LES RELIEFS URBAINS DU NORD DE LA COTE D'IVOIRE : ENTRE RIGIDITE A DISTANCE ET VULNERABILITE DE FAIT A L'EROSION HYDRIQUE

KAMBIRE SAMBI, *Université Peleforo Gon Coulibaly de Korhogo, Côte d'Ivoire*
Mail : kambire_sambi@yahoo.fr

Résumé

Les sites des villes du Nord de la Côte d'Ivoire sont parmi les environnements des plus dynamiques. L'horizon superficiel armé de la cuirasse ferrugineuse est le caractère fondamental des reliefs. Cependant, les villes du septentrion ivoirien sont particulièrement sujettes à l'érosion hydrique, bien au-delà de ses zones classiques des bordures océaniques.
On peut alors chercher à savoir les modalités de l'action mécanique de l'érosion aux dépens des modelés cuirassés urbains du Nord ivoirien et selon quelle intensité.
Les résultats obtenus le sont à partir de l'observation des processus morphogéniques en cours et d'un réseau de parcelles expérimentales aménagées sur les versants orthotypes des reliefs des villes étudiées. Ils indiquent que les eaux de ruissellement et de résurgence constituent la source d'énergie principale responsable de l'érosion et de l'évolution de la morphologie des reliefs cuirassés urbains du Nord du pays et que le phénomène érosif et les risques d'érosion climatiques tiennent toujours de l'intensification d'une agressivité naturelle due à la pente topographique.

Mots-clés : *Villes, Nord, Côte d'Ivoire, érosion.*

Abstract

The sites of towns in the north of Côte d'Ivoire are among the most dynamic environments. The superficial horizon armed with the ferruginous cuirass is the fundamental character of the reliefs. However, the towns of northern Ivory Coast are particularly prone to water erosion, well beyond its classic areas on the ocean borders. We can then seek to know the modalities of the mechanical action of erosion at the expense of the urban armored models of northern Ivory Coast and according to what intensity.
The results obtained are obtained from the observation of the morphogenic processes in progress and from a network of experimental plots developed on the orthotypic slopes of the reliefs of the cities studied. They indicate that runoff and resurgence water constitute the main source of energy responsible for the erosion and the evolution of the morphology of the urban battleships of the North of the country and that the erosion phenomenon and the risks of climatic erosion always take from the intensification of a natural aggressiveness due to the topographic slope.

Keywords : *Cities, North, Côte d'Ivoire, erosion.*

Introduction

Les projections climatiques actuelles prévoient une amplification du réchauffement climatique déjà observé à l'échelle du globe (G. A. Meehl et C. Tebaldi, 2004, p. 996 ; IPCC, 2007, p.

180). Ce changement climatique global est aussi caractérisé par une forte variabilité interannuelle du climat (F. Giorgi, 2006, p.112) favorable à une recrudescence des évènements extrêmes : précipitations intenses, sècheresses, canicules. Le phénomène de dégradation morphogénique des sols est une expression excessive des épisodes de précipitations extrêmes (IPCC, 2007, p. 181). L'élévation du niveau de la mer provoquée par le changement climatique a également considérablement accru les taux d'érosion côtière (J. Bicknell, D. Dodman, & D. Satterthwaite, 2009, p. 108). Ainsi, devenue un enjeu mondial et multidimensionnel, l'érosion hydrique affecte aussi bien les zones agricoles (ravinement, coulées boueuses submergeant les cultures, etc.) que les infrastructures, installations humaines et économiques urbaines (chaussées submergées par la boue, etc.), aussi bien les villes côtières que les villes de l'intérieur. Devant l'aggravation des dégâts observés au cours de ces vingt dernières années, de nombreuses recherches sur les processus et les facteurs de l'érosion hydrique ont été engagées.

Cependant, la complexité des processus d'érosion, d'un côté, le grand nombre de disciplines et la diversité des conditions du milieu physique à prendre en compte, de l'autre côté, rendent impossible la mise à l'échelle mondiale de la connaissance des mécanismes physiques de l'érosion des sols à partir de modèles d'érosion linéaires (S. Kambiré, B. Kambiré, N. P. Dangui, 2020, p. 61).

Cette étude a donc été réalisée en vue de contribuer à mieux faire connaître tant le phénomène érosif lui-même que les risques d'érosion potentiels dans les villes du Nord de la Côte d'Ivoire, bien au-delà de leurs zones urbaines classiques des bordures océaniques.

En général, lors des orages de printemps et d'été, l'érosion affecte les sols non ou peu protégés par un écran entre l'atmosphère et la couche meuble du sol. Les terrains les plus sensibles sont les parcelles au sol fortement ameublies, ainsi que les sols à faible teneur en argile. Les gouttes d'une pluie de forte intensité entraînent alors le rejaillissement de particules fines (effet splash) et l'éclatement des mottes par réhumectation. Les mottes « fondent » et la croûte de battance qui se forme s'épaissit dans les petites dépressions où l'eau stagne, permettant la sédimentation des éléments fins. Lorsque la croûte de battance est formée, les pluies ultérieures, même si elles sont de faible intensité, engendreront du ruissellement (Y. Le Bissonnais, J. Thorette, C. Bardet, J. Daroussin, 2002, p. 12-13). Des écoulements boueux ou des illuviations peuvent survenir à l'aval d'un bassin versant si petit soit-il.

Dans les villes du Nord de la Côte d'Ivoire, la formation à grande échelle d'une telle croupe de battance n'est pas un phénomène fréquent. Car la protection des sols meubles semble

assurée par un horizon superficiel armé de matériaux cuirassés épaulés par des plaques de pitons rocheux, qui sont le caractère fondamental du relief. Cependant, les sites urbains sont très attaqués par l'érosion hydrique.

On cherche, alors, à savoir les modalités de l'action mécanique de l'érosion sur ces terrains urbains dans le Nord ivoirien et leur intensité.

L'objectif est de montrer comment s'opèrent les agents mécaniques dans les processus d'évolution morphologique, dans le septentrion de la Côte-d'Ivoire. On s'intéressera aussi à l'intensité du phénomène érosif sur les modelés typiques des villes du Nord ivoirien.

L'hypothèse d'un phénomène érosif qui se déclenche et se développe par déchaussement de la cuirasse et de la roche superficielles, par suite d'affouillement des matériaux meubles sou jacents, est retenue. Elle repose, d'autre part, sur des débits solides plus élevés au pied des inselbergs et sur les bas versants que sur les vieilles surfaces cuirassées.

1. Situation géographique de la zone d'étude

L'étude s'appuie sur deux villes situées entre 9° N et 10° N, Bouna à l'est, sur 3° W et, plus à l'ouest, Korhogo sur 5°30 W, dans lesquelles l'acquisition des données fournit l'essentiel de la matière qui est présentée et discutée (figure 1).

