

CAMES

Historique

Plusieurs réunions de spécialistes chargés de définir le rôle et les fonctions de l'Enseignement Supérieur ont conduit à la constitution d'une "Commission consultative d'expert pour la réforme de l'Enseignement en Afrique et à Madagascar". Une résolution de la Conférence des Ministres de l'Éducation nationale tenue à Paris en 1966 donnait mandat à la commission d'entreprendre une recherche approfondie sur les structures et les enseignements des Universités Africaines et malgaches, dans un large esprit de coopération interafricaine. Les conclusions de la réflexion menée par la Commission leur ayant été soumises à la Conférence de Niamey, tenue les 22 et 23 janvier 1968, les Chefs d'Etats de l'OCAM décidèrent la création du "Conseil Africain et Malgache pour l'Enseignement Supérieur", regroupant à ce jour seize (16) Etats francophones d'Afrique et de l'Océan Indien. La convention portant statut et organisation du CAMES fut signée par les seize (16) Chefs d'Etat ou de Gouvernement, le 26 Avril 1972 à Lomé. Tous les textes juridiques ont été actualisés en 1998-1999 et le Conseil des Ministres du CAMES, a lors de la 17ème Session tenue à Antananarivo en Avril 2000, adopté l'ensemble des textes juridiques actualisés du CAMES, qu'on peut retrouver sur le site web <http://www.lecames.org/spip.php?article1>

Missions

- Promouvoir et favoriser la compréhension et la solidarité entre les Etats membres ;
- Instaurer une coopération culturelle et scientifique permanente entre les Etats membres ;
- Rassembler et diffuser tous documents universitaires ou de recherche : thèses, statistiques, informations sur les examens, annuaires, annales, palmarès, information sur les offres et demandes d'emploi de toutes origines
- Préparer les projets de conventions entre les États concernés dans les domaines de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et contribuer à l'application de ces conventions ;
- Concevoir et promouvoir la concertation en vue de coordonner les systèmes d'enseignement supérieur et de la recherche afin d'harmoniser les programmes et les niveaux de recrutement dans les différents établissements d'enseignement supérieur et de recherche, favoriser la coopération entre les différentes institutions, ainsi que des échanges d'informations.

Organisation

Le Conseil des Ministres

Le Conseil des Ministres est l'instance suprême du CAMES. Il regroupe tous les Ministres ayant en charge l'Enseignement Supérieur et/ou la Recherche Scientifique des pays membres. Il se réunit une fois l'an en session ordinaire et peut être convoqué en session extraordinaire. L'actuel Président du Conseil des Ministres est le Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche de Côte d'Ivoire.

Le Comité des Experts

Le Comité des Experts prépare la session ministérielle. Il est composé de deux représentants par pays membre ou institution membre. Il se réunit une fois l'an en session ordinaire et peut être convoqué en session extraordinaire.

Le Comité Consultatif Général (CCG)

Il supervise et contrôle l'application de l'Accord portant création et organisation des Comités Consultatifs Interafricains. Ses membres sont des Recteurs ou Présidents d'Universités et des Directeurs des Centres Nationaux de Recherche. Les organismes signataires de l'Accord y sont représentés par leurs Directeurs.

SOMMAIRE

A proteome study of <i>Myxobolus episquamalis</i> parasite of flathead mullet (<i>Mugil cephalus</i> Linné 1758) of Senegalese coasts	06
Problématique de la qualité microbiologique des eaux de boisson en milieu scolaire dans les zones rurales : Cas de la Région du Centre-Nord au Burkina Faso.	13
Les minéralisations de manganèse du Nord Téra (Liptako, Ouest Niger) : origine et conditions de mise en place	18
First report of a tomato leaf curl virus (genus <i>Begomovirus</i>) on <i>Corchorus olitorius</i> in Togo (SHORT NOTE)	29
Successional dynamics of tree species during forest recovery in the southeast of Côte d'Ivoire	30

INSTRUCTIONS AUX AUTEURS

Politique éditoriale

La Revue CAMES publie des contributions originales (en français et en anglais) dans tous les domaines de la science et de la technologie et est subdivisée en 9 séries :

- **Sciences des structures et de la matière.** Elle couvre les domaines suivants : mathématiques, physique, chimie et informatique,
- **Sciences de la santé :** médecine humaine, médecine vétérinaire, pharmacie, odonto-stomatologie, productions animales ;
- **Sciences de la vie, de la terre et agronomie ;**
- **Sciences appliquées et de l'ingénieur ;** Littérature, langues et linguistique ;
- **Sciences humaines :** Philosophie, sociologie, anthropologie, psychologie, histoire et géographie ;
- **Sciences économiques et de gestion ;**
- **Sciences juridiques et politiques ;**
- **Pharmacopée et médecine traditionnelles africaines ;**

Toutes les séries publient en moyenne deux numéros par an.

Les contributions publiées par la Revue CAMES représentent l'opinion des auteurs et non celle du comité de rédaction ou du CAMES. Tous les auteurs sont considérés comme responsables de la totalité du contenu de leurs contributions.

Soumission et forme des manuscrits

La soumission d'un manuscrit à la Revue CAMES implique que les travaux qui y sont rapportés n'aient jamais été publiés auparavant, ne soient pas soumis concomitamment pour publication dans un autre journal et qu'une fois acceptés, ne fussent plus publiés nulle part ailleurs sous la même langue ou dans une autre langue, sans le consentement du CAMES.

Les manuscrits, dactylographiés en interligne double en recto sont soumis aux rédacteurs en chef des séries.

Les manuscrits doivent comporter les adresses postales et électroniques et le numéro de téléphone de l'auteur à qui doivent être adressées les correspondances. Les manuscrits soumis à la Revue CAMES doivent impérativement respecter les indications cidessous:

Langue de publication

La revue publie des articles rédigés en français ou en anglais. Cependant, le titre, le résumé et les mots-clés doivent être donnés dans les deux langues.

Ainsi, tout article soumis en français devra donc comporter, obligatoirement, «un titre, un abstract et des keywords», idem, dans le sens inverse, pour tout article en anglais (un titre, un résumé et des mots-clés).

Page de titre

La première page doit comporter le titre de l'article, les noms des auteurs, leur institution d'affiliation et leur adresse complète. Elle devra comporter également un titre courant ne dépassant pas une soixantaine de caractères ainsi que l'adresse postale de l'auteur, à qui les correspondances doivent être adressées.

