

Manifestations du phénomène de cuirassement des sols sur substrat sédimentaire à Bingerville dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire

Manifestations of the phenomenon of duricrust of soils on sedimentary substrate in Bingerville in the Southeast of Côte d'Ivoire

Kouadio Emile YOBOUÉ^{1*}, Bi Trazié Jérémie GALA¹, Kouassi Josselin KOUAKOU², Remi Jean-Bosco SAVADOGO¹

1. Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY d'Abidjan Cocody. UFR-STRM, Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et des Géomatériaux. 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.
 2. Université Péléforo Gon Coulibaly de Korhogo. UFR des Sciences Biologiques, Département de Géosciences, Unité Pédagogique et de Recherche d'agro-pédologie. BP 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire.
- *Correspondance E-mail : emileyoboue1@gmail.com; kouadio.yoboue36@ufhb.edu.ci

Résumé. Ce travail visait à présenter les caractéristiques du phénomène de cuirassement dans les sols de Bingerville. La méthodologie adoptée a consisté en une description de profils de sols à cuirassements par l'observation de tranchées. Les cuirasses ont été prélevées et décrites sur la base de leurs aspects morphologiques et de leurs niveaux d'induration. Les résultats obtenus montraient que le cuirassement dans la zone de Bingerville était observé dans les cambisols et dans les ferralsols à caractères plinthitiques. Dans les cambisols, le cuirassement était généralement observé du sommet jusqu'à la partie inférieure des milieux de versants des collines. Alors que dans les ferralsols, le cuirassement n'était observé que dans la partie inférieure des milieux de versants des collines. Le cuirassement s'est manifesté par des cuirasses et par des croûtes qui étaient soit faiblement indurées, soit moyennement ou bien indurées, soit fortement indurées. Les cuirasses étaient soit monogéniques ou soit polygéniques et souvent gréseuses selon l'endroit. Les profondeurs des sols étaient plus ou moins limitées par les cuirassements qui avaient des caractéristiques différentes de ceux observés sur socle précambrien dans le centre de la Côte d'Ivoire.

Mots-clés : Cuirassement, cambisol, ferralsol, caractère plinthitique, Bingerville, Côte d'Ivoire.

Abstract. This work aimed to present the characteristics of the phenomenon of duricrust in the soils of Bingerville. The methodology adopted consisted of a description of the profiles of soils through the observation of trenches. The duricrusts were collected and described based on their morphological aspects and their levels of induration. The results showed that the induration in the Bingerville area was observed in Cambisols and Ferralsols with plinthitic characters. In cambisols, the induration was generally observed from the top to the lower mid-slope of the hills. While in the Ferralsols, the induration was observed only in the lower part of the hill slopes. The induration was manifested by duricrusts and crusts which were either weakly indurated, or moderately or well indurated, or strongly indurated. The duricrusts were either monogenic or polygenic and often sandstone depending on location. The deep of soils were more or less limited by duricrust, which had different characteristics from those observed on a Precambrian basement in central of Côte d'Ivoire.

Keywords: duricrusts, cambisol, ferralsol, plinthitic character, Bingerville, Côte d'Ivoire.

Abridged English Version

In Bingerville, in the forest and on the sedimentary substrate, the phenomenon of duricrust is manifested in the form of surface hardened layers, more or less thick, and often constitutes a real obstacle to the development of the soils. The question is: which pedological process is better suited to duricrust? How is this duricrust manifested and what might be the factors governing it?

Work began with a soil profile description based on trench observation. Each soil horizon was described in detail, including the color in Munsell code, texture, structure and consistency of the aggregates, coarse element load, orientation of the roots, depth and the type of horizon. This was followed by a description of the duricrusts inspired by the techniques described by Brewer (1964) and Alexandre (2002). This consisted of assessing the level of induration of the duricrusts, identifying the elements of the macrostructure (matrix, figurative elements, voids, coatings), defining the type of structure (porphyric, agglomerated, granular, intertextic, coating), giving the facies (massive, vermiform, alveolar, conglomeratic, brecciated, nodular, lamellar,

gravelly, pisolithic), to define the color with Munsell code, and to appreciate the genetic sequence of the breastplate.

The results showed that in Bingerville, on a sedimentary substrate, curing was preferably manifested by a pedogenetic process, linked to the formation of Cambisols and Ferralsols. Curly cambisols were located in topographic positions of hilltops and hillsides. They had varying depths and were more or less loaded with coarse elements as observed by Yao-Kouamé *et al.* (2011) and Yoboué *et al.* (2014) on Toumodi cambisols on a proterozoic basement. As for ferralsols, those subject to bending were located in the upper part of the hillsides (or lower part of the mid-hillside). They were generally deep, loaded in coarse elements and characterized by a mostly massive or fragmentary particulate flow structure. Sand-clay particles were dominant in all horizons. The color varied from brown in the upper horizons, to red or yellow in the depth horizons as a result of iron dynamics.

The heavy load of coarse elements gave these soils a plinthitic character. On these soils, the curing phenomenon was manifested either by crusts or by cuirasses that could be

assessed differently depending on their level of induration or their morphological aspects.

1. Types of crusts observed in Bingerville

Colorful crust: it was a crust that was weak to medium in duration because it broke by hand or was often shaped by the spade. Sandstone, hardgrounds, and variously colored sandy clay giving it a colorful appearance, were found in an iron-rich clay matrix (Fig. 7A).

Conglomerate crust: this crust, formed under a Plinthic Cambisol (Xantic), was well indurated and had an agglomerated structure. It consisted of sandstone and hardgrounds blocks, more or less rounded, taken in a matrix of clayey nature rich in iron, giving it conglomeratic facies (Fig. 7B).

Leafy crust: it was a very superficial and long-lasting crust. It was observed less than a meter deep on a Cambisol and sometimes seemed very altered and difficult to saw. It had vermiform and lamellar facies and was yellow-ochre (10YR3/6), reddish (10R4/6), and yellowish (10YR7/8). Some figurative elements of the ferruginous nodular type, hardground and sandy clay were observed in an ochre matrix (Fig. 7C).

Pisolitic crust: it was a medium-indurate crust formed on a Ferralsol in Marie-Thérèse. It consisted of a few figurative elements of a greasy duricrust, hardground and pisolites consolidated in a clay and ferruginous matrix. Facies were similar to lamellar and pisolitic types (Fig. 8).

2. Types of duricrusts observed in Bingerville

Highly durable monogenic duricrust: it was an alveolar, nodular and pisolitic facial duricrust. It had an agglomerated structure with ferruginous globules such as quartz (<5%), concretions and hardgrounds debris taken from a reddish ferruginous matrix (10Y) and an ochre colloidal plasma (10Y2/4). The duricrust was colored brown-ochre and covered on its surface with a ferruginous coating (Fig. 9A).

Medium to long-lasting monogenic duricrust: it was a monogenic duricrust with agglomerated structure and nodular and gravelly facies (Fig. 9B). There were ferruginous globules, quartz (<5%), hardgrounds and ferruginous concretions (nearly 80%) with roughly rounded or subangular forms and millimeter to centimeter size. All this was taken from a clayey colloidal matrix. It was a duricrust that possessed rare canaliculi, colored ochre-brownish and coated with ferruginous plasma.

Monogenous greasy duricrust: this duricrust observed at Marie-Thérèse was generally reddish-brown in color (10YR5/6). It was a monogenic duricrust strongly indurated depending on the sample, massive and vermiform, with a porphyry structure. It had clayey, reddish (10Y8/3) and grayish (5Y8/1) lenses, with hardgrounds taken from a greasy and ferruginous matrix. It was covered with a ferruginous coating and possessed voids (vacuoles, alveoli). This duricrust was observed on a ferralsol (Fig. 10A).