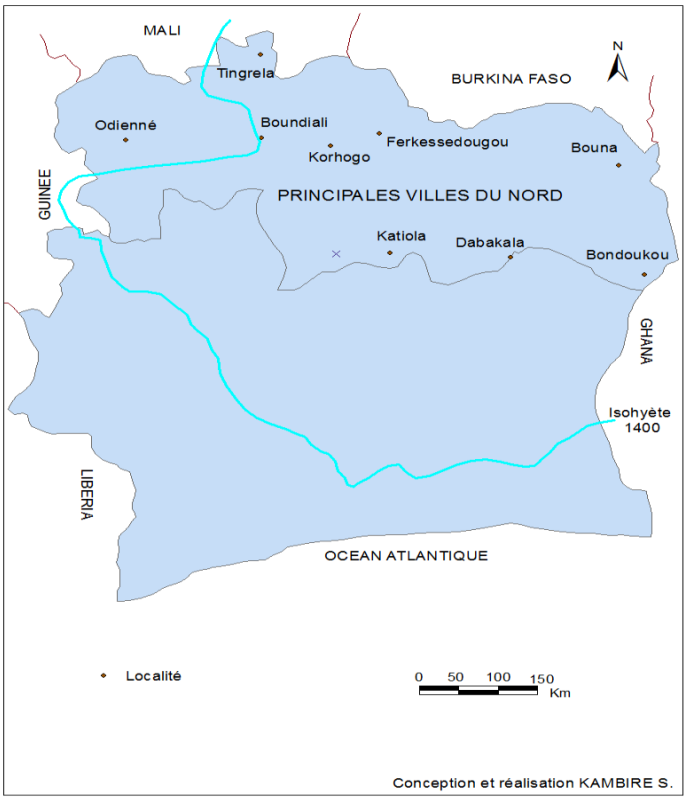


Figure 1 **: Localisation des villes du Nord**

Ces milieux urbains considérés correspondent aux conditions les plus strictes qu'on puisse associer aux villes du Nord de la Côte d'Ivoire, qui connaissent, à quelques différences près, les mêmes facteurs physiques naturels : il s'agit d'une région qui s'inscrit dans le contexte plus large de substrats et de climat à l'intérieur desquels, en tenant compte du relief, les processus d'érosion et les risques potentiels d'érosion sont considérés comme identiques.

Bordée par la frontière nord de la Côte d'Ivoire, la région naturelle ainsi définie est comprise entre les dernières rides de la dorsale guinéenne à l'ouest et la Volta Noire à l'est. C'est le domaine de l'extension méridionale de plateaux développés en glacis qui sont communs à une grande partie de l'Afrique de l'Ouest. Le paysage est fait d'une superposition de surfaces individualisées les unes par rapport aux autres ; les versants sont d'une forme mineure. Ce sont davantage des escarpements que des versants, car leur développement est minime et leur profil rigide**.**

D'un point de vue climatique, l'analyse des valeurs pluviométriques moyennes nationales (1950-1998) fait apparaître une décroissance, vers l'est, des hauteurs annuelles et du nombre de jours de pluies annuelles observées, du littoral, suivant un axe (ou gradient) S-W/N-E et un axe de décroissance W-E à partir de l'isohyète 1 400 mm qui marque généralement les limites Nord et Est des climats tropicaux pluvieux. Celui-là est lié à l'effet de continentalisation, du fait de l'appauvrissement en eau, de la masse d'air porteuse de précipitations au fur et à mesure de son avancée à l'intérieur des terres et celui-ci à la présence de reliefs prépondérants dans l'Ouest du pays. Dans ce dernier cas, à latitude égale, les régions montagneuses de l'Ouest reçoivent plus de hauteurs d'eau (de l'ordre de quelques centaines de millimètres) que celles situées à l'Est (METEOSAT, 1971, p. 2).

A un niveau de précipitations annuelles égal à environ 1400 mm, la frontière sud des ferrisols de savane et des sols ferrugineux tropicaux sur matériau ferrallitique est atteinte (B. Dabin, N. Leneuf, G. Riou, 1961, p. 36).

2. Données et méthodes

Des études stationnelles, indispensables à la compréhension des mécanismes de l'érosion hydrique que l'on observe, acquièrent toute leur cohérence par leur articulation dans une prise en compte globale du milieu. Dans cet esprit, le transect apparaît comme le niveau privilégié de l'échantillonnage spatial, dans la mesure où il permet de décrire et de saisir le fonctionnement des taxons élémentaires juxtaposés. Pratiquée depuis longtemps, la méthode des transects - catena des botanistes, coupe des géologues, toposéquence des pédologues - gagne à s'inscrire dans des niveaux d'analyse « emboîtés », des plus petites (le segment de

paysage) aux plus grandes unités géomorphologiques (les modelés) qui juxtaposent ou associent les segments de paysage.

Ainsi, il a été, dans un premier temps, effectué un découpage cartographique en segments de paysages. Ce découpage consiste en un dessin systématique de toutes lignes de rupture de pente et de toutes les lignes d'inflexion de pente visibles sur les photographies aériennes couvrant les villes de Bouna et Korhogo. Les documents utilisés correspondent aux clichés HAUTS-MONTS INC-CIV-96 à l'échelle du 1/50 000. Ces ruptures et inflexions de pente soulignent les segments de paysage. D'un point de vue structural, les segments de paysage correspondent souvent à des changements dans l'organisation des milieux. Ensuite, d'un point de vue cinématique, ces segments soulignent la dynamique actuelle des milieux qui peut se révéler trans-érosive ou trans-accumulative, selon le cas.

On dispose sur les localités étudiées, de cartes topographiques à l'échelle du 1/50 000. La carte topographique a été croisée avec la carte des segments de paysage. Cette opération permet d'obtenir, avec le maximum de précision, la pente moyenne comprise entre les courbes de niveau qui passent par le sommet et la base des segments, et la pente maximale moyenne définie par les courbes les plus rapprochées.

L'objectif est de reconnaître, à partir de l'angle qu'elles font avec l'horizontal, les pentes des versants typiques, ceux qui peuvent aider à la compréhension des dynamiques érosives dans les paysages du Nord de la Côte d'Ivoire. La classification des pentes générée, différencie quatre classes : 0-5 % (pente faible) ; 5-15 % (pente moyenne) ; 15-50 % (pente forte), supérieure à 50 % (pente très forte).