Résumé

Le résumé ne devrait pas dépasser 250 mots. Publié seul, il doit permettre de comprendre l'essentiel des travaux décrits dans l'article.

Introduction

L'introduction doit fournir suffisamment d'informations de base, situant le contexte dans lequel l'étude a été entreprise. Elle doit permettre au lecteur de juger de l'étude et d'évaluer les résultats acquis.

Corps du sujet

Les différentes parties du corps du sujet doivent apparaître dans un ordre logique.

Conclusion

Elle ne doit pas faire double emploi avec le résumé et la discussion. Elle doit être un rappel des principaux résultats obtenus et des conséquences les plus importantes que l'on peut en déduire.

La rédaction du texte

La rédaction doit être faite dans un style simple et concis, avec des phrases courtes, en évitant les répétitions.

Remerciements

Les remerciements au personnel d'assistance ou à des supports financiers devront être adressés en terme concis.

Références

Les noms des auteurs seront mentionnés dans le texte avec l'année de publication, le tout entre parenthèses.

Les références doivent être listées par ordre alphabétique, à la fin du manuscrit de la façon suivante:

• **Journal** : noms et initiales des prénoms de tous les auteurs, année de publication, titre complet de l'article, nom complet du journal, numéro et volume, les numéros de première et dernière page.

• **Livres** : noms et initiales des prénoms des auteurs et année de publication, titre complet du livre, éditeur, maison et lieu de publication.

• **Proceedings** : noms et initiales des prénoms des auteurs et année de publication, titre complet de l'article et des proceedings, année et lieu du congrès ou symposium, maison et lieu de publication, les numéros de la première et dernière page.

Tableaux et figures

Chaque tableau sera soumis sur une feuille séparée et numéroté de façon séquentielle. Les figures seront soumises sur des feuilles séparées et numérotées,

selon l'ordre d'appel dans le texte.

La numérotation des tableaux se fera en chiffres romains et celle des figures en chiffres arabes, dans l'ordre de leur apparition dans le texte.

Photographies

Les photographies en noir & blanc et couleur, sont acceptées.

Procédure de révision

Les manuscrits sont soumis à la révision des pairs. Chaque manuscrit est soumis au moins à deux référés spécialisés. Les auteurs reçoivent les commentaires écrits des référés. Il leur est alors notifié, par la même occasion, l'acceptation ou le rejet de leur contribution.

NB : Le manuscrit accepté doit, après correction conformément aux recommandations des référés, être retourné aux différents rédacteurs en chef des séries, en format WORD ou DOC.

REDACTEURS EN CHEF DES REVUES

Les auteurs sont invités à envoyer directement leurs articles aux rédacteurs en chef des différentes séries:

• **Sciences des structures et de la matière:**

Pr ABDOULA YB Alassane: aabdouy@yahoo.com (Niamey)

• **Sciences de la santé:**

Pr TOURE Meissa mtoure@ised.sn (Dakar)

• **Sciences de la vie, de la terre et agronomie:**

Pr GLITHO Adolé I. iglitho@yahoo.fr (Lomé)

• **Sciences appliquées et de l'ingénieur:**

Pr FALL Meissa meissaJall@univ-thies.sn (Thiès)

• **Littérature, langues et linguistique:**

Pr AINAMON augustin ainamonaugustin@yahoo.fr (Cotonou)

• **Sciences humaines:**

Pr KADANGA Kodjona kkadanga59@yahoo.fr (Lomé)

• **Sciences économiques et de gestion:**

Pr ONDO Ossa Albert saon4@yahoo.fr (Gabon)

• **Sciences juridiques et politiques:**

Pr SOMA Abdoulaye tikansonsoma@yahoo.fr (Ouagadougou)

• **Pharmacopée et médecine traditionnelles africaines**

Pr OUAMBA Jean Maurille jm_maurille@yahoo.fr (Brazzaville)

Les auteurs dont les articles ont été déposés sur la plateforme en ligne de la revue ou acceptés par les rédacteurs en chef, doivent procéder au règlement des **frais d'insertion** qui s'élèvent à **50 000 FCFA** auprès de l'agence comptable du CAMES, par transfert rapide.

A proteome study of *Myxobolus episquamalis* parasite of flathead mullet (*Mugil cephalus* Linné 1758) of Senegalese coasts

Malick FALL ^{1,*}, Pascal COSETTE ², Julie HARDOUIN ², BhenSikina TOGUEBAYE ¹, Emmanuel CORNILLON ³

Abstract

Myxozoa are endoparasites characterized by a simple cytoplasmic organization and multicellular spores containing polar capsules with extrusible polar filaments. Myxozoans have a complex life-cycle, typically alternating between teleost fish and invertebrate hosts, in which are formed myxospores and actinospores respectively. Both spores contain polar capsules, which are strikingly similar in their morphogenesis and mature structure to the nematocysts found in the phylum Cnidaria (Canning and Okamura 2004). Similarity with cnidarians was also supported by several phylogenetic molecular studies. In this context, we have performed the first large scale proteomic study of a Myxozoa, *Myxobolus episquamalis* which is a parasite of flathead mullet in Senegal. Comparisons with different databases combining different softwares confirm importance of cytoskeleton and central metabolism in the invasion process. The present study identified for the first time neuropeptides and analgesic toxins encoded by the *M. episquamalis*. It also highlighted long peptides presenting strong homologies with proteins of unknown function, a large fraction of them being identified from *Nematostella vectensis* proteome. Homologies with other lower Bilateria raise again the question of the position of Myxozoa at the transition between Cnidarian and Bilaterian.

Keywords: Myxozoa, *M. episquamalis*, Proteomics, Phmmer, Neuropeptide.

¹Département de Biologie Animale Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar.

²UMR CNRS 6270, Plateforme Protéomique PISSARO (IRIB), Université de Rouen, 76821 Mont-Saint-Aignan, France.

³Institut de Biologie Computationnelle (IBC), Institut de Recherche en Cancérologie de Montpellier (IRCM - INSERM U1194), Institut régional

du Cancer Montpellier (ICM) & Université de Montpellier, France.