Long lasting polygenic duricrust: it had a porphyric structure, vermiform and alveolar facies and had many ferruginous globules with quartz grains, hardgrounds, elements of the greasy duricrust and a clay material, all taken in an ochre clay-ferruginous binder (5Y8/3). It was colored ochre-brownish (2.5Y8/4), coated with ferruginous plasma and contained few voids (vacuoles, alveoli, poodles). This long-lasting breastplate was also formed on a ferralsol (Fig. 10B). Ultimately, the induration phenomenon observed in Bingerville falls into three categories according to the level of induration. These are the crusts or duricrusts that are weakly indurated, the duricrusts that are medium and well indurated and the duricrusts that are strongly indurated, as Alexander (2002) observed in Congo. The crusts were much more observed on the cambisols than on the ferralsols. While the duricrusts were mostly observed on the ferralsols. In Bingerville, these indurations appeared to be controlled by three factors: topography, soil type and coarse-element loading.

INTRODUCTION

Les cuirassements constituent des phénomènes d'induration observés dans la croûte terrestre pouvant affleurer suite au phénomène d'érosion (Kouamé & Zorro 2010, Wyns *et al.* 2014, Yoboué 2018). Ces phénomènes sont la conséquence des précipitations du fer et de l'aluminium se formant surtout en climat intertropical à saisons sèches bien marquées (Foucault & Raoult 2000). En Côte d'Ivoire, les phénomènes d'induration sont généralement observés dans la zone nord et dans la zone centre où les précipitations sont plus faibles et les saisons sèches assez longues avec une végétation dominée par la savane (Maignien 1958, Koffi *et al.* 2016, Yoboué *et al.* 2019). Dans la zone sud et généralement en zone de forêt, plus pluvieuse, les indurations ont été décrites par certains auteurs dans des sols formés sur socle précambrien (Adjanohoun 1962, Avenard & Tricart 1972). Les phénomènes d'induration ou de cuirassement sont quasi inexistantes ou rarement évoqués dans la zone sud, sur le bassin sédimentaire. Ainsi, les cuirassements et encroûtements récemment observés dans des sols de Bingerville, sur des formations sédimentaires, paraissent être une situation inhabituelle qui suscite des interrogations surtout que les sols de cette localité sont dominés par des sols ferrallitiques (ferralsols) plus ou

moins riches en sable et en argile. Le phénomène d'induration observé favorise l'érosion qui met à mal les fondations de certaines bâtisses et crée de grandes rigoles très dangereuses en périodes pluvieuses. De plus, il est peu connu et est vu comme un simple obstacle aux activités d'aménagement foncier occultant ainsi la question des processus pédologiques et des facteurs influençant ce cuirassement. Vue ces diverses considérations, ce travail se propose, d'une part, de présenter quelques caractéristiques des sols affectés par le cuirassement et, d'autre part, de présenter les caractères morphologiques des cuirasses et croûtes observées dans la localité de Bingerville.

ZONE D'ETUDE

L'étude a été menée dans la sous-préfecture de Bingerville repérable aux coordonnées N05°21' et W03°54'. Les sites étudiés (Fig. 1) étaient les sites de la cité IRIS, non loin du pôle scientifique de l'Université Félix Houphouët-Boigny et repérable aux coordonnées (x=399457 m et y=592319 m), le site de Santai défini par les coordonnées (x=401069 m et y=593144 m), le site de la plage Marie-Thérèse ayant pour coordonnées (x=400946 m et y=590807 m) et enfin, le site de Gbrêbo repérable aux coordonnées (x=407701 m et y=587330 m).

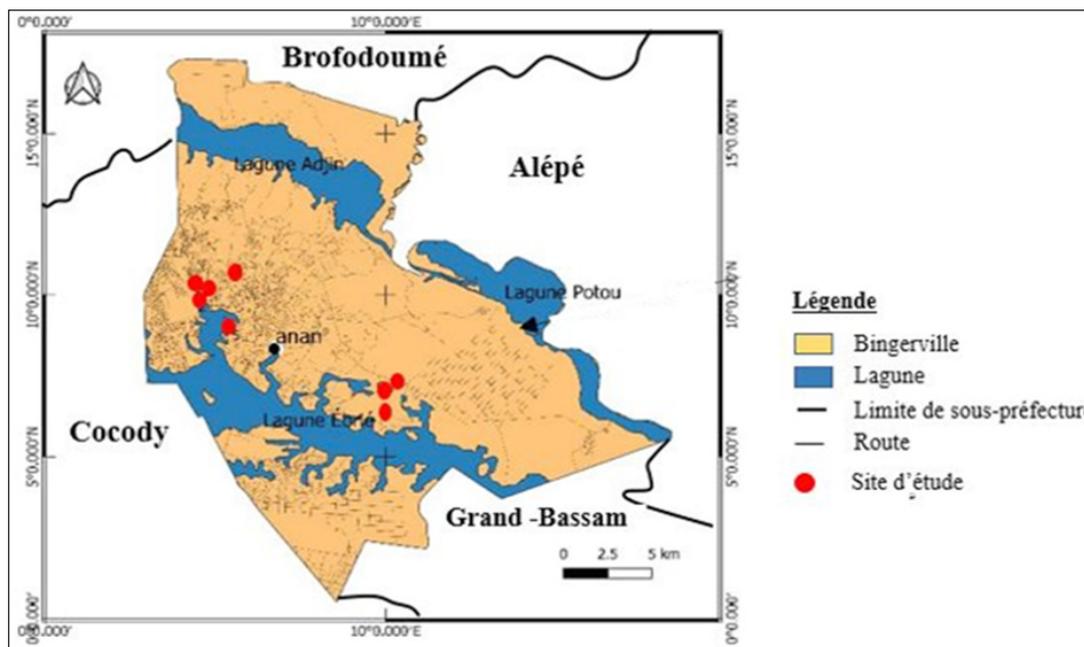


Figure 1. Localisation de la zone d'étude.
 Figure 1. Location of the study area.

La zone est caractérisée par quatre saisons dont deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses ou humides. Le mois de Janvier est le plus sec avec une moyenne de 57 mm de pluie. Le mois de Juin, avec une moyenne de 266 mm, affiche les précipitations les plus importantes. Entre le plus sec et le plus humide des mois, l'amplitude des précipitations est de 209 mm avec une différence de température de 3,0 °C existant entre la température la plus basse et la plus élevée sur toute l'année (Fig. 2). La végétation est une forêt dense sempervirente avec quelques étendues savanicoles qui ont laissé la place à des cultures et à des habitations et qui ne couvrent plus qu'une faible surface (Guillaumet & Adjanohoun 1971). Bingerville appartient à la zone dite des "hauts plateaux" qui occupe la partie Nord du système lagunaire (Atlas de Côte d'Ivoire 1986). Elle est drainée par deux cours d'eau qui sont la lagune Aghien et la lagune Ebrié.

Du point de vue géologique, Bingerville appartient au bassin sédimentaire de la Côte d'Ivoire. Sa géologie est essentiellement constituée de sables argileux recouvrant un socle granito-gneissique (Bruguière & Schmid 1947) et qui sert de substrat aux grès datant du tertiaire, précisément du Pliocène (Tagini 1971). Cependant, la synthèse litho-stratigraphique de la région de Bingerville présentée récemment par Assalé *et al.* (2012) met en évidence les argiles noires, les argiles sableuses et les sables micros conglomératiques antérieurement absents dans les présentations litho-stratigraphiques de Bingerville (Tab. 1).