Dans un deuxième temps, et seulement dans des friches urbaines, il a été aménagé, le long de toposéquences définies par les modelés, des parcelles expérimentales sur les versants reconnus comme orthotypes c'est-à-dire aux caractéristiques "normales" ; cette "normalité" étant toujours évaluée dans un contexte régional. Ces parcelles s'appliquent à des étendues d'une centaine de m^2, en forme de rectangle allongé dans le sens de la pente ; un fossé, ouvert à l'amont, délimite chaque parcelle tandis qu'un canal creusé à l'aval assure la récupération, dans des bacs, des débits solides. Chacune de ces parcelles a été soumise à des expériences de ruissellement et d'érosion sur sol sec dans les conditions d'averses tropicales. Les données stationnelles présentées correspondent ainsi à des événements pluvieux d'une même intensité moyenne de 60 mm/h. Elles permettent de faciliter la comparaison des ordres de grandeurs relatifs à l'érodibilité des milieux, en fonction de leurs spécificités structurales.

Pendant ces pluies, ou dans d'autres circonstances, on a pu décrire les mécanismes et les formes d'érosion qui s'exercent.

3. Résultats

3.1. Types de sites urbains

Le relief urbain du Nord de la Côte d'Ivoire peut être divisé en deux grands ensembles. La différence est davantage morphologique que structurale.

De la Volta Noire, à l'est, jusqu'aux hautes terres, à l'ouest, qui courent de N-E en S-W sur des alignements de roches vertes associés à une gouttière schisteuse empruntée par la Haute Comoé et assez systématiquement disposés en bordures, c'est un pays de granite qui s'installe à une altitude légèrement supérieure à 300 m, comme autour de Bouna, au nord et à l'est de Bondoukou. On y rencontre en fait des formations géologiques alternées qui introduisent un relief plus différencié.

Sur schistes, le pourcentage des surfaces occupées par les sommets des plateaux par rapport aux pentes et bas-fonds est élevé. Ces modelés sont plus ou moins cuirassés, la cuirasse s'épaississant généralement en bordure. Les pentes sont caractérisées par une ample convexité sommitale puis par un profil largement concave. Un ressaut assez net domine un versant caractérisé par un replat marqué vers le haut suivi d'une pente forte (supérieur à 16 %) mais relativement courte qui se raccorde à un bas-fond évasé. Sur granite, les plateaux sont moins étendus que sur schistes et correspondent, soit à des buttes témoins assez fortement cuirassées, mais d'extension réduite, de véritables « mesas », soit à des surfaces relativement beaucoup plus étendues mais dont la cuirasse discontinue affleure sous l'effet de l'action mécanique de l'érosion. Une corniche plus ou moins marquée domine un replat peu développé suivi d'un ressaut (rarement absent) et une pente faible (0 à 1 %), rectiligne généralement plus longue que sur schiste. Elle surplombe le bas-fond plat par des pentes inférieures courtes, moyennes ou fortes supérieures à 10 %. La toposéquence de la figure 2 est celle qu'on retrouve sur les sites de plateaux à Bouna.

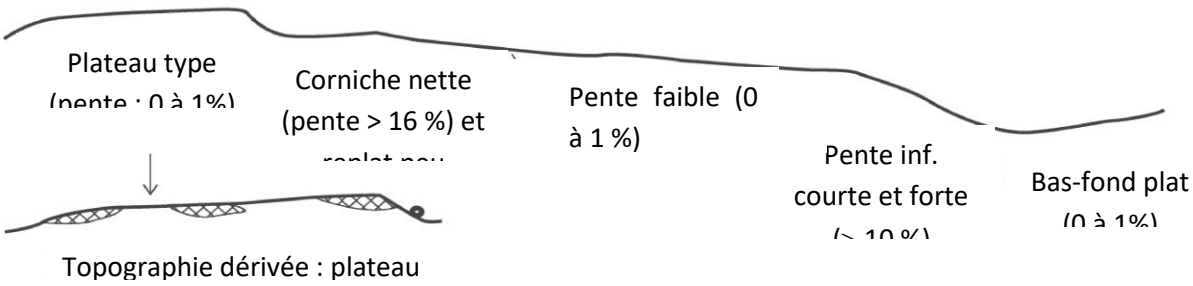


***Figure 2* : Modelé de plateau cuirassé sur granite dominant caractéristique du site de Bouna.**

Source : enquête de terrain

Des croupes cuirassées, parfois surmontées de petites buttes cuirassées, et des croupes gravillonnaires se distinguent par une convexité sommitale plus prononcée. Elles dérivent de l'évolution des plateaux.

Toutes les villes du Nord de la Côte d'Ivoire présentent ce type d'évolution général, valable pour l'ensemble de la zone climatique tropicale subhumide et structurale de la vieille plateforme africaine.

Au-delà des hautes terres de la Haute Comoé jusqu'aux derniers éléments de la Dorsale guinéenne, la forme en glacis des sites urbains, laquelle caractérise les vieilles surfaces cuirassées, semble la mieux conservée. Il s'agit d'un plateau assez étendu se situant entre les altitudes de 450 et 400 m ; pourtant vers le nord le bourrelet se développe mieux ; les surfaces passent au-dessus de 400 m sur le haut réseau du Baoulé, c'est-à-dire sur le revers de glacis du bassin du Niger. La pénéplaine est dominée, soit par les collines au modelé accidenté issues de roches basiques, soit par des inselbergs granitiques qui ne semblent pas avoir de rapports avec la surface générale. Au pied de ces dômes surbaissés ou au contraire aux flancs escarpés, où la roche saine affleurante semble crever la surface du plateau, les glacis sont parfois très étendus.

Les toposéquences de la figure 3 illustrent les dynamiques dans ces milieux d'Inselberg et leurs glacis caractéristiques du relief urbain à Korhogo, Boundiali ou Odienné.