Corresponding author :

Malick FALL,

Département de Biologie Animale - Faculté des Sciences et Techniques
Université Cheikh Anta DIOP - Dakar, Sénégal

Mail: malickfal@yahoo.fr

Phone:00221776451810/ 00221338252529.

Introduction

Myxozoans are parasites of poikilothermic vertebrates and invertebrates, especially fishes and count amongst the most known enigmatic organisms. Markiw and Wolf (1983, 1984) were the first discovering a tubificid annelids as alternate hosts for *Myxobolus cerebralis*. Later, it has been established that, there may be an obligatory or facultative invertebrate host in most, if not all of the life cycle of myxozoans. Next this two-stage life cycle was described in several marine species (Køie *et al.*, 2004; 2007; 2008; 2013; Rangel *et al.*, 2009; Karlsbakk and Køie, 2012). Vertebrates are considered as intermediate hosts since the sexual process (gametogony) has been observed during the actinospore phase in invertebrates (annelid oligochaete was described as definitive host for some species). A possible direct fish-to-fish transmission was demonstrated for some marine species (Diamant 1997; Redondo *et al.* 2002; Yasuda *et al.* 2002). In these later cases, the proliferative stages are responsible for the transmission of the disease, contradictorily to spores.

There are two classes of Myxozoans, the clades Myxosporea and Malacosporea. Their cell organization is typically eukaryotic with nucleus, endoplasmic reticulum, mitochondria and Golgi cisternae (Canning and Okamura, 2004). Their spores are made of three cell groups: valve cells, polar capsules and a sporoplasm generally with two nuclei, or two sporoplasms, each containing one nucleus. Their polar capsules, used to attach to a new host, are similar to the stinging organelles (nematocysts) of cnidarians. Structure similarities between the myxozoan polar capsules and nematocysts of cnidarians led to consider myxozoan to be aberrant cnidarians (Weill, 1938), a hypothesis further supported by ultrastructural studies (Lom and de Puytorac, 1965; Lom, 1969). First

phylogenetic analysis of the SSU-rDNA allowed placing Myxozoa within the Metazoan (Smothers *et al.*, 1994; Siddall *et al.*, 1995). More recent phylogenomic analyses placed Myxozoa in Cnidaria (Holland *et al.*, 2011; Jimenez-Guri *et al.*, 2007; Nesnidal *et al.*, 2013, Feng *et al.*, 2014). Polar capsules differ from typical nematocysts of cnidarians in lacking chemo- and/or mechano-sensory structures and neural connections that modulate discharge (Jiménez-Guri *et al.*, 2007).

Myxosporean are fish parasites. They are present in both freshwater and marine environments and have a significant incidence on wild and cultured stocks (Timi and Mackenzie, 2015). Few strong epizootic diseases have been described and associated with *Myxobolus pfeifferi*, responsible for the boil disease of barbels or *Myxobolus exiguus* which caused epidemic in flathead mullet of the northern sector of the Black Sea along the Crimean coast (Schulman, 1957). In addition, there are other serious pathogenic concerns with important commercial impact. Thus, in cultured salmonids, many cases of losses were due to *M. cerebralis* but also to *Tetracapsuloides bryosalmonae*, responsible for the mysterious disease called PKD, observed in USA and Europe. Besides, carp Eurasia infection caused by other parasites (such as *Sphaerospora arenicola*, *Sphaerospora molnari*, *Myxobolus eucephalicus*, *Thelohanellus nikolskii*, *Thelohanellus kitauei* or *Chloromyxum cristatum*) may also cause serious damages in fish farms. *Myxobolus episquamalis* Egusa, Maeno and Sorimachi, 1990 was found for the first time in flathead mullet (*Mugil cephalus* Linneaus 1758) in Senegal. It was previously described in *M. cephalus* from Israel, Portugal, Japan and Tunisia. The infected specimens of flathead gray mullet (*Mugil cephalus*) present whitish myxosporidian cystic masses on their bodies, measuring approximately 5-7 mm. The cystic

masses are distributed over the entire body and cover 10 to 70% of the body. They are located on the distal part of the scales and also affected the fins causing malformations. The cyst mass is ovoid, containing numerous spores. The spore is pyriform in front view and each valve presents 7 to 9 markings along the suture wall. The polar capsules are pyriform and extending half of the spore length and formed 5 or 6 coils inside of the polar capsule. Finally, the sporoplasm is binucleate, occupying the posterior part of the spore.

Up to now, very few molecular investigations were dedicated to *M. episquamalis*. Thus we performed a proteomic study to identify *M. episquamalis* cyst expressed proteins. To achieve this goal. Thus, in this study, we performed a proteomics study to address identifications of proteins expressed in *M. episquamalis* cysts. To reach this objective, peptide sequencing was combined to computational methods to identify major functions associated to this stage of development of the parasite.

Materials and methods

Biological material

Mugil cephalus Linnaeus 1758 is a eurythermal and euryhaline fish having a wide geographical range. It hosts many parasites including *Myxobolus episquamalis* which belongs to the phylum Myxozoa and parasitizes apical part of the scales where it induces the formation of cysts (Fig.1). The scales of parasitized fishes were removed and ground with cysts in a mortar with PBS. The homogenate was centrifuged for ten minutes at 2000 tr/mn. The pellet were distributed into 1.5ml tubes and stored at 4°C.



Figure 1. Flathead mullet (*Mugil cephalus*) presenting numerous cysts on its scales.

These cysts contain mature spores of the myxosporean parasite *Myxobolus episquamalis*. Microscopic cysts were measured between 150 and 400 microns and form a cystic mass of around 6-7 mm length. Arrow indicates cystic mass containing microscopic cysts.

Protein extraction

The proteins of the spores of *Myxobolus episquamalis* were extracted in 1ml of a lysis buffer containing 7M urea, 2M thiourea, 4% CHAPS, 2% DTT and 10mM Tris. To allow this, spores were sonicated 5 times using a microtip probe. This initial treatment was followed by 5 freezing-thawing cycles at -80°C and 37°C, respectively. The resulting material was centrifuged at 20800g for 30 min at 4°C. The pellets were stored at -20°C.