Les sols appartiennent au groupe des sols ferrallitiques (ferralsols) développés sur des dépôts sableux du continental terminal et sont difficiles à différencier morphologiquement. Pour caractériser ces sols et leur évolution, le principal critère utilisé repose sur leur constitution granulométrique qui évolue entre un pôle sableux (moins de 10 % d'argile)

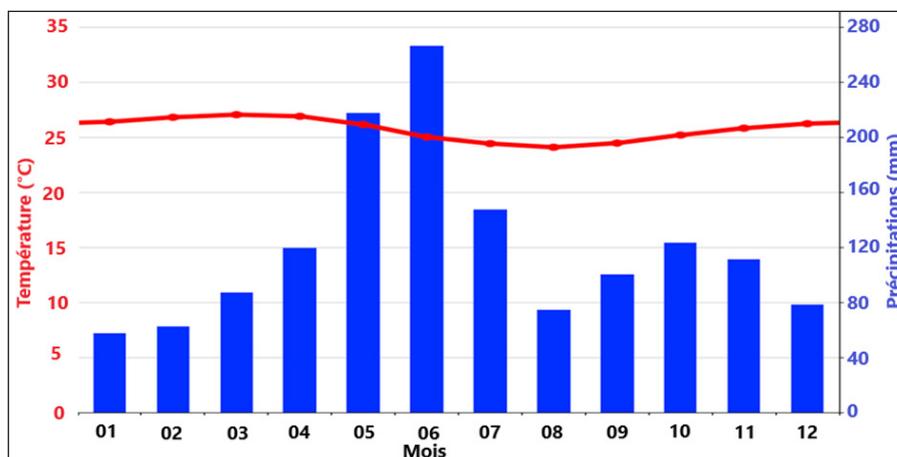


Figure 2. Variation des températures et des précipitations moyennes à Bingerville (climate data, 2020).
 Figure 2. Variation in temperature and average precipitation at Bingerville (climate data, 2020).

et un pôle argilo-sableux (plus de 40 % d'argile). A ces sols ferrallitiques, s'ajoutent des sols hydromorphes (gleysols) et des sols pseudo-podzoliques (pseudo-podzols). Les sols hydromorphes sont des sols dont les caractères sont dus à une évolution dominée par la présence d'un excès d'eau par suite d'un engorgement permanent ou temporaire en surface ou en profondeur. Les sols pseudo-podzoliques sont constitués par les sables grossiers quartzeux du cordon littoral. La forte pluviométrie favorise le lessivage maximum de cette zone et assure une évolution de type nettement podzolique. Cependant, ces sols ne s'étendent pas au-delà de la zone inférieure du littoral (Aubert & Segalen 1966, Leneuf 1968, Kouamé & Zorro 2010).

MATERIEL ET METHODOLOGIE

Caractérisation et typologie des sols

Le choix des sites d'observation était basé sur la présence de tranchées conservant le mieux la structure du sol et sur l'observation de phénomènes de cuirassement. L'étude a commencé par la mesure de la profondeur des tranchées à l'aide d'un mètre-ruban. S'en est suivi la délimitation des horizons avec un couteau en tenant compte de la couleur, de la charge en éléments grossiers et de la structure de l'horizon. Ensuite, chaque horizon a fait l'objet d'une description en détail sur le terrain en précisant la couleur à l'aide du code Munsell, la texture, la structure et la cohérence des agrégats, la charge en éléments grossiers, l'orientation des enracinements, la profondeur et le type d'horizon. Ces éléments de description

ont été inspirés de la méthode de Boulet *et al.* (1982), telle que décrite par Yao-Kouamé (2008). Le type de sol a été défini selon la classification internationale en vigueur de l'IUSS Working Group WRB (2015). Ce système universellement admis pour la connaissance et la classification des sols au niveau mondial a été préféré aux systèmes français (CPCS et Référentiel français) historiquement utilisés.

Description du phénomène de cuirassement

La description des cuirasses s'est inspirée des techniques décrites par Brewer (1964) et Alexandre (2002) et a consisté à :

- apprécier le niveau d'induration des cuirasses (cuirasse faiblement indurée si elle se casse à la main, cuirasse moyennement indurée si elle se façonne à la bêche, cuirasse bien indurée si elle éclate au marteau, cuirasse fortement indurée si le marteau tend à rebondir) ;
- identifier les éléments de la macrostructure (la matrice, les éléments figurés, les vides et les enduits) ;
- définir le type de structure (porphyrique, aggloméré, granulaire, intertextique, enrobant) ;
- donner le(s) faciès (massif, vermiforme, alvéolaire, conglomératique, bréchique, nodulaire, lamellaire, gravillonnaire, pisolithique) ;
- définir la couleur à l'aide du code Munsell ;
- apprécier la séquence génétique de la cuirasse.

Tableau 1. Synthèse litho-stratigraphique de la région de Bingerville (Assalé *et al.* 2012).
 Table 1. Litho-stratigraphic synthesis of the Bingerville area (Assalé *et al.* 2012).

LITHOLOGIE	DESCRIPTION LITHOLOGIQUE	ETAGE
	Terre de barre	
	Stone line	
	Sables argileux à bloc de grès ferrugineux	
	Argiles sableuses à banc de grès ferrugineux	Plio-quatenaire
	Sables à colorations diverses	
	Alternance de banc de grès ferrugineux et d'argile bariolée	
	Argiles bariolées avec des lentilles de sables et de grès ferrugineux. Les grès forment aussi des hiseaux	Mio-pliocène
	Argiles noires	Antérieur au Mio-pliocène

RESULTATS ET DISCUSSION

Les sols à cuirassement de Bingerville

A Bingerville, le cuirassement a été observé dans les Cambisols et dans les Ferralsols. Les cambisols ont été observés aux sommets, aux hauts et milieux de versant des collines à la cité IRIS. Les figures 3 et 4 présentent deux profils de cambisols observés sur ce site.

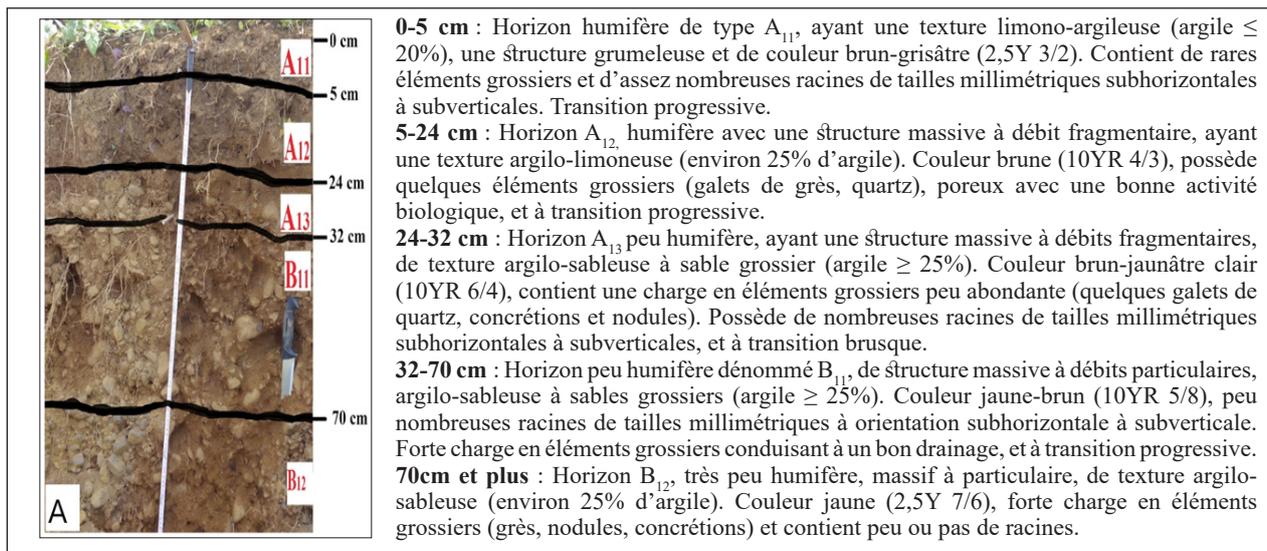


Figure 3. Plinthic Cambisol (Xanthic) de milieu de versant observé à la cité IRIS (altitude 31 m ; coordonnées X=399794 m et Y=592405 m).