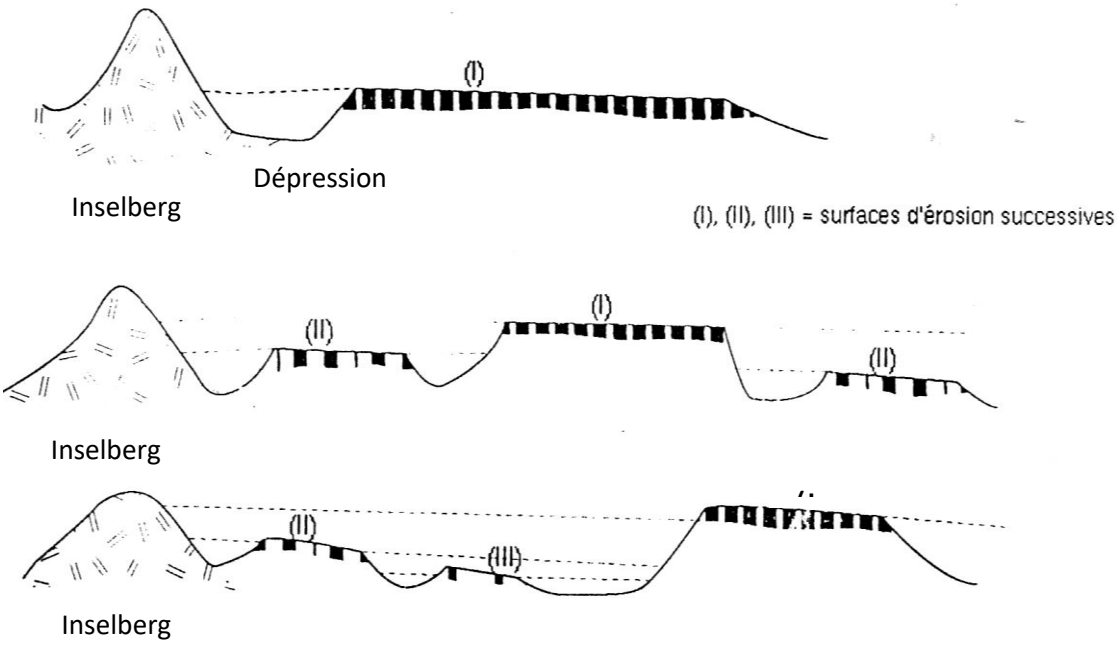


Figure 3 **: Modelé de glacis cuirassé à Korhogo**

Source *: Enquête de terrain.*

Une part très importante revient aux oscillations paléoclimatiques dans la genèse des glacis et l'évolution générale aboutit à deux types schématiques de paysage, en fonction essentiellement de la durée. Le premier type, une colline riche en fer, domine le glacis cuirassé, ultérieurement coupé de sa source par une gouttière lors d'une reprise d'érosion. Ce glacis peut, lui aussi, avoir été disséqué et d'autres glacis peuvent s'y emboîter, laissant ainsi des buttes témoins en cuestas, où le démantèlement peut même aller jusqu'à la formation de collines à sommets subaplanis et gravillonnaires. Le second type peut être une inversion totale du relief, lorsque la durée est suffisante, et lorsque les oscillations climatiques ont interrompu les processus de cuirassement. Dans ces conditions, seules les parties aval des glacis et les anciennes dépressions indurées par la cuirasse résistent à l'érosion, tandis que les anciens reliefs ont été déblayés parce qu'ils étaient moins résistants : la surface qu'ils occupaient est maintenant une dépression. Ces zones cuirassées, devenues plateaux sommitaux, jouent, à leur tour, le rôle de source et d'autres glacis cuirassés peuvent se former à leur pied et être démantelés par les mêmes processus en fonction des oscillations climatiques. L'évolution donne donc là encore des reliefs de cuestas, auxquels on donne souvent le nom de bowal, au pluriel : bowé (J. M. Avenard, 1971, p. 56).

Bien que présentant une grande monotonie d'ensemble, ces glacis se développent néanmoins avec un certain nombre de nuances dues aux formations géologiques : sur granites (ou migmatites), ces reliefs présentent des formes assez rigides et des lignes très fuyantes ; sur les séries phylliteuses, ils sont plus rigides, et relativement déprimés par rapport aux glacis sur granites environnants.

Plateaux et formes dérivées ou glacis, l'érosion est présente sur les sites urbains du Nord de la Côte d'Ivoire et l'évolution, sous des aspects divers. Plus que leur présence, c'est peut-être l'absence d'un organisme de drainage hiérarchisé qui frappe au premier abord, et les grands ravins semblent traverser ces reliefs en étrangers, le réseau local très lâche déterminant des "pièces et de morceaux" d'interfluves élargis.

3.2. Conditions offertes à l'aléa érosif

Elles ont pour effet de faciliter le ruissellement (tableau I). Celui-ci est surtout actif au début de l'hivernage, mais il dépend, en grande partie, des formations superficielles sur lesquelles il s'exerce.

Tableau I. Classification des facteurs de vulnérabilité

Intitulé	Facteur d'érosion	Intensité de l'érosion
Nature des sols	Sol hydromorphe	Faible
	Matériaux ferrugineux	
	Roche saine	
	Sables, argiles, altérites, sol eutrophe	Très forte
	Sable peu argileux, sable très argileux	
Pentes	0 - 1 %	Faible
	2 -9 %	Moyenne
	10- 50 %	Forte
	> 50 %	Très forte
Occupation du sol	Ligneux et hautes graminées sur friche	Faible
	Bâti urbain	Moyenne
	Sol nu	Très forte
Erosivité des pluies	-	Invariant

Source : *Enquête de terrain*

Dans les vallées à sol hydromorphe réticulé ou hydromorphe gley argileux, la cohésion des agrégats permet une grande stabilité structurale, d'où l'accumulation des débits solides ; d'autre part, les épaisses alluvions et colluvions sableuses augmentent, la quantité d'eau pouvant être absorbée par le sol et empêchée de s'écouler alors à la surface, sous forme de ruissellement érosif. En interfluve, cependant, la synthèse géopédolologique superficielle des sites urbains du Nord montre des formations largement influencées par les matériaux ferrugineux ; il s'agit, excepté la cuirasse ferrugineuse, d'une unité non consolidée, gravillonnaire avec intercalations de silts, de sables, d'argiles et d'argilites devenant silteux en surface ; par conséquent, ce sont des sols où le ruissellement et l'érosion sont peu actifs. Mais la raideur de la pente topographique les renforce ; ainsi, c'est la topographie du terrain qui détermine toujours la vitesse à laquelle l'écoulement de surface va se réaliser, ce qui détermine à son tour l'érosivité de l'écoulement. Le substratum géologique parait aussi déterminant et le façonnement différentiel joue à fond, en fonction de la variété du substrat, schisteux ou granitique.

Enfin et surtout, le ruissellement s'appuie sur des averses violentes (intensité supérieure à 60 mm/h). Par exemple, les études effectuées par I'ORSTOM dans le nord de la Côte d'Ivoire sur le bassin de la Flakoho (région de Ferkéssédougou) ont montré que des averses de 90-100 mm fournissent un ruissellement de 20 - 25 % (J. M. Avenard, p. 40).

En cas de précipitations intenses, les eaux de ruissellement généralement mal canalisées dont le débit augmente en corrélation avec l'augmentation des surfaces imperméabilisées par des plaques de cuirasse déblaient facilement les particules du sol à cause de la faible cohésion

entre elles. L'érosion n'épargne ni la cuirasse sur les vieilles surfaces cuirassées, les plateaux et croupes cuirassés ni la roche saine des inselbergs. Elle opère par infiltration et résurgence, profitant des diaclases ouvertes dans le bowal ou la roche, puis par affouillement régressif dans les matériaux sous-jacents et ruptures de gravité successives (figure 4).