Two-dimensional gel electrophoresis (2-DE)

For all experiments, two biological replicates were obtained and the corresponding two-dimensional gels made in duplicate. Protein concentrations were evaluated

using the Bradford protein assay (Bio-Rad) with BSA used as standard. For the first dimension (isoelectric focusing, IEF), 50 µg of proteins (final volume 350 µL) were loaded onto immobilized pH gradients (ImmobilineDryStrip pH 3-10, 18 cm; GE Healthcare). IEF was performed using an IEF-CELL (Bio-Rad) as follows: active rehydration for 1h at 350 V, 1h at 750V, 1h at 1500V and final focusing for 28h at 3500 V. The strips containing focused proteins were then equilibrated for 10 min in a buffer containing 6 M urea, 30% glycerol, 2% SDS, 50 mM Tris-HCl (pH 6.8) with 5 mM dithiothreitol, and then for an additional 10 min in the same solution except that DTT was replaced by 25 mM iodoacetamide. Thereafter, the second-dimension gel separation was ensured by sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel (SDS-PAGE) electrophoresis using a 12.5 % polyacrylamide resolving gel (width 16 cm, length 20 cm, thickness 0.75 cm). SDS-PAGE was carried out using Protean II Xi vertical systems (Bio-Rad) according to the protocol described by the manufacturer. Migrations were performed at 10 mA per gel in the stacking gel and 20 mA in the running gel. Finally, proteins were revealed using silver staining and the gels were scanned using a dedicated imager (ProXpress, Perkin-Elmer). Protein patterns were analyzed using the Progenesis SameSpots software (v3.0; Nonlinear Dynamics).

Analysis by Mass Spectrometry

Spots were excised from the polyacrylamide gel and sliced into small pieces. Excised fragments were then washed several times and dried in a SpeedVac centrifuge for 15 minutes. Trypsin digestion of protein spots was performed overnight at 37°C by using a dedicated automate (MultiPROBE II, Perkin Elmer) with an enzyme/protein ratio of 1/20 (w/w). The gel fragments were then incubated several times for 15 min in water/acetonitrile mixtures acidified with 0.1% TFA, to allow peptide extraction from the gel pieces. After lyophilization, the peptide extracts were suspended in 10 µL of 0.2% formic acid (FA).

The resulting samples were analyzed with an LTQ Orbitrap mass spectrometer Velos (Thermo Scientific) equipped with a nano-ESI and coupled to a nano-chromatography system (Easy-nLC II, Thermo Scientific). After loading the sample on an enrichment column, separation was achieved on a C18 column (Nikkyo Technos, Japan) using a linear gradient of 15% to 45% of B buffer in 30 min (buffer A: H₂O/0.1% FA; buffer B: CH₃CN/0.1% FA)

The mass spectrometer was operated in positive mode with a capillary voltage set at 1.5 kV and the source temperature set at 200 °C. The samples were analyzed by HCD fragmentation using a method referenced "top20". The initial MS scan was recorded in the Orbitrap analyzer with a resolution of 60000 on a mass range m/z 400-1800 (mono-charged ions were not selected for fragmentation and dynamic exclusion was applied).

Label Free

For these analysis, the spore proteins were obtained in the same manner as described above. Then, 50µg of the whole protein extract were concentrated within the stacking gel of SDS-PAGE experiment. After a short period of migration (< 1 h), the revealed protein band was cut and digested with 2 µg of trypsin. After solvent evaporation, the whole

peptide pool was suspended in aqueous solution of 0.1% formic acid prior to analysis by mass spectrometry. MS settings were similar to those described previously except the gradient duration which was increased to 120 min.

Protein identification

For protein identification, raw data files were processed either using Proteome Discoverer (V1.3, Thermo Scientific) or Peaks (V6.0, Bioinformatic Solutions, Canada) for de novo sequencing of fragmentation data. To achieve these identifications, parameters used included 2 missed cleavages, variable modifications of cysteine (carbamidomethylation) and methionine (oxidation). The tolerance of the precursor ion mass was set to 10.0 ppm and that of fragment ions to 0.05 Da. To validate protein identification, the protein had to be characterized by at least 2 peptides with individual ion fragmentation score higher than 53 (default value of Mascot).

Sequence comparison

Mascot and Peaks analysis was used to identify protein homologues and there by infer functional annotation. Secondly HMMER was used to query sequences, using phmmer web interface at EBI (<http://www.ebi.ac.uk/Tools/hmmer/>). We choose to compare our peptides of length over 11 amino-acids (1497 sequences) with the Uniprot data base (<http://www.uniprot.org/>). Best homologues were kept for functional and taxonomic analysis.

Results

Protein identification.

Two-dimensional gel electrophoresis revealed the presence of a large panel of proteins distributed all over the gel (Fig. 2). On the pH gradient (range from 3 to 10), we noticed that high molecular weight proteins had some trouble getting out of the staking gel. Added to this is the presence of spots of varying size and intensity between replicates.

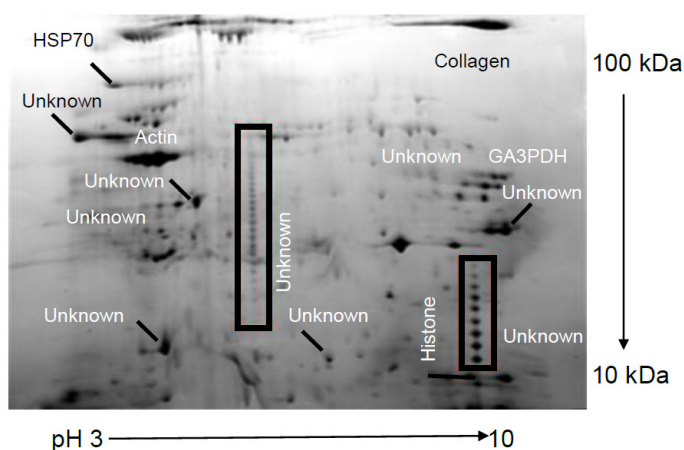


Figure 2. Two dimension electrophoresis gel of protein extracts from *Myxobolus episquamalis*.

Protein spots that were excised and analyzed by mass spectrometry are highlighted. Unfortunately, probably due to lack of genomic sequence available, many excised spots remain unannotated.

A set of 21 reliable spots were extracted from gel and submitted to trypsin digestion. Mass spectrometry analysis and Mascot searches provide annotation for only few proteins with strong background of contaminant (among which keratin and trypsin). Positive annotation was kept

for proteins that were correctly identified with at least two peptides. This combination of analysis enabled the unambiguous identification of actin, collagen, histone, heat shock protein 70 (HSP70), glyceraldehyde-3 phosphate dehydrogenase (GA3PDH) and triosephosphate isomerase.