Figure 3. Plinthic Cambisol (Xanthic) of mid-slope observed at the IRIS city (altitude 31 m, coordinates X=399794 m and Y=592405 m).

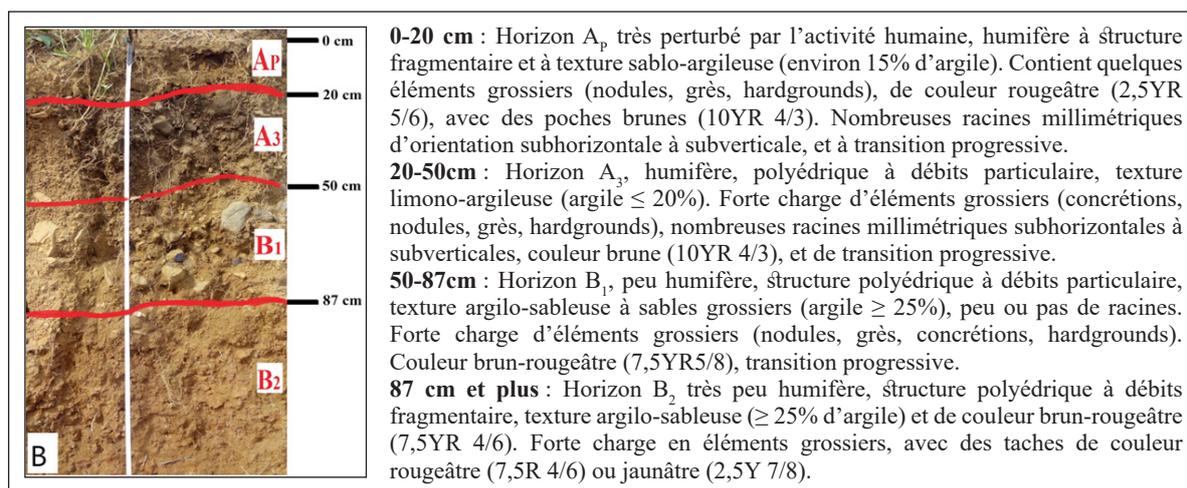


Figure 4. Plinthic Andorhodic Cambisol (Antraquic) de haut de versant observé à la cité IRIS (altitude 43 m ; coordonnées X=399457 m et Y=592319 m).

Figure 4. Plinthic Andorhodic Cambisol (Antraquic) of high slope observed at the IRIS city (altitude 43 m, coordinates X=399457 m and Y=592319 m).

Ces cambisols présentant un caractère cuirassé se situaient en positions topographiques de sommets, de hauts de versants et de milieux de versants des collines. Ils avaient des profondeurs de plus d'un mètre et plus ou moins chargés en éléments grossiers comme l'observaient Yao-Kouamé *et al.* (2011) et Yoboué *et al.* (2014) sur des cambisols de Toumodi. Cette forte charge en éléments grossiers leur conférait le caractère plinthitique généralement évoqué et favorable au cuirassement selon Yoboué *et al.* (2018). Selon Le Roux & Du Preez (2006), ce caractère plinthitique est favorisé par différentes conditions environnementales au cours des processus pédogénétiques. Cependant, les cambisols de Bingerville sont plus colorés, de couleur jaunâtre alors que ceux de Toumodi dans le centre de la Côte d'Ivoire sont plus rougeâtre. Cette différence des colorations pourrait être due aux matériels géologiques. En effet les cambisols de Bingerville sont formés sur une alternance de roches

sédimentaires argilo-bariolée, de sable et de hardground comme présenté par Assalé *et al.* (2012), tandis que ceux de Toumodi sont formés sur des roches magmatiques basiques riches en minéraux ferromagnésiens (Yoboué *et al.*, 2010). Ces ferromagnésiens, en s'altérant, libèrent le fer qui est responsable de la coloration rouille, rouge ou ocre (Bruguière & Schmid 1947, Yoboué *et al.* 2010, Van der Waals 2013). Ces sols ont une texture argilo-limoneuse en surface et argilo-sableuse en profondeur de façon générale. La structure du débit est le plus souvent particulaire suite au matériau sableux sur lequel ces sols sont formés.

Sur ferralsol, le cuirassement a été observé au niveau des sites de Santai, Marie-Thérèse et de Gbrêbo. Cependant, les ferralsols à cuirassement de Bingerville peuvent être regroupés en deux types, représentés par ceux de Santai et de Marie-Thérèse.

A Santai, le profil décrit était une tranchée située dans la partie supérieure du bas de versant d'une colline, non loin de la clôture de l'école d'élevage de la ville. Elle était repérable aux coordonnées (X=0401069 m ; Y=0593144 m) et à une altitude de 56 m. Du point de vue morphopédologique, le profil observé se présentait de la manière suivante (Fig. 5).

Dans ce ferralsol, la texture a un caractère sableux puisqu'elle est généralement sablo-limoneuse en surface et

sablo-argileuse en profondeur. La structure est à dominance particulière comme dans les cambisols observés à IRIS.

A Marie-Thérèse, il s'agissait d'un profil observé en position topographique du haut de bas de versant (dans le tiers supérieur du bas de versant) et à une altitude de 18 m. Il était repérable aux coordonnées X=0400946m ; Y=0590807m.

Ce sol était un *Petroplinthic Ferralsol (Anosombric)* organisé de la façon suivante (Fig.6) :

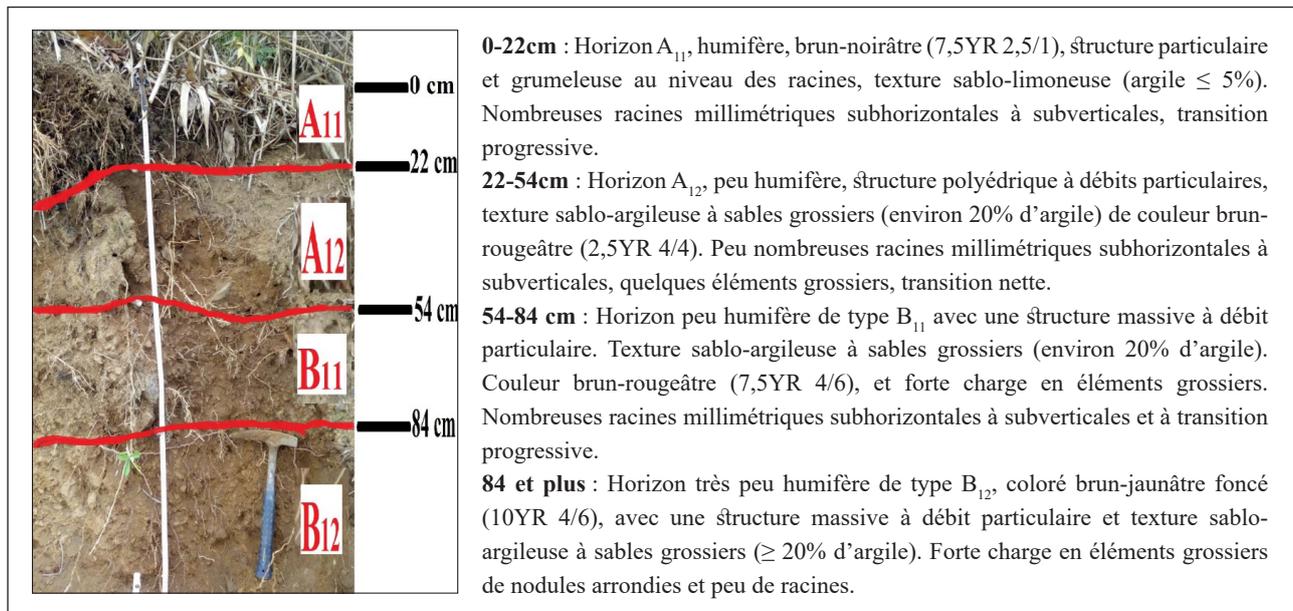


Figure 5. Endopisoplinthic Ferralsol (Dystric) observé à Santai (altitude 56 m, coordonnées X=401069 m et Y=593144 m).