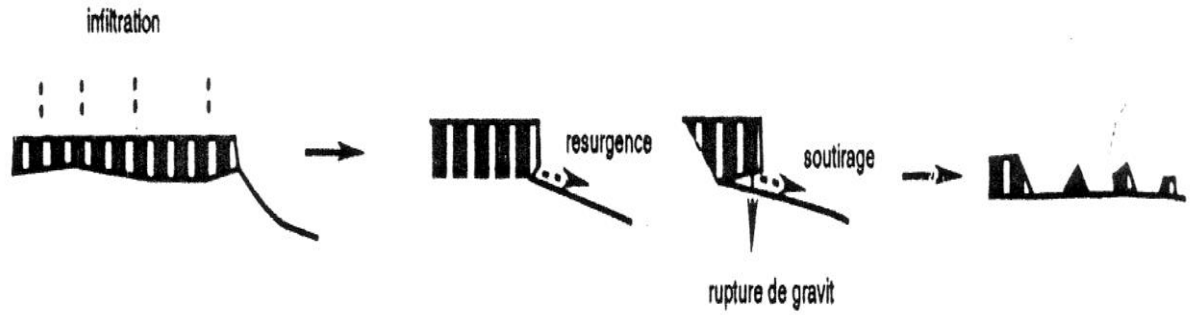


***Figure 4* : détails de l'érosion régressive dans la cuirasse ferrugineuse**

Source : Enquête de terrain

3. 3. Typologie des aléas d'érosion

3.3.1. Les milieux peu susceptibles à l'érosion

Ce type de milieu se localise dans les secteurs d'Inselberg. Il occupe la totalité des mornes rocheux. L'érosion faible, malgré la pente forte (plus de 50 %), se réalise grâce à l'effet d'impluvium qu'exerce le relief, selon les circonstances. La rapidité des averses et la dispersion des eaux, imposées par les souches végétales et les blocs de roche saine en saillis, engendrent les types en filets anastomosés ou concentrés. Sur les surfaces nues, l'érosion se développe sous forme diffuse ou en nappes pelliculaires. L'aléa érosif se traduit, sur la roche massive, par des traces de desquamation et des avalanches de blocs éboulés. Il s'agit des mouvements lents et continus, dont les conditions de déroulement sont telles qu'aucune accélération rapide ou brutale ne puisse être envisagée. Les débits solides sont associés aux agrégats du matériau parental. Sur sol sec, une averse de 60 mm/h d'intensité a causé, à Korhogo, une érosion de 25 kg/ha après 42 mn, de 32 kg/ha après 57 mn et de 47 kg/ha après 121 mn. Cette immunité est due à la mise à nu de la roche saine.

Ce type de milieu se retrouve aussi dans les vallées planes des cours d'eau. Dans ces milieux, la dynamique se révèle plutôt trans-accumulative due au ruissellement par saturation. Celle-ci apparaît, soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe, soit lorsque l'intensité des pluies est inférieure à l'infiltrabilité de la surface de l'épais manteau de matériaux colluviaux. Sur sol sec, une averse de 60 mm/h a provoqué un apport de 123 kg/ha après 42 mn, de 175 kg/ha après 57 mn et de 287 kg/ha après 121 mn à

Bouna sur granite. Sur roches phylliteuses, les accumulations produites par le ruissellement peuvent aussi être importantes. Mais elles sont largement diminuées par rapport aux apports sur granites. L'explication fait appel à des faits d'érodibilité dans les niveaux de topographie supérieure d'où proviennent les débits solides. On considère que le paramètre textural est fonction des textures dominantes et du matériau parental : les sols plus argileux sur substrat birrimien sont classés en faible érodibilité, alors que les sols à texture grossière sur granite sont classés en érodibilité forte. Sur schistes, on a recueilli, dans les mêmes conditions expérimentales, un dépôt de 43 kg/ha après 42 mn, de 115 kg/ha après 57 mn et de 225 kg/ha après 121 mn.

3.3.2. Les milieux susceptibles à l'érosion

Ces milieux sont assez fréquents. Ils occupent les sommets des ensellements subaplanis largement aménagés en bâtis urbains. Les trois types de modelés définis par ces reliefs ont été soumis à l'expérience de ruissellement et d'érosion.

Sur les plateaux et croupes subaplanies cuirassés, il se réalise une zone de ruissellement diffus, commençant par des mares coalescentes lors de fortes averses, puis passant à un balayage en nappe ruisselante (photo 1). Les eaux de ruissellement exercent alors une ablation aréolaire et un entraînement des débris de cuirasse, des gravillons ferrugineux puis des sables fins, argiles et limons vers les secteurs d'épandage où elles les abandonnent. Sur granite à Bouna, on a recueilli, sous averse de 60 mm/h 1203 kg/ha de terre après 42 mn, 1299 kg/ha après 57 mn et 1491 kg/ha après 121 mn en plateau cuirassé ; 1267 kg/ha après 42 mn, 1342 kg/ha après 57 mn et 1548 kg/ha 121mn sur croupe cuirassée.

Sur plateaux altéritiques et croupes gravillonnaires, l'érosion en rigole apparaît lorsque s'amorce la concentration des eaux favorisée par le billonnage, en parcelles d'agriculture urbaine ou par les sentiers des hommes et du bétail (Planche 1). Elle se développe par l'apport d'eau important ruisselant sur le sol piétiné et compacté ; les débits solides sont plus élevés. Toujours sur granite, on a enregistré, sous averse de 60 mm/h, une érosion de 1374 kg/ha de terre après 42 minutes, 1469 kg/ha après 57 minutes, 1668 kg/ha après 121 minutes en plateau altéritique ; une perte de 1437 kg/ha de terre après 42 minutes, de 1562 kg/ha après 57 minutes, de 1628 kg/ha après 121 minutes sur croupes gravillonnaires.

L'érosion est peu sensible sur substrat schisteux où en général, il y a concentration en surface des quartz, nodules et gravillons ferrugineux qui sont difficilement déplacés. Sur plateau cuirassé du substrat birrimien à Bouna, on a enregistré, dans les mêmes conditions expérimentales, une érosion de 1079 kg/ha après 42 mn, de 1182 kg/ha après 57 mn et de

1287 kg/ha après 121mn ; 1 184 kg/ha de terre érodée après 42 minutes, 1230 kg/ha après 57 minutes, 1378 kg/ha après 121 minutes sur croupe cuirassée.

Sur plateau altéritique, à Korhogo, une averse de 60 mm/h, a provoqué, sur sol sec, 1271 kg/ha de terre emportée après 42 minutes, 1 379 kg/ha après 57 minutes, 1573 kg/ha après 121 minutes. En milieu de croupe gravillonnaire, cette averse de 60 mm/h d'intensité a causé une érosion de 1308 kg/ha après 42 mn, de 1409 kg/ha après 57 mn et de 1 517 kg/ha après 121 mn.

Planche 1 : Erosion sur ensellements subaplanis



Photo 1 : le ruissellement exerce une ablation aux dépens de la cuirasse sur plateau à Bouna



Photo 2 : le ruissellement exerce une érosion sur des altérites meubles sur croupes gravillonnaires à Korhogo

(Prises de vues, S. KAMBIRE, 2020)

Sur les vieilles surfaces cuirassées (glacis), les dégâts sont d'autant peu importants que les sols sont souvent minces et riches en matériaux ferrugineux.