These proteins have been conserved during evolution. It was not possible to distinguish whether they were corresponding to *M. episquamalis* proteins or host contamination as no genome data were available for both organisms. The total protein extracts were analyzed using shotgun analysis for whole proteome analysis of *M. episquamalis* proteins. A set of 3121 peptides were kept as significant after a filtering stage based on the peptide score threshold application using Peaks. Peptides above the threshold did not yield much significant hit allowing a very low FDR (Fig. 3A).

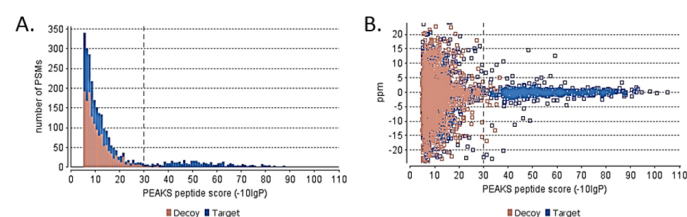


Figure 3. Validation of proteins identification.

A. The total number of peptide sequence match (PSM) was plotted against the peptide probability score (true database in blue and decoy database in pink). This allowed to estimate a probability score of 30 to propose a low FDR while maintaining the highest level of protein identifications. **B.** The peptide score was also plotted against the difference of mass (in ppm). This graph highlighted different distributions of Δm depending on the database used for identification searches.

This was supported by the fact that average Δm (difference between observed and calculated masses) was much lower for true positives than for hits obtained when searching against the decoy database (Fig. 3B). About 350 peptides at the 3121 full set of filtered peptides had homologies with 788 proteins present in the database. Many peptides match with several proteins but in most cases they were orthologues. Reciprocally, 196 proteins of 788 homologues were identified with at least two peptides. Altogether, PEAKS analysis defines a non-redundant set of 254 proteins matching with the 3121 peptides that were initially selected.

Functional analysis of *Myxobolus episquamalis* peptides.

Functional analysis was performed using the 254 protein groups characterized after shot-gun mass spectrometry analysis and compared with a second analysis that was performed only on 1497 peptides that were longer than 10 residues from the initial set of 3121 peptides. These 1497 peptides were compared with the Uniprot database using Phmmer online server. We obtained 352 significant homologues. The level of proteins with unknown function was of 37.5% and 78.5% after Peaks and Phmmer analysis respectively (Fig. 4A and 4B).

The low percentage of homologues of known function with Phmmer could result from the composition of the Uniprot data base which contains a large proportion of peptides from recently sequenced and automatically annotated genome. On the opposite, the Peaks database was composed of peptides that were considered to be relevant for mass-spectrometry

analysis. Most of them are selected among proteins from well annotated genomes.

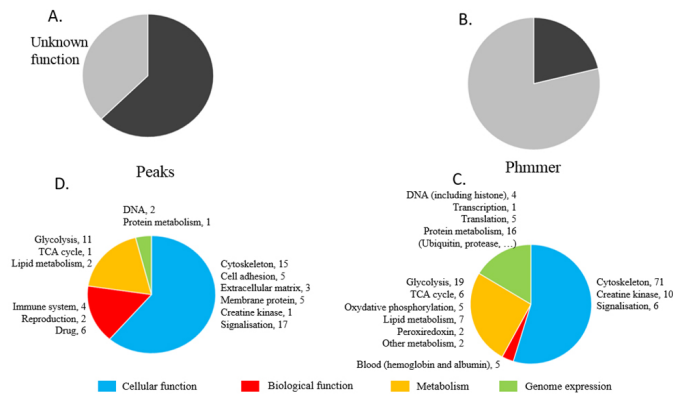


Figure 4. Distribution of main functions associated with protein homologues of *Myxobolus episquamalis* peptides identified by label-free mass spectrometry analysis.

A. Frequency of proteins with known function after Peaks *de novo* sequencing. **A total of 254 non-redundant protein groups** were characterized after Peaks analysis.

B. Frequency of proteins with known function after Phmmer analysis. A total of 352 peptides displayed significant level of homology (e-value < 0.01) against the Uniprot database using phmmer software.

C. Major functional categories of the **159 proteins homologues with known annotation identified by Peaks**. Number of hits per function is given after the coma.

D. Major functional categories of the 75 proteins with known annotation identified by phmmer analysis. Number of hits per function is given after the coma.

Functional annotation associated to proteins was classified into four groups: cellular functions, biological functions, metabolism and genome expression (Fig. 4B and 4C). Peaks analysis gave 159 protein homologues with known function and Phmmer 75 homologues with known function. They correspond to major functions found in eukaryotes. Only 17 peptides have been found in common between Peaks and Phmmer analysis. Analysis at functional level revealed high redundancy for some proteins such as Myosin, actin or glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase. Redundancy was higher for Peaks analysis. Protein functions that were in common between both methods represented about one third from the analyses (Peaks: 61/159; Phmmer: 24/75). The most redundant protein functions in common with both sets of homologues were cytoskeleton proteins (actin, myosin, nebulin and troponin) and enzymes of the glycolysis, (glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase, triosephosphate isomerase and phosphoglucumutase). Ubiquitin was also found in common in analysis as well as creatine kinase and calmodulin, two enzymes sufficiently present in muscles. More specific proteins and enzymes were identified after either the Peaks or Phmmer analysis. The Peaks analysis identified a large number of cytoskeleton enzymes and a large proportion of enzymes of the central metabolism (Fig. 4C). Keratin contamination was less observed than during 2DE analysis. The same analysis also identified hemoglobin and albumin. Possible contamination with host tissue cannot be excluded even if homologues among lower Metazoan were also found for most common proteins ‘e.g. actin, tubulin, calmodulin, elongation factor EF1alpha or histone H2A). Phmmer analysis revealed less homology with muscle proteins as demonstrated by the composition of cytoskeleton function which included mainly actin and myosin.