Figure 5. Ferralsol Endopisoplinthic (Dystric) observed at Santai (altitude 56 m, coordinates X=401069 m and Y=593144 m).

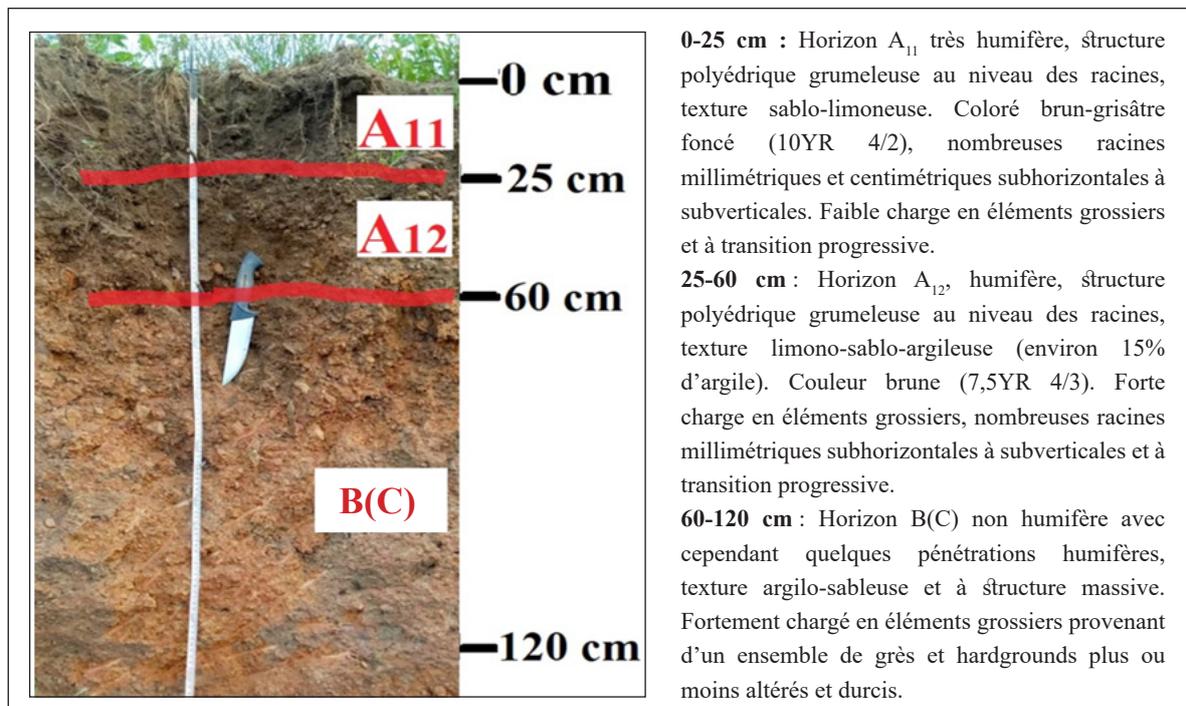


Figure 6. Petroplinthic Ferralsol (Anosombric) observé à Marie-Thérèse (altitude 43 m ; coordonnées X=400946 m et Y=590807 m).

Figure 6. Petroplinthic Ferralsol (Anosombric) observed at Marie-Thérèse (altitude 43 m, coordinates X=400946 m and Y=590807 m).

La texture de ce sol était à dominance sableuse en surface, limono-sableuse dans les horizons intermédiaires et argileuse en profondeur. Sa structure était massive en profondeur suite au caractère durci. De ce fait, ce type de ferralsol était bien différent de celui observé et décrit à Santai.

En somme, les ferralsols observés étaient formés sur une succession de sable argileux contenant des blocs de grès ferrugineux et du sable à coloration diverse (Assalé *et al.* 2012). Ce sont ces formations riches en sable qui justifiaient la texture à dominance sableuse de ces ferralsols, comme indiqué par des travaux plus anciens effectués dans la zone (Aubert et Segalen 1966, Leneuf 1968). Cependant, les ferralsols sujets au cuirassement étaient généralement situés dans la partie supérieure des bas de versant des collines et présentaient un caractère plinthitique. Il est donc possible d'affirmer que la position topographique (ou le relief) influence ce cuirassement des sols. Ces sols étaient généralement profonds de plus d'un mètre et caractérisés par une structure en majorité massive ou fragmentaire à débit particulière et une dominance des particules sablo-argileuses dans tous les horizons. La couleur variait du brun dans les horizons supérieurs, au rouge ou au jaune dans les horizons de profondeur. Ce changement de couleur des horizons de surface vers les horizons de profondeur pourrait s'expliquer par la dynamique du fer comme souligné par Van der Waals (2013) en Afrique du Sud. En effet, les profils du haut et du milieu de versant présentent un drainage vertical dominant, entraînant une accumulation de particules fines dans les horizons profonds, y compris les oxydes et hydroxydes de fer responsables de la coloration vive des sols. Comme rapporté par Koné (2006) et Koné *et al.* (2009), la lixiviation du fer réduirait la coloration des horizons de surfaces, alors que les horizons illuviaux en profondeur seraient de plus en plus rouges. Cela se produit suite à l'alternance des périodes pluvieuses et des périodes sèches plus ou moins longues à Bingerville selon les années (Climate-data, 2020). En saison de pluie, le fer est réduit sous sa forme Fe^{2+} et est entraîné dans les horizons de profondeur, tandis qu'en saison sèche, il se retrouve sous sa forme oxydée (Fe^{3+}) et qui peut durcir de façon irréversible dans le temps. Cette dynamique du fer a aussi favorisé le caractère plinthitique observé majoritairement dans les ferralsols situés dans la partie inférieure du milieu de versant des collines. L'évolution de la coloration et le

mouvement du fer témoignent aussi que dans la zone de Bingerville, en milieu sédimentaire, le cuirassement se produit de préférence dans les horizons d'accumulation des sols.

Les caractéristiques du cuirassement des sols

Sur ces sols, le phénomène de cuirassement se manifestait soit par des croûtes ou soit par des cuirasses présentant des caractères souvent variés. Elles sont soit faiblement indurées, soit moyennement ou bien indurées ou soit fortement indurées.

Les caractéristiques des croûtes

Au total, quatre types de croûtes ont été décrits. Ces croûtes étaient diversement variées et s'observaient au niveau des sites de IRIS, Santai, Marie-Thérèse et Gbrêbo.

La première, une croûte bariolée, plus abondante et identifiée sur tous les sites, était faiblement à moyennement indurée car elle se cassait à la main ou souvent façonnable à la bêche. Du grès, des hardgrounds et de l'argile-sableuse diversement colorée, lui donnant un aspect bariolé, figuraient dans une matrice argileuse riche en fer (Fig. 7A).