A Korhogo, sur granite, l'érosion en nappe et rigole a causé, sur sol sec, sous averse de 60 mm/h, une perte de 1109 kg/ha après 42 mn, de 1140 kg/ha après 57 mn et de 1298 kg/ha après 121 mn. Sur schistes, et toujours dans les mêmes conditions expérimentales, les débits solides sont estimés à 1021 kg/ha après 42 mn, de 1095 kg/ha après 57 mn et de 1169 kg/ha après 121 mn.

Planche 2 : différentes facettes du glacis cuirassé du Mont Korhogo



Photo 3-L'érosion diffuse déjà ravinante sur friches en haut de glacis



Photo 4- une ablation, aux dépens de la cuirasse ferrugineuse sur le moyen glacis habité , due à l'érosion

(Prises de vues : S. KAMBIRE, 2020)

3.3.3. Les milieux très susceptibles à l'érosion

Dans leur état d'équilibre normal, ces milieux connaissent une érosion souvent très intense. L'érosion diffuse, ne laissant en surface que des éléments grossiers, et, surtout l'érosion en nappe plus ou moins ravinante, sont responsables de l'ablation locale des premiers horizons pédologiques meubles. Ces milieux se localisent dans des secteurs très différents : les pieds d'inselberg, les corniches et les bas de versant.

L'évolution du pied des inselbergs semble revêtir deux formes essentielles : les zones déprimées, vallées, bas-fonds ou alvéoles plus ou moins endoréiques, qui séparent le glacis cuirassé du versant dont provient le matériel, d'une part ; les knicks, formes de terrain qui apparaissent lorsque le dôme a une pente moins forte vers sa base et que la roche dure affleurante se raccorde en oblique avec le piedmont, d'autre part. Ces bordures d'inselberg, caractérisées par une submersion saisonnière qui permet un détrempage du sol et une altération importante, offrent des conditions d'érosion pendant une plus ou moins grande partie de l'année. L'aléa érosif correspondra, sur le knick, au *ruissellement* « *Hortonien* » qui apparaît lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol ; dans la dépression périphérique, au *ruissellement par saturation*, lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe. Une fois le ruissellement déclenché sur le pied de l'inselberg, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace : l'érosion de versant diffuse ou en rigoles parallèles et l'érosion linéaire ou concentrée de talweg. Cet aléa est lié notamment à l'instabilité des matériaux

parentaux, et peut être au ravinement responsable des avalanches de roches éboulées. Sur sol sec, à Korhogo, une averse de 60 mm/h a provoqué sur le knick, une érosion de 1336 kg/ha de terre après 42 mn, 1442 kg/ha après 57 mn, 1688 kg/ha après 121 mn en province granitique ; de 1206 kg/ha de terre après 42 mn, 1349 kg/ha après 57 minutes, 1478 kg/ha après 121 mn sur des venues quartzitiques et/ou doléritiques.

Dans la dépression périphérique, l'érosion du sol fait partie d'une évolution dynamique naturelle plus accentuée. On a enregistré, dans les mêmes conditions expérimentales, 1769 kg/ha de terre après 42 mn, 1887 kg/ha après 57 mn, 2012 kg/ha après 121 mn en contexte granitique ; 1598 kg/ha de terre après 42 mn, 1767 kg/ha après 57 mn, 1818 kg/ha après 121 mn sur quartzites et/ou dolérites.

Sur les corniches marquées qui caractérisent les secteurs de plateaux cuirassés, et à la rencontre de versants convergents qui forment les têtes extrêmes des vallées, des pentes raides de 16 - 60 % peuvent se maintenir, mais habituellement l'inclinaison est moindre, de 12 - 35 % dans les secteurs rectilignes de raccordement avec le bas-fond.

Dans ces zones, le ruissellement concentré se traduit, presque partout, par un paysage déchiqueté en badlands (planche 3). Les lits individualisés, véritables petits oueds au fond sableux, aux berges vives, la vigueur de ce ruissellement concentré succédant au ruissellement diffus dépend de la nature du substrat géologique et de la raideur générale du relief**.**

Sur corniche en pays de granite à Bouna, on a enregistré sur sol sec, 1381 kg/ha de débits solides sous une averse de 60 mm/h après 42 mn, 1519 kg/ha après 57 mn et 2013 kg/ha après 121 mn ; sur schiste à Korhogo, le décharnement a donné 1055 kg/ha de produits détritiques après 42 mn d'averse, 1380 kg/ha après 57 mn et 1709 kg/ha après 121 mn.

Sur bas de pente, toujours dans les mêmes conditions expérimentales, les pertes de terres atteignent sur granite à Bouna 1701 kg/ha après 42 mn de pluie, 2025 kg/ha après 57 mn, 2783 kg/ha après 121 mn ; 1367 kg/ha après 42 mn, 1785 kg/ha après 57 mn et 2293 kg/ha après 121 minutes sur schiste à Korhogo.

Planche 3 : profondes morsures d'érosion sur corniche et bas versant



Photo 5 *:* front du bâti sur plateau à Bouna ; sur la corniche, en contrebas, profondes morsures d'une érosion accélérée par la pente.

Photo 6 : ravinement régressif sur altérite en bas de pente à Korhogo

(Prises de vues, S. KAMBIRE, 2020)

4. Discussion

4.1. Actions mécaniques et morphogenèse en cours

Le Nord de la Côte d'Ivoire est inscrit dans le domaine des savanes qui assure la transition entre la forêt tropicale et le Sahel. L'existence d'une saison sèche marquée se traduit par l'augmentation de la part des actions mécaniques dans le système morphogénique, à côté des activités physico-chimiques et biochimiques qui restent essentielles. Elles s'expliquent, à la fois, par la brutalité des manifestations climatiques et l'insuffisance de la protection assurée au sol contre leurs agressions.

En milieu naturel, si les ligneux et les hautes graminées constituent un écran efficace en saison des pluies, cette protection disparaît en zone urbaine. Les premières averses de l'hivernage frappent alors un sol nu et desséché, très vulnérable. C'est pendant cette courte crise saisonnière (juin-octobre) période au cours de laquelle la région enregistre son pic pluviométrique que l'érosion mécanique atteint le maximum de son efficacité (S. Kambiré ; B. Kambiré et N. P Dangui., 2020, p. 64).