Comparison to the Uniprot data base provided more information about proteins from *M. episquamalis*, including cellular periphery and adhesion: a protein from the adhesive plaque matrix, a putative adhesin/hemagglutinin found in bacteria, a mucin protein with matches in worm eukaryotes. Homology with the transmembrane protease serine 9 could be related with maturation of the extracellular matrix but could also be considered as a host-interacting factor. Functions related to signaling were more heterogeneous. In addition, homology was found with creatine kinase from sea anemone (1 peptide) and calmodulin from oyster (3 peptides).

Taxonomic analysis of Myxobolus episquamalis peptides

The distribution of organisms presenting protein homologues provided interesting insight about the taxonomic position of *M. episquamalis*. Analysis was performed on the full set of 788 homologues and synthetic constructs were removed. We observed that 664 of the 769 remaining homologues were originating from metazoan (Fig. 5A). Indeed Peaks database was built to promote peptide matching and composition is therefore strongly based for well characterized peptides. Nevertheless, two matches with a virus polyprotein were intriguing. The Phmmer analysis was performed against Uniprot database which could be considered as unbiased even though no myxozoan genome has been sequenced so far.

By keeping only the best homologies (homologue with lower E-value) for each peptide, only a small proportion of metazoans were retained during Peaks analysis (Fig. 5B). No function was associated to bacterial homologues. Fungi proteins with known function were related to signalization (2 peptides) and lipid metabolism (one peptide). Two peptides were similar to surface antigens of protists. Three peptides displayed homologies with mimiviridae proteins which are known pathogens of protists and lower metazoan.

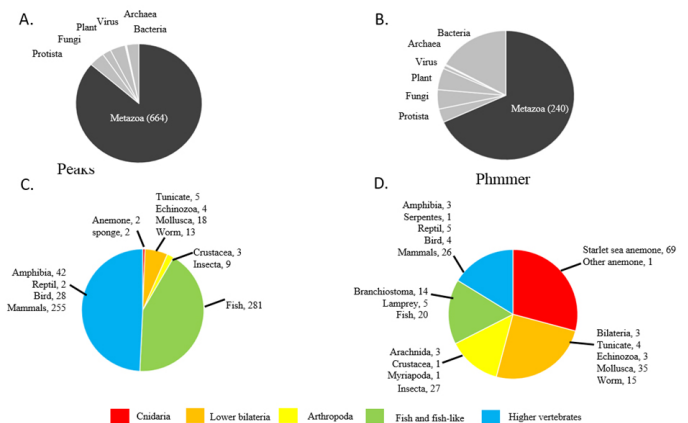


Figure 5. Taxonomic distribution of protein homologues of *Myxobolus episquamalis* peptides identified by mass spectrometry analysis.

A. Frequency of proteins of metazoan origin after Peaks analysis and comparison with other major kingdom or branches of living organisms. **A total of 769 natural protein homologues** were characterized.

B. Frequency of proteins of metazoan origin after Phmmer analysis and comparison with other major kingdom or branches of living organisms. A total of 352 peptides had significant level of homology (e-value < 0.01).

C. Distribution of proteins identified by Peaks analysis among major groups of metazoan. Number of hits per groups is given after the coma.

D. Distribution of proteins identified by Phmmer analysis among major groups of metazoan. Number of hits per groups is given after the coma.

Phmmer analysis shed original light on *M. episquamalis* peptide composition (Fig. 5D). Almost 30%o homology search results were cnidarian proteins of *Nematostella vectensis* (Starlet sea anemone). These results are in agreement with the taxonomic position of Myxozoa among cnidarian. The second larger organism providing homology results was the mollusk *Lottia gigantean* whose genome has been sequenced. More generally, Phmmer analysis provided homologues in a wide range of organism, including animals which are often described at the transition between groups such as Amphoxius, Lamprey or Coelacanth. Despite the availability of the tunicate *Ciona intestinalis* genome, we observed little homology with this organism.

Discussion

Myxosporidians are major fish parasites causing outbreaks with serious economic impact. The objective of this work was to provide an insight on the inventory of proteins in *M. episquamalis* by mass spectrometry. To reach this goal, we used two approaches, namely 2-DE and shotgun mass spectrometry, coupled to sequence homology searches after *de novo* sequencing. To get high quality results, samples were analyzed by a high resolution mass spectrometer associated to a very good mass accuracy (~ 1ppm). One major problem was related to the presence of chitin in the spore of Myxozoa as evidenced by the work of Julius *et al* (1993). The later demonstrated resistance of spores to alkaline hydrolysis, which strongly complicated the extraction of proteins from spores of *M. episquamalis*. Evidence of contamination with fish proteins was provided by the distribution of protein homologues. The Peaks analysis was more responsive to this contamination. Major homologues were found with the most common protein in the animal cell such as actin or enzymes of the glycolysis. Presence of Myosin provides also evidence of contamination with muscle cell. Taxonomic analysis of Peaks homologues confirmed the host contamination as 87.5% of the proteins were part of the phylum Metazoans. The contamination with animal proteins was also found with Phmmer analysis where 68% of the homologues had homologies with Metazoan peptides. Nevertheless, both functional and taxonomic analysis confirmed that relevant homologies were found with *M. episquamalis* peptides. Even some of the homologies with animal proteins could be the result of *M. episquamalis* peptides matches with nearly identical residues of highly conserved proteins. The confusion of the analysis may result from the fact that the genome of the flathead mullet and of a Myxozoa is not available.

The combination of 2-DE and shotgun analyses identified proteins that were classified into five groups: cellular function, biological function, metabolism, genome expression and proteins of undetermined function, this latter comprising the majority of proteins. One of the main reason for this relies to the fact that the closest organisms that has been sequenced remain poorly annotated. Strong homologies with the *Nematostella vectensis* starlet sea anemone and *Lottia gigantean* genome do not help us to address a complete map of the pathways. Strong homologies with functions found in bilateria raised again the origin of the Myxozoa and their position in the evolution as it was questioned in the past by the discovery