La deuxième croûte, dite conglomératique, formée dans le Plinthic Cambisol (Xantic) à IRIS, était bien indurée et présentait une structure agglomérée. Elle comportait des blocs de grès et de hardgrounds plus ou moins arrondis, pris dans une matrice de nature argileuse riche en fer lui conférant un faciès conglomératique (Fig. 7B).

La troisième croûte était feuilletée, très superficielle et bien indurée. Elle s'observait à moins d'un mètre de profondeur dans un Cambisol à IRIS et parfois paraissait très altérée et difficile à scier. Elle présentait un faciès vermiforme et lamellaire et était colorée jaune-ocre (10YR3/6), rougeâtre (10R4/6) et jaunâtre (10YR7/8). Il s'y observait quelques éléments figurés de type nodulaire ferrugineux, hardground et de l'argile sableuse baignant dans une matrice ocre (Fig. 7C).

Quant à la quatrième croûte dite pisolitique, elle était une croûte moyennement indurée formée dans un Ferralsol à Marie-Thérèse. Elle était constituée de quelques éléments figurés d'une cuirasse gréseuse, de hardground et de pisolites consolidées dans une matrice argileuse et ferrugineuse. Le faciès s'apparentait aux types lamellaire et pisolitique (Fig. 8).

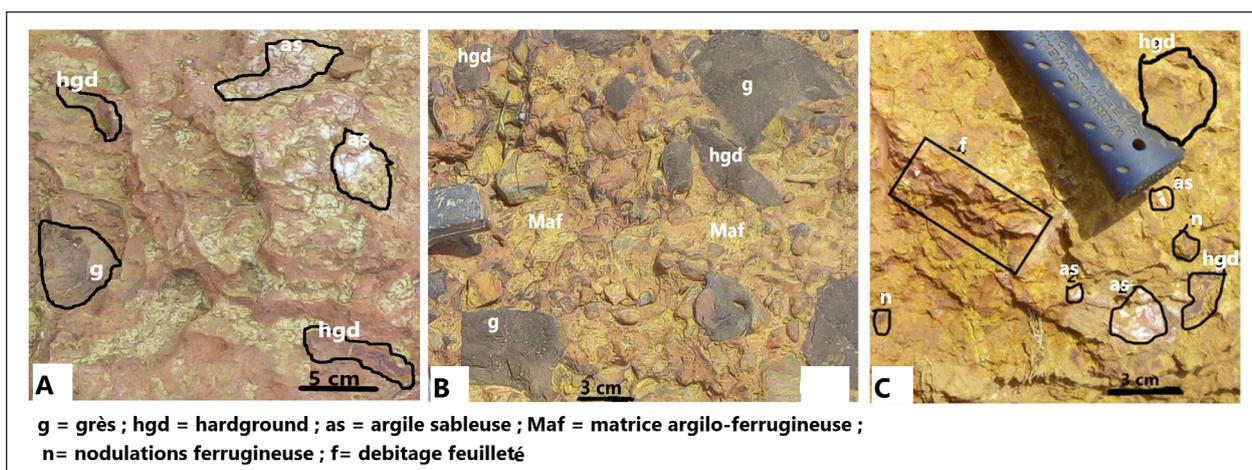


Figure 7. Indurations observées sur les cambisols de la cité IRIS (A = croûte bariolée ; B = croûte conglomératique; C = croûte feuilletée).

Figure 7. Indurations observed on the Cambisols of the IRIS city (A = colorful crust; B = conglomerate crust; C = puffed crust).



Figure 8. Croûte pisolitique observée sur ferralsol à Marie-Thérèse.

Figure 8. Pisolitic crust observed on ferralsol at Marie-Thérèse.

Les caractéristiques des cuirasses

A Bingerville, les cuirasses ont été observées pour la plupart sur les ferralsols. Ces cuirasses présentaient toutes des particularités du point de vue morphologique. Il s'agit

de la cuirasse monogénique fortement indurée, de la cuirasse monogénique moyennement à bien indurée, de la cuirasse monogénique gréseuse et de la cuirasse polygénique bien indurée (Fig. 9).

La cuirasse monogénique fortement indurée était une cuirasse à faciès alvéolaire, nodulaire et pisolitique. Elle présentait une structure agglomérée ayant des glébules ferrugineux tels que le quartz (<5%), des concrétions et des débris de hardgrounds pris dans une matrice ferrugineuse rougeâtre (10Y) et un plasma colloïdal ocre (10Y2/4). La cuirasse était colorée brun-ocre et recouverte à sa surface par un enduit ferrugineux (Fig. 9A).

La cuirasse monogénique moyennement à bien indurée avait une structure agglomérée et son faciès était nodulaire et gravillonnaire (Fig. 9B). Il s'y notait des glébules ferrugineux, du quartz (<5%), des hardgrounds et des concrétions ferrugineuses (près de 80%) ayant des formes grossières plus ou moins arrondies ou subanguleuses et de taille millimétrique à centimétrique. Tout ceci était pris dans une matrice colloïdale argileuse. Cette cuirasse possédait de rares canalicules et était colorée ocre ou brunâtre et enduite par un plasma ferrugineux.

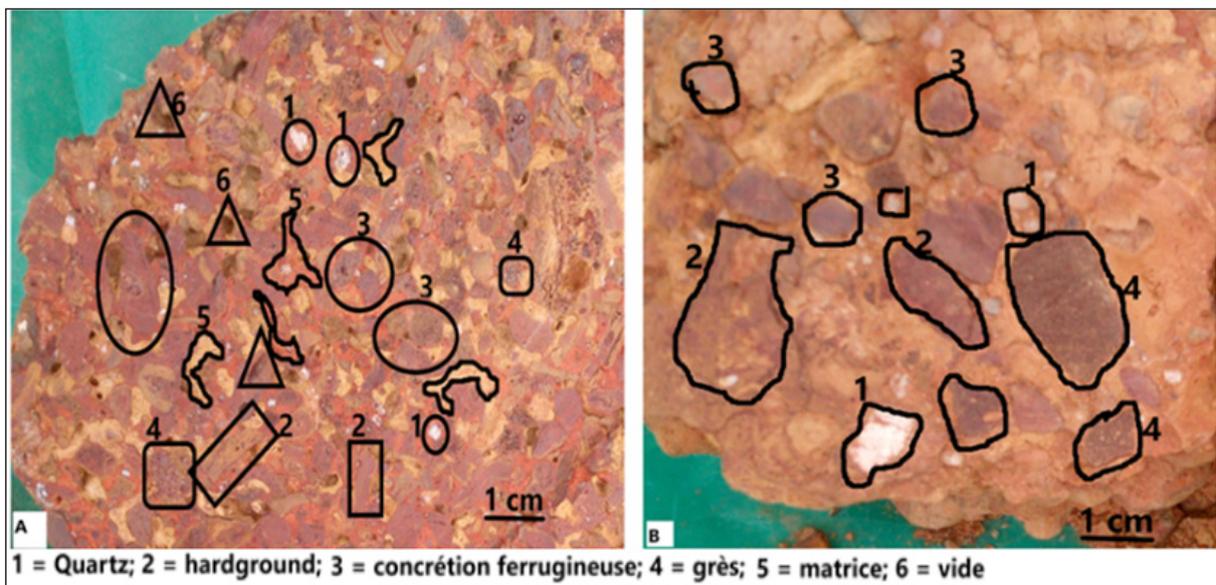


Figure 9. Les cuirasses observées sur ferralsols à Santai

(A = cuirasse monogénique fortement indurée, B = cuirasse monogénique moyennement à bien indurée).

Figure 9. Duricrusts observed on ferralsols at Santai

(A = monogenic duricrust strongly indurated, B = monogenic duricrust moderately to well indurated).