Le ruissellement tient la première place parmi tous les processus qui interviennent alors sur le relief. Sur les pentes sensiblement fortes des corniches ou des bas versants - qui caractérisent les plateaux, croupes, glacis cuirassés - et les pieds d'inselberg, prédomine le ruissellement concentré. Il représente la forme la plus agressive de l'activité des eaux courantes en milieu

urbain. Et ceci d'autant qu'il déclenche d'autres activités mécaniques efficaces. Ainsi, les eaux enfouies dans les fentes de dessiccation, ouvertes en saison sèche, créent des circulations internes génératrices d'éboulements de panneaux entiers de cuirasse et d'altérite dus aux coupures vives du ravinement linéaire. On doit à ce sapement, préparé par le minage des eaux infiltrées, la continuité de la verticalité du front d'attaque.

L'humectation des argiles y crée aussi des mouvements de masse aux modalités variées. L'affouillement lié au gonflement saisonnier des nappes phréatiques contribue à entretenir leur développement sur les bas versants. La perte interne des substances, causée par le phénomène de décuirassement provoque des tassements et des affaissements importants, à l'origine, dans le second cas, de creux importants. On doit à cette véritable fusion du relief, les aspects déconcertants qu'il offre.

Cette agressivité naturelle de l'érosion a été trop souvent accrue par l'homme. Le bâti conserve sa place dans l'activité morphogénique. Celle due à l'impact des grosses concentrations des eaux issues des toits de maisons sur les sols meubles opère sur les versants pentus. A ce type de déplacement concentré des eaux et du ravinement s'ajoutent toujours ceux liés à l'activité des hommes. Les ravages provoqués par l'érosion anthropique dévastent les surfaces dénudées qui profitent aux activités des pluies très violentes et abondantes. Dans les formations altéritiques, argilo-limoneuses ou finement sableuses, les aménagements humains restent des plus efficaces. Les billons élaborés pour l'agriculture urbaine sont un des éléments les plus typiques du paysage des villes du Nord. Après leur abandon, ils alimentent et accélèrent le ruissellement concentré, grâce aux canaux creusés entre eux, tandis qu'ils se réduisent à de longs monticules. D'autre part, conséquence de l'affouillement des sols nécessité par les reprofilages sommaires des rues, la mobilisation des couches meubles manifestée par l'extension des sables étale l'action déprédatrice des eaux courantes. L'intervention de l'homme complique ainsi les aspects d'une érosion déjà nuancée en fonction de la pente et du substrat.

4.2. Armature cuirassée et rigidité apparente des reliefs urbains

Dans le contexte ivoirien, les reliefs du Nord appartiennent à une plateforme ancienne, à « la vieille plateforme ouest-africaine » (J.M. Avenard, 1971, p. 27). Leur surface rigide bénéficie alors d'une remarquable stabilité relative face à l'érosion hydrique. Ce n'est pas le cas, par exemple, dans les régions du continental terminal des bordures atlantiques où les événements pluvieux engendrent dans les sédiments de sables tertiaires ou quaternaires des fréquents mouvements de terrain redoutables.

Les fortes oscillations saisonnières sont à l'origine d'un mécanisme original : le cuirassement. Ce dernier, en retour, a, par sa genèse, une signification géomorphologique précieuse : les cuirasses jouent, tant soit peu, un rôle identique à celui d'un banc de roche résistante et arme véritablement le paysage.

Or, les modelés du Nord sont liés au phénomène d'induration typique des milieux savaniens. Le cuirassement provient de la concentration et de la fixation des oxydes ou hydroxydes métalliques libérés par l'hydrolyse qui résulte des épisodes pluvieux saisonniers abondants.

Au-dessous d'un horizon superficiel A, humifère et appauvri par la migration verticale vers lui des substances les plus solubles, l'horizon B est enrichi en kaolinite née d'une argilisation limitée des silicates (kaolinisation), en alumine combinée, et en oxydes et hydroxydes de fer, notamment sous l'aspect d'un réseau plus ou moins dense de nodules. L'horizon C, sous-jacent, en cours d'altération, repose sur la roche saine généralement située à moins d'une dizaine de mètres de profondeur. Mais les hydroxydes de fer, plus mobiles que ceux d'aluminium, se concentrent aussi bien à la suite de migrations latérales des solutions, dans les formations superficielles perméables, le long des versants. Des accumulations absolues se réalisent alors en amont des pièges constitués par des contre-pentes ou des bouchons dus au colmatage de pores par de l'argile. L'évaporation intense déclenche leur dessiccation en deçà de la surface soumise à l'aspiration climatique (R. Cocque, 1977, p. 214).

L'enrichissement en fer bénéficie des apports de nappes battantes. Dans le détail, il y a plusieurs étapes :

- la première étape est l'altération avec comme élément de base, le fer libéré ; dans chaque type de roche et dans certains minéraux, le pourcentage varie ; exemple : granite 2-3% ; granodiorite 5-9 % ; dolérite 15-20 %.
- dans la deuxième étape, le fer libéré, sous forme de gel, peut se déplacer dans l'eau de la nappe phréatique et se concentrer en certains endroits du sol. Le niveau de la nappe varie avec les saisons en créant deux zones : une zone en contact permanent avec l'eau et qui correspond à la zone d'altération continue, une zone aérée en saison sèche et engorgée en saison humide qui n'existe que dans les climats soudaniens ; plus la différence de pluviosité est grande, plus la zone aérée est grande. Ainsi, lorsque le niveau monte, la nappe entraîne le fer en solution qui s'agglomère autour des particules d'argiles ; à l'inverse, lorsque le niveau baisse, la zone est aérée ; le fer au contact de l'oxygène cristallise rapidement et se fixe définitivement, donnant des taches rouges. Le phénomène se renouvelle selon les saisons, entraînant l'agrandissement et le renforcement des taches. On définit alors une phase *oxique* (diamètre des taches inférieur ou égal à 1 mm) et un *rétichron* (diamètre des taches supérieur à 1 mm).

- la troisième étape, enfin, le durcissement des taches commence à partir du moment où la zone évolue en milieu aéré, c'est-à-dire qu'elle n'est plus atteinte par la nappe. Cela est rendu possible lorsque l'abaissement du front d'altération entraîne l'abaissement du niveau de la nappe. Dès lors, la déshydratation des sesquioxydes est facilitée par la mise en affleurement du rétichron et le départ des matériaux meubles.

La mise à l'affleurement des concentrations réalisées a dû entraîner, au cours des temps, leur induration par dessiccation et déshydratation, en saison sèche et à l'occasion des feux de brousse. Selon l'intensité de la dessiccation et de la déshydratation, ces concentrations se sont transformées en cuirasses compactes très résistantes ou en carapaces friables et en gravillons ferrugineux sous forme de nodules durs comportant de grandes concentrations d'oxydes métalliques mais sans véritable grande cohésion. La couleur variée, brune ou brun-rouge de ces matériaux, est fonction de leur richesse en oxydes métalliques, de la nature des oxydes métalliques et de leur degré d'hydratation au moment de leur consolidation.

