tardy Y. (1993a). Climats, paléoclimats et biogéodynamique du paysage tropical. Coll. Sédimentologie et Géochimie de la Surface, 141-175. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/2024-03/010031729.pdf
- Tardy Y. (1993b). Pétrologie des latérites et des sols tropicaux. Paris : Masson, 459 p. ISBN 2-225-84176-4
- Tardy Y. (1997). Petrology of Laterites and Tropical Soils. AA Balkema, Rotterdam, 408 p. Tardy Y., Mazaltari D., Boeglin J.-L., Roquin C., Pion J.-C., Paquet H., Millot G. (1988). Lithodépendance et homogénéisation de la composition minéralogique et chimique des cuirasses ferrugineuses latéritiques. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 307, Série II, p. 1765-1772. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_18-19/26119.pdf
- Tardy Y., Nahon D. (1985). Geochemistry of laterites, stability of Al-goethite, Al-hematite, and Fe (super 3+) - kaolinite in bauxites and ferricretes; an approach to the mechanism of concretion formation. American Journal of Science, 285(10). <https://doi.org/10.2475/ajs.285.10.865>
- Tardy Y., Roquin C. (1992). Geochemistry and evolution of lateritic landscapes. In Weathering, Soils and Paleosols (pp. 407-443). Elsevier. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/b_fdi_33-34/37560.pdf
- Tardy Y., Roquin C. (1998). Dérive des continents, paléoclimats et altérations tropicales. Editions BRGM.
- Tardy Y., Roquin C. (2000). Dérive des continents : paléoclimats et distribution des couvertures pédologiques tropicales (Continental drift: paleoclimates and distribution of the pedological tropical covers). Bulletin de l'Association de Géographes Français 77(4), 373-383. <https://doi.org/10.3406/BAGF.2000.2185>
- Tematio P., Tsafack E.I., Kengni L. (2011). Effects of tillage, fallow and burning on selected properties and fertility status of Andosols in the Mounts Bambouto, West Cameroon. Agricultural Science 2. 334-340.. doi:10.4236/as.2011.23044
- Tisdall J.M., Oades J.M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. Journal of Soil Science, 33(2), 141-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>
- Torrent J., Barrón V. (2002). Diffuse reflectance spectroscopy of iron oxides. Encyclopedia of surface and Colloid Science, 1, 1438-1446.
- Torres L.A.T., González-Pedraza A.F., Castellanos González L. (2024). Impacto de diferentes prácticas agrícolas sobre las características físicoquímicas del suelo: un análisis crítico. Revista Ambiental. Agua. Aire y Suelo, 15(1), 90-105. <https://doi.org/10.24054/raaas.v15i1.2916>
- Ulrich B. (1986). Natural and anthropogenic components of soil acidification. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 149(6), 702-717. <https://doi.org/10.1002/jpln.19861490607>
- Uroz S., Calvaruso C., Turpault M.P., Frey-Klett P. (2009) Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms. Trends in Microbiology, 17(8), 378-387. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2009.05.004>
- USDA (1975). Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Washington DC, 745.

- Valentin C., Fritsch E., Planchon O. (1987). Sols, surfaces et formes d'érosion linéaire en milieu ferrallitique de savane : l'exemple d'un bassin versant du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. 67-81. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_20-21/27135.pdf
- Van Breemen N. (1988). Effects of seasonal redox processes involving iron on the chemistry of periodically reduced soils. In: Stucki, J.W., Goodman, B.A., Schwertmann, U. (eds) *Iron in Soils and Clay Minerals*. NATO ASI Series, vol 217. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4007-9_23
- Van Breemen N., Mulder J., Driscoll C.T. (1983). Acidification and alkalinization of soils. *Plant and Soil*, 75(3), 283-308.
- Vanwalleghe T., Stockmann U., Minasny B., McBratney A.B. (2013). A quantitative model for integrating landscape evolution and soil formation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(2), 331-347. <https://doi.org/10.1029/2011JF002296>
- Varjão A.F.D.C., Gilkes R.J., Hart R.D. (2002). Amorphous aluminosilicate materials in a Brazilian hydromorphic lateritic soil. *Australian Journal of Soil Research*, 40(3), 465-481. <https://doi.org/10.1071/SR00008>
- Velde B.B., Meunier A. (2008). *The origin of clay minerals in soils and weathered rocks*. Springer Science & Business Media. 420 pp.
- Verboom W.H., Pate J.S. (2006). Evidence of active biotic influences in pedogenetic processes. Case studies from semiarid ecosystems of south-west Western Australia. *Plant and Soil*, 289(1), 103-121. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9075-6>
- Vilar C.C., Costa A.C.S.D., Hoepers A., Souza Junior I.G.D. (2010). Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(4), 1059-1068.
- Von Uexküll H.R., Mutert E. (1995). Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant and soil*, 171(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/BF00009558>
- Wagai R., Mayer L.M. (2007). Sorptive stabilization of organic matter in soils by hydrous iron oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(1), 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.08.047>
- Walther J. (1889). Bericht über die Resultate einer Reise nach Ostindien im Winter 1888/89.
- Wei T., Sahu S.K., Rahman H., Samineni S., Singh R.K., Becerra López-Lavalle L.A. (2025). Beyond Crop Hotspots: Why Overlooked Marginal Agricultural Lands Deserve Urgent Attention. *Modern Agriculture*, 3(2). <https://doi.org/10.1002/moda.70028>
- Whitney N., Zabowski D. (2004). Total soil nitrogen in the coarse fraction and at depth. *Soil Science Society of America Journal*, 68(2), 612-619.
- Wild B., Daval D. (2025). L'altération des roches par le vivant. In: *Les interactions entre la géosphère et la biosphère* (pp.7-49). <https://doi.org/10.51926/iste.9203.ch1>
- Wisawapipat W., Kheoruenromne I., Suddhiprakarn A., Gilkes R. (2010). pH dependent charge and phosphate sorption by Thai Kandiodox. 97-100. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20113309885>
- Xiao H., Wang Z. (2006). Advance on study of aluminum toxicity and plant nutrition in acid soils. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, Vol. 19, No. 6, 1180-1188 ref. 82.
- Yemefack M. (2006). Modeling and monitoring soil and land use dynamics within shifting agricultural landscape mosaic systems in southern Cameroon. PhD Thesis, University of Amsterdam.
- Yoboue K.E., Kouakou C.H., Akotto O.F., Yao-Kouame A. (2019). Etude des variations des teneurs de quelques oxydes de deux types de sols à plinthites observés à Yébouékro (Djékanou) dans le centre-sud de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13(2), 1180-1192. <https://doi.org/10.4314/IJBCS.V13I2.46>
- Zannah T.I., Jusop S., Ishaq F.C., Roslan I. (2016). FTIR and XRD analyses of highly weathered Ultisols and Oxisols in Peninsular Malaysia. *Asian Journal of Agriculture and Food Sciences*, 4(4). <http://psasir.upm.edu.my/id/eprint/54355/>