La cuirasse monogénique gréseuse, observée à Marie-Thérèse, était colorée brun-rougeâtre (10YR5/6) dans l'ensemble. C'était une cuirasse monogénique fortement ou bien indurée selon l'échantillon, massive et vermiforme, avec une structure porphyrique. Elle présentait des lentilles argileuses, rougeâtres (10Y8/3) et grisâtres (5Y8/1), avec des hardgrounds pris dans une matrice gréseuse et ferrugineuse. Elle était recouverte par un enduit ferrugineux et possédait des vides (vacuoles, alvéoles). Cette cuirasse s'observait uniquement dans un Ferralsol (Dystric) à Marie-Thérèse (Fig. 10A).

S'agissant de la cuirasse polygénique bien indurée, elle avait une structure porphyrique, un faciès vermiforme et alvéolaire et présentait de nombreux glébules ferrugineux avec des grains de quartz, des hardgrounds, des éléments de la cuirasse gréseuse et une matière argileuse, le tout pris dans un liant argilo-ferrugineux ocre (5Y8/3). La présence des éléments de la cuirasse gréseuse révèle le caractère polygénique de cette cuirasse. Elle était colorée ocre-brunâtre (2,5Y8/4), enduite d'un plasma ferrugineux et comportait peu de vides (vacuoles, alvéoles, canicules). Cette cuirasse, bien indurée, s'était également formée dans le Ferralsol (Dystric) observé à Marie-Thérèse (Fig. 10B).

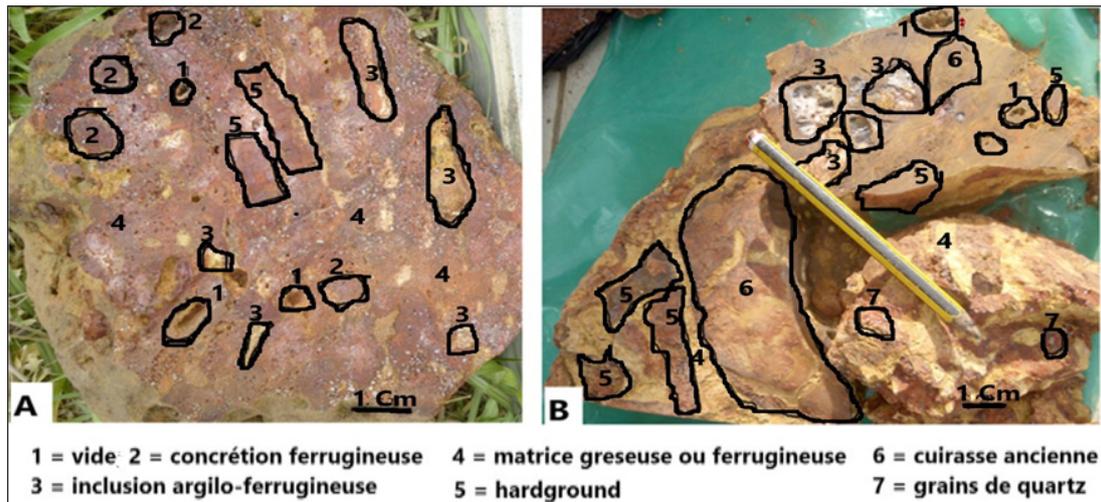


Figure 10. Cuirasses observées à Marie-Thérèse (A = cuirasse monogénique gréseuse bien indurée, B = cuirasse polygénique bien indurée).
Figure 10. Duricrusts observed at Marie-Thérèse (A = monogenic well indurated greasy duricrust, B = polygenic well indurated duricrust).

En définitive, le phénomène d'induration des sols observé à Bingerville se classe en trois catégories selon le niveau d'induration. Il s'agit des croûtes ou cuirasses faiblement indurées, des cuirasses moyennement et bien indurées et des cuirasses fortement indurées comme antérieurement décrites par Alexandre (2002) au Congo.

Les croûtes caractérisent un niveau primitif des indurations. A Bingerville, elles étaient beaucoup plus observées dans les cambisols que dans les ferralsols. Cela suppose que l'induration dans les cambisols est en ses débuts puisque les cambisols sont très dynamiques du fait de leur caractère évolutif. Ces croûtes ou cuirasses faiblement indurées avaient un aspect plus ou moins bariolé, les éléments figurés étaient très peu visibles à l'œil nu hormis le quartz et les fragments de hardground et contenaient plus ou moins de vides. Ces croûtes ou cuirasses faiblement indurées, bien que diversifiées, étaient semblables aux cuirasses faiblement indurées décrites par Boulangé & Delvigne (1973) à la mine d'Awaso au Ghana. Cependant, la couleur des croûtes ou cuirasses faiblement indurées de la mine d'Awaso variait du gris rosé à rouge (7,5R 4/6 à 7,5R 5/6), alors que celles de

Bingerville variaient du jaune (5Y 7/6) au rouge-ocre (7,5YR 5/6) avec un aspect bariolé.

Quant aux cuirasses, elles s'observaient en majorité dans les ferralsols. De plus, elles étaient souvent polygéniques et bien indurées. Ce qui montre que ces cuirasses sur ferralsole sont plus anciennes et proviennent parfois de plusieurs cycles de formations. Les ferralsole sont donc plus vieilles que les cambisols et seraient même issus de différents cycles pédogénétiques. Les cuirasses présentaient des divergences entre elles. Celles de Marie-Thérèse, beaucoup plus gréseuses, contenaient des lentilles argileuses rougeâtres et blanchâtres avec une macrostructure porphyrique. Alors que celles de Santai dont la macrostructure était de type aggloméré ne possédaient aucune lentille. Pour la plupart des cuirasses, le faciès était nodulaire, massif, alvéolaire et souvent vermiforme. Les éléments figurés (quartz, hardground, grès, concrétion) étaient pris dans une matrice argileuse comme l'observait Maignien (1958) sur des cuirasses situées au centre de la cuvette Fello Bantan en Guinée. A Bingerville, il n'existe pas de grandes dalles cuirassées mais des blocs dispersés dans les sols et diversement repartis sur des collines non loin des cours d'eau lagunaires comme le montre la figure 11.

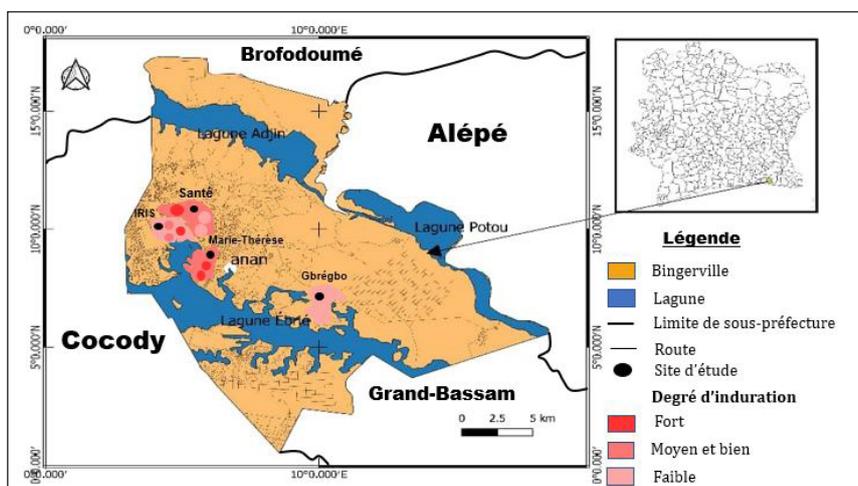


Figure 11. Carte de cuirassement des sols de Bingerville.
Figure 11. Map of Bingerville soil duricrusts.