On explique ainsi cette accumulation par migration interne du fer, l'élaboration de puissants revêtements cuirassés, de par leur nature compacte, armée ou non d'enclaves de roches saines, et leur développement vertical. La rapidité et l'importance de l'accumulation, quelles que soient ses modalités, dépendent des conditions bioclimatiques, topographiques et lithologiques. Naturellement, les roches mères les plus riches en éléments ferrugineux intensifient le phénomène ; or, les roches de la région du Nord de la Côte d'Ivoire sont riches en sesquioxydes de fer.

Les modelés cuirassés spécifiques qui en résultent diffèrent profondément des autres par la présence des plaques de cuirasse étendues ou développées en coin qui leur confèrent une plus grande résistance contre les mouvements de terrain. Les géographes ont adopté le terme *bowal* (pluriel : *bowé*) d'origine foula (guinée), pour désigner des plateaux, glacis et croupes cuirassés en Guinée, au Mali, au Burkina-Faso, en Côte d'Ivoire, comme ceux qui caractérisent le paysage urbain dans le Nord.

Rigide à distance, le profil de ces reliefs cuirassés présente, en réalité, une topographie vulnérable car les cuirasses constituent aussi un matériau qu'attaque l'érosion. Les escarpements qui les délimitent doivent leur vigueur aux corniches de cuirasse surmontant des talus convexo-concaves entaillés dans les horizons meubles de l'altérite. Leurs aspects témoignent d'un façonnement qui n'épargne guère les parties cuirassées elles-mêmes. La surface des bowè subit, en fait, des désagrégations consécutives au décuirassement actif, en saison humide, dans certaines circonstances. Plus déterminante que la dissolution créatrice de simples vasques nettoyées par le ruissellement, les tassements et les affaissements, engendrés

par le lessivage sous cuirasse des argiles et des éléments solubles, expliquent la confusion de détail de leurs modelés. Mais l'érosion s'exerce surtout sur les escarpements bordiers et les versants pentus. Lorsque des violentes averses se déclenchent, le ruissellement diffus ou concentré, provoque une ablation aréolaire aux dépens des cuirasses ou des carapaces du talus ou du versant. Il balaie et exporte les fragments de cuirasse et les matériaux les plus fins libérés par leur destruction, et les étale dans des secteurs d'épandage, à la base du versant. Le déchaussement consécutif de la corniche et des bas de versant, localement accéléré, par l'affouillement opéré par la sortie des eaux du lessivage interne, entraine des éboulements de cuirasse, par ruptures de gravité successives, signalés par les blocs basculés sur le long des versants.

En définitive, la présence de la cuirasse ne bloque par l'érosion. Elle en limite sensiblement les effets. Mais les actions mécaniques deviennent beaucoup plus spectaculaires quand elles attaquent les formations non cuirassées. Et les plus catastrophiques, d'entre elles, tiennent toujours de l'intensification d'une agressivité naturelle due à la pente.

L'érosion hydrique, sur matériaux rigides, ne se limite pas qu'aux villes Nord-ivoiriennes. Elle est connue ailleurs en Afrique. Au Cameroun, par exemple, R. Youngué-Fouateu, Z. B. Baboulé, E. Temgoua, et D. L. Bitom (2000, 331-340) signalent le phénomène de la dégradation morphogénique sur les collines aux conditions lithologiques alternant roches dures et roches tendres à Oyomabang.

Conclusion

Les sites des villes septentrionales de la Côte d'Ivoire sont très concernés par l'aléa de l'érosion des sols. Les phénomènes érosifs et les risques d'érosion les plus catastrophiques tiennent toujours de l'intensification d'une agressivité naturelle due à la pente et à la sensibilité à la battance. Ainsi, c'est sur les pieds des inselbergs, aux sols très ameublis par les débits solides, ou sur les terrains aux pentes un peu plus prononcées, comme les corniches et les bas versants, que s'expriment les formes les plus agressives de l'activité de l'érosion hydrique.

L'érosion est d'autant plus préoccupante que les sols sont établis sur substrat granitique et ne sont pas protégés par la cuirasse ferrugineuse. Mais la vitesse et la puissance du ruissellement permettent aussi l'expression des formes et de l'intensité de l'érosion sur les reliefs recouverts d'un puissant revêtement cuirassé. D'autre part, l'affouillement opéré par les eaux de lessivage interne et les eaux de résurgence issues des pluies ou de la nappe phréatique la renforcent. Ce sapement de la structure géologique par l'aléa érosif se traduit, sur les plateaux,

croupes et glacis cuirassés des villes du septentrion ivoirien, par la fusion et l'abaissement du niveau de base. Tandis que sur les puissants dépôts détritiques au pied des inselberg, les altérites au bas de pentes et les corniches, mêmes armées de la cuirasse, les profondes morsures d'une érosion accélérée par la pente sont créatrices d'un modelé typique en badlands.

Références bibliographiques

AVENARD Jean Michel, « Aspects de la géomorphologie », In : *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire, Mémoires ORSTOM*, n°50, Paris, 9-72.

BICKNELL J., DODMAN D. et SATTERTHWAITE D., 2009, *Adapting Cities to Climate Change: Understanding and Addressing the Development Challenges*, London : Earthscan, 114 p.

COCQUE Roger, 1971, *Géomorphologie,* Armand Colin, 430 p.

DABIN Bernard, Leneuf Noël et RIOU Gérard,1960, *Carte pédologique de la Côte d'Ivoire au 1/ 2 000 000,* Notice explicative, 36 p.

GIORGI F., 2006, Climate change Hot-spots, *Geophysical Research Letters* (8), 110-115

IPCC, 2007, "Global climate projections", In: *Climate change: the physical science basic*, Cambridge University press, 177-192

KAMBIRÉ sambi, KAMBIRÉ Bébé et DANGUI Nadi Paul, 2020, "Geomorphic aspects of slope erosion in urban areas of Bouna in the Black Volta River Basin, Ivory Coast", In: *Naturals resources, Socio-Ecological, Sensitivity and Climate Change in the Volta-Oti Basin, West Africa*, CRS Press-London-New York, 61-67

LE BISSONNAIS Yves, THORETTE Jacques, BARDET Cécile et *al.*, 2002, *L'érosion hydrique des sols en France*, INRA, IFEN, 106 p.

MEEHL G. A., Tebaldi C., 2004, "More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century", In: *Science*, Vol. 305, 994-997.

METEOSAT, 1998, « Analyse des données climatiques », *METEOSAT*, 20 p.

YOUNGUE-FOUATEU R., BABOULE Z. B., Temgoua E. et *al*., 2000, « Erosion hydrique en milieu urbain : le cas du site d'Oyomabang dans la ville de Yaoundé, Influence de l'homme sur l'érosion : bassins versants, élevage, milieux urbain et rural, *Bull. du réseau érosion* 20(2) : 332-341