of *Hox* genes in Myxozoa genome (Anderson *et al* 1998). The identification of peptides matching with neuropeptides and analgesic toxins offers new output on the interaction between Myxozoa and their host. It is the first time that pathogenic factors are described in Myxozoa. A major output of peptide annotations was the presence of a large proportion of records within microorganism including bacteria, archaea, protists, fungi and virus (112 proteins 352 Phmmer homologues) About one third of these organisms were marine microbes such as *Cyanobacteria*, *Oceanospirillales*, *Algae*, *Perkinsus* and *Stramenopiles*, which revealed the composition of the microbiome associated with the host scale and *M. episquamalis* cysts The presence of Mimivirus peptides in the protein set may suggested that Myxozoans may be infected by specific viruses. Among identified proteins were actin, tropomyosin, myosin, tubulin, troponin, also proposed in others works (Hartigan *et al* 2016; Gema *et al*, 2012; Uspenskaya and Raikova 2004). Indeed, the presence of F-actin is consistent with previous investigations that have highlighted for the first time cellular components and mechanisms involved in the motility of Myxozoans, through a study dedicated to *Ceratomyxa puntazzi* (Gema *et al*, 2012). Their work based on a morphological study (ultra-structural and three-dimensional structure) revealed the role of filamentous actin in the different developmental stages of *C. puntazzi*. In addition, Monteiro *et al* (2002) characterized the presence of muscle blocks in the Myxozoa worm *Buddenbrokia*. Uspenskaya and Raikova (2004) demonstrated the role of F-actin and β -tubulin cytoskeletal proteins in the anchoring mechanism of myxosporidians during the infestation phase.

The presence of collagen was shown by 2-DE analysis but not confirmed after shotgun analysis. Jason *et al*, (2011) reported the presence of a gene encoding a mini-collagen called Tb-Ncol-1 in a *Tetracapsuloides bryosalmonae*. Interestingly, a similar protein had been identified in nematocysts of cnidarians (Ulrike *et al*, 2002). More recently, transcriptomic analysis revealed the presence of several genes encoding nemato-galectins and mini-collagens in myxozoa and cnidarian genomes (Shpirer *et al* 2014).

It has been demonstrated some phylogenetic relationship between Cnidarians and Myxozoa, or nematocysts, which are special cells of cnidarians containing a polar filament whose primary role is the defense and capture of prey which could further confirm the mechanical role of myxosporidians polar filament in the spore attachment to host cells. Noteworthy, a polyclonal antibody (pAbMPPF) was generated against the polar filament of the myxozoa *Myxobolus pendula* (Ringuette *et al*, 2011). In western blot analysis, many bands located at 35, 40, 42, 55, 70, 100, and 200 kDa were revealed in *M. pendula* while a major band located at 40 kDa and 3 minor bands at 48, 70, and 130 kDa were found in *M. bartai*. The proteins corresponding to pAbMPPF reactive spots possess glycine-rich hydrophobic domains with sequence similarity to spinalin (Ringuette *et al*, 2011). Spinalin is a 24-kDa glycine- and histidine-rich protein in spines of Hydra nematocysts, with regions presenting homology to loricroins and keratins. Unfortunately, these proteins were not identified during this analysis. The presence of the polar tube was also described in microsporidia. Proteins from the polar tube of

Encephalitozoon cuniculi were already described (Delbac *et al.*, 1998; Delbac *et al.*, 2001; Peuvel *et al.*, 2002) but there were no record from *M. episquamalis* peptides. Understanding of the molecular organization and function of the polar tube that is conserved from protist to cnidarian remains a challenge for future studies.

Acknowledgments

Malick Fall was funded by the Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche du Sénégal through the FIRST « Fonds d'Impulsion à la Recherche Scientifique et Technologique ».

EC is supported by the ANR (Investissements d'avenir/Bioinformatique): -11-BINF-0002 (Institut de Biologie Computationnelle).

Ethical approval

All applicable international, national, and/or institutional guidelines for the care and use of animals were followed.