CONCLUSION

A Bingerville, le phénomène d'induration ne s'observait que dans des ferralsols et dans des cambisols présentant un caractère plinthitique. Cette induration se manifestait par des croûtes et par des cuirasses qui se distinguaient tant au niveau du degré d'induration que par le faciès et par la structure. De ce fait, le cuirassement en milieu sédimentaire se différenciait bien de celui observé et décrit ailleurs en milieux forestiers sur socle précambrien. Il possédait des caractéristiques liées à la nature argileuse, sableuse ou gréseuse du substrat sédimentaire. Cette induration semblait être guidée par trois facteurs qui sont le relief, le type de sol et la charge en éléments grossiers. Ce travail permet de comprendre que le cuirassement, bien qu'existant, n'est pas aussi spectaculaire au point de nécessiter de gros moyens à l'urbanisation de la ville.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les autorités administratives de la commune et de la Sous-Préfecture de Bingerville, ainsi que les populations, pour leurs soutiens et leurs collaborations à la réalisation de l'étude. Ils remercient également les rapporteurs Hicham Elbelrhiti et Bazoumana Koulibaly pour leurs critiques qui ont permis d'améliorer la qualité de ce manuscrit.

REFERENCES

- Adjanohoun E.J. 1962. Etude phytosociologique des savanes de basse Côte d'Ivoire (savanes lagunaires). *Vegetatio*, 11 (1), 1–38.
- Alexandre J.M.N. 2002. Les cuirasses latéritiques et autres formations ferrugineuses tropicales. Exemple du Haut Katanga – Musée Royal de l'Afrique centrale, Tervuren, Belgique. *Annales des Sciences Géologiques*, 107, 118 p.
- Assalé P., Mondé S. & Aka K. 2012. Caractérisation litho stratigraphique et petro-sédimentologique des formations tertiaire-quatérnaires de la région de Bingerville (Côte d'Ivoire). *Afrique Science*, 8(2), 93–112.
- Atlas de Côte d'Ivoire 1986. Atlas de Côte d'Ivoire. Ministère du plan de Côte d'Ivoire. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer. Institut de géographie tropicale. Université d'Abidjan, 67 p.
- Aubert G. & Segalen P. 1966. Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 4(4), 97–112.
- Avenard J.-M. 1972. Le contact forêt-savane. Rôle des régimes hydriques des sols dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire. *Annales de Géographie*, 31 (446), 421–450.
- Boulet R., Chauvel A., Humbel F.X. *et al.* 1982. Analyse structurale et cartographie en pédologie. Prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique : les études de toposéquences et leurs principaux apports à la connaissance des sols. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 19 (4), 309–321.
- Boulangé B. & Delvigne J. 1973. Descriptions morphoscopiques, géochimiques et minéralogiques des faciès cuirassés des principaux niveaux géomorphologiques de Côte d'Ivoire. *Cahiers ORSTOM, série Géologie*, 5 (1), 59–81.
- Brewer R. 1964. Fabric and mineral analysis of soils. *Soil Science*, 100(1), 73 p.
- Bruguière J.M. & Schmid M. 1947. Rapport sur la prospection pédologique de la concession de l'IRHO à Lamé (Cote d'Ivoire) et Bingerville (Cote d'Ivoire), 15 p.
- Foucault A. & Raoult J-F. 2000. Dictionnaire de géologie. Les éditions MASSON, 5e édition, 280 p.
- Guillaumet J.-L. & Adjanohoun E. 1971. La végétation de la Côte d'Ivoire. In : Avenard J.-M., Eldin M., Girard G. *et al.* Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. *Mémoires*, (50), 161–263.
- IUSS Working Groupe WRB 2015. Base de référence mondiale pour les ressources en sols 2014, Mise à jour 2015. Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques. Rapport sur les ressources en sols du monde, FAO, Rome, 106, 203 p.
- Koffi A.S., Fora A.A. & Elbelrhiti H. 2016. Cartographie de l'état du couvert végétal du nord de la côte d'Ivoire à partir d'images satellites : Exemple de la zone de Korhogo. *European Scientific Journal*, 12 (29), 204–213.
- Koné B. 2006. *La couleur comme indicateur de la fertilité des sols. Utilisation des données pour l'étude de la fertilité potentielle des sols ferrallitiques au-dessus de la latitude 7 de la Côte d'Ivoire*. Thèse unique de Doctorat en Sciences de la Terre, Université de Cocody/UFR STRM, 149 p.
- Koné B., Sitapha D., Oikeh S. *et al.* 2009. Estimation de la fertilité potentielle des Ferralsols par la couleur. *Canadian Journal of Soil Science*, 89 (3), 331–342.
- Kouamé N.F. & Zorro B. 2010. Nouveau découpage de la zone de la forêt dense humide de la Côte d'Ivoire. *Sciences et Nature*, 7(2), 177–194.
- Leneuf N. 1968. Les bordures sédimentaires du Golfe de Guinée. *ORSTOM, Série Géologie*, 5(2), 155–157.
- 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. *South African Journal of Plant and Soil*, 23(2), 120–125.
- Maignien R. 1958. Le cuirassement des sols en Guinée (Afrique occidentale). *Mémoires du Service de la Carte géologique, Alsace-Lorraine*, 16, 239 p.
- Tagini B. 1971. *Esquisse structurale de la Côte-d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale*. Thèse de Doctorat, Université de Lausanne. Bulletin, SODEMI, (5), 302 p.
- Van der Waals J.H. 2013. Soil colour variation between topsoil and subsoil horizons in a plinthic catena on the Mpumalanga Highveld, South Africa. *South African Journal of Plant and Soil*, 30(1), 47–51.
- Wyns R., Cornu S. & Prognon C. 2014. Régolithe et sol : l'interface entre lithosphère et atmosphère. *Géosciences*, (18), 8–15.
- Yao-Kouamé A. 2008. *Etude des sols brunifiés dérivés des formations volcano-sédimentaire de Toumodi en moyenne Côte d'Ivoire*. Thèse de Doctorat d'état ès Sciences naturelles, Université de Cocody/UFR STRM, 210 p.
- Yao-Kouamé A., Koné B. & Gala B.T.J. 2011. Caractérisation morphopédologique des sols bruns eutrophes développés sur les complexes volcano-sédimentaires Ouest africains du birimien à Blafo en Côte d'Ivoire, *Africa Geoscience Review*, 18(1), 23–32.
- Yoboué K.E., Yao-Kouamé A & Alui K.A. 2010. Evolution Pédogéochimique et Minéralogique au Cours de l'altération des Formations du Complexe Volcano-sédimentaire d'Anikro et de Kahankro (Toumodi) dans le Centre-Sud de la Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, 40(1), 60–72.
- Yoboué K. E., Bongoua A. J., Kouadio K.P. *et al.* 2014. Minéralogie de la fraction argileuse des sols brunifiés de Kahankro et Anikro (Toumodi) dans le Centre Sud de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8(3), 1269–1280.
- Yoboué K. E., Kouadio K. P., Blé L. O. *et al.* 2018. Caractéristiques Morphopédologiques et Géochimiques des Sols Brunifiés de Anikro et de Kahankro (Centre-Sud de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal January*, 14(3), 281–300.

Yoboué K. E., Kouakou C. H., Akotto O. F. *et al.* 2019. Etude des variations des teneurs de quelques oxydes de deux types de sols à plinthes observés à Yébouékro (Djékanou) dans le centre-sud de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13(2), 1180–1192.

WEBGRAPHIE

Climate-data. 2020. Bingerville Diagramme ombrothermique. <https://fr.climate-data.org/afrique/cote-d-ivoire/abidjan/bingerville-58859/> (Consulté en Juin 2021).

Manuscrit reçu 25/12/2020
Version révisée acceptée le 25/10/2021
Version finale reçue le 27/10/2021
Mise en ligne le 28/10/2021