Bibliography

- 1- A. [Hartigan](#), [I. Estensoro](#), [M. Vancová](#), [T. Bílý](#), [S. Patra](#), [E. Eszterbauer](#), [A. S. Holzer](#). 2016 : New cell motility model observed in parasitic cnidarians *Sphaerospora molnari* (Myxozoa: Myxosporea) blood stages in fish. Scientific Reports PMC 5159882.
- P: 1-12. DOI: 10.1038/srep39093.
- 2- Anderson C.L., Canning E.U., Okamura B. 1998: A triploblast origin for Myxozoa *Nature* 392, 346-347.
- 3- Canning E.U., Okamura B. 2004: Biodiversity and evolution of the Myxozoa. *Adv. Parasitol.* 56, 43-131.
- 4- Diamant A. 1997: Fish-to-fish transmission of a marine myxosporean. *Dis. Aquat. Organ.*30:99-105.
- 5- Delbac F., Peuvel I., Metenier G., Peyretailade E., Vivares C.P. 2001: Microsporidian invasion apparatus: identification of a novel polar tube protein and evidence for clustering of ptp1 and ptp2 genes in three *Encephalitozoon* species. *Infect. Immun.* 69:1016-24.
- 6- Delbac F., Peyret P., Méténier G., David D., Danchin A., Vivarès C.P. 1998: On proteins of the microsporidian invasive apparatus: complete sequence of a polar tube protein of *Encephalitozoon cuniculi*. *Mol. Microbiol.* 29:825-34.
- 7- Egusa S., Maeno Y., Sorimachi M. 1990: A new species of Myxozoa, *Myxobolus episquamalis* sp. nov. Infecting the scales of the Mullet, *Mugil cephalus* L. *Fish. Pathol.*, 25: 91-97.
- 8- Feng J.M., Xiong J., Zhang J.Y., Yang Y.L., Yao B., Zhou Z.G., Miao W. 2014: New phylogenomic and comparative analyses provide corroborating evidence that Myxozoa is Cnidaria. *Mol. Phylogenet. Evol.* 81:10-8.
- 9- Gema A.B., James E.B, Juan A.R., Astrid S.H. 2012: 3D Morphology, ultrastructure and development of *Ceratomyxa puntazzi* Stages: first insights into the mechanisms of motility and budding in the Myxozoa. *PLoS One* 7:e32679.
- 10- Hartigan, I. Estensoro, M. Vancová, T. Bílý, S. Patra, E. Eszterbauer, A. S. Holzer. 2016 : New cell motility model observed in parasitic cnidarians *Sphaerospora molnari* (Myxozoa: Myxosporea) blood stages in fish. Scientific Reports PMC 5159882
- 11- Holland J.W., Okamura B., Hartikainen H., Secombes C.J. 2011: A novel minicollagen gene links cnidarians and Myxozoans. *Proc. Biol. Sci.* 278:546-553.
- [Jason W. Holland](#), [Beth Okamura](#), [Hanna Hartikainen](#), [Chris J. Secombes](#). 2011: A novel minicollagen gene links cnidarians and myxozoans. *Proc. R. Soc. B*22 vol. 278 no. 1705:546-553.
- 12- Jason W. Holland, Beth Okamura, Hanna Hartikainen, Chris J. Secombes. 2011: A novel minicollagen gene links cnidarians and myxozoans. *Proc. R. Soc. B*22 vol. 278 no. 1705:546-553
- 13 - Jimenez-Guri E., Philippe H., Okamura B., Holland P.W. 2007: *Buddenbrockia* is a cnidarians worm. *Science* 317:116-118.
- 14- Julius L., Petr V., Jiří L. 1993: Detection of chitin in spores of *Myxobolus muelleri* and *M. subepithelialis* (Myxosporea, Myxozoa). *Parasitology. Research.* 79:439-440.
- 15- Karlsbakk E., Køie M. 2012: The marine myxosporean *Sigmomyxa sphaerica* (Thélohan1895) gen.n.,comb.n (syn.*Myxidium sphaericum*) from gartfish (*Belone belone* (L)) uses the Polychaete *Nereis pelagic* L. as invertebrate host. *Parasitol. Res.* 110:211-218.
- 16- Køie M., Karlsbakk E., Einen A.C., Nylund A. 2013: A parvicapsulid (Myxozoa) infecting *Sprattus sprattus* and *Clupea harengus* (Clupeidae) in the Northeast Atlantic uses *Hydroides norvegicus* (Serpulidae) as invertebrate host. *Folia Parasitol.* 60:149-154.
- 17- Køie M., Karlsbakk E., Nylund A. 2008: The marine herring Myxozoan *Ceratomyxa auerbachii* (Myxozoa, Ceratomyxidae) uses *Choneinbundi buliformis* (Annelida; Polychaeta; Sabellidae) as invertebrate host. *Folia Parasitol.*55:100-104.
- 18- Køie M., Karlsbakk E., Nylund A. 2007: A new genus *Gadimyxa* with three new species (Myxozoa Parvicapsulidae) parasitic in marine fish (Gadidae) and the two-host life cycle of *Gadimyxa atlantica*. *n.sp.* *J.Parasitol.* 93:1459-1467.
- 19- Køie M., Whipps C.M., Kent M.L. 2004: *Ellipsomyxa gobii* (Myxozoa; Ceratomyxidae) in the common goby *Pomatoschistus microps* (Teleostei; Gobiidae) uses *Nereis spp* (Annelida; Polychaeta) as invertebrate hosts. *Folia Parasitol.* 51:14-18.
- 20- Lom J. 1969: Notes on the ultrastructure and sporoblast development in fish parasitizing myxosporidian of the genus. *Z. Zellforsch. Mikroskop. Anat.* 97:416-437.
- 21- Lom J., De Puytorac P. 1965 : Studies on the myxosporidian ultrastructure and polarcapsule development. *Protistologica* 1:53-65.
- 22- Markiw M.E., Wolf K. 1983: *Myxosoma cerebralis* (Myxozoa, Myxosporea) ethiologic agent of Salmonid whirling disease requires Tubificid worm (Annelia: Oligochaeta) in its life cycle. *J. Protozool.* 30: 561-564.

- 23- Monteiro A.S., Okamura B., Holland W.H. 2002: Orphan worm finds a home: *Buddenbrokia* is a myxozoan. *Molecular Biology and Evolution*. 19, 968-971.
- 24- Nesnidal M.P., Helmkampf M., Bruchhaus I., El-Matbouli M., Hausdorf B. 2013: Agent of whirling disease meets orphan worm: phylogenomic analyses firmly place Myxozoa in Cnidaria. *PLoS ONE* 8:e54576.
- 25- Peuvél I., Peyret P., Méténier G., Vivarès C.P., Delbac F. 2002 : The microsporidian polar tube: evidence for a third polar tube protein (PTP3) in *Encephalitozoon uniculi*. *Mol. Biochem. Parasitol.* 122:69-80.
- 26- Rangel L.F., Santos M.J., Cech G., Székely C. 2009: Morphology, molecular data, and development of *Zschokkella mugilis* (Myxosporea: Bivalvulida) in a polychaete alternate host. *J. Parasitol.* 95:561–569.
- 27- Redondo M.J., Palenzuela O., Riaza A., Macías Á., Álvarez-Pellitero P. 2002: Experimental transmission of *Enteromyxum scophthalmi* (Myxozoa), an enteric parasite of turbot *Scophthalmus maximus*. *J. Parasitol.* 88:482-488.
- 28- Ringuette M.J., Koehler A., Desser S.S. 2011: Shared antigenicity between the polar filaments of myxosporeans and other Cnidaria. *J. Parasitol.* 97: 163-6.
- 29- Schulman S.S. 1957 : Note sur la pathogénèse de la Myxosporidie *Myxobolus exiguus* et sur les epizooties dues à ce parasite. *Bull.Rech. Expl. Poissons Lacs et rivières*, 42 :328 (en Russe).
- 30- Siddall M.E., Martin D.S., Bridge D., Desser S.S., Cone D.K. 1995: The demise of a phylum of protists: phylogeny of Myxozoa and other parasitic Cnidaria. *J. Parasitol.* 81:961-967.
- 31- Smothers J.F., Von Dohlen C.D., Smith L.H Jr., Spall R.D. 1994: Molecular evidence that the myxozoan protists are metazoans. *Science* 265:1719-1721.
- 32- Shpirer E., Chang E.S., Diamant A., Rubinstein N., Cartwright P., Huchon D. 2014: Diversity and evolution of myxozoan minicollagens and nematogalectins. *BMC Evolutionary Biology*. 14:205
- 33- Timi J.T., Mackenzie K. 2015: Parasites in fisheries and mariculture. *Parasitology*. 142:1-4.
- 34- Ulrike E., Suat O., Ruth E., Barbara P., Friedrich L., Thomas W.H. 2002: Now a novel protein with minicollagens Cyst-rich domains is involved in nematocyst formation in Hydra. *J. Cell Sci.* 115:3923-3934.
- 35- Uspenskaya A.V., Raikova O.I. 2004: F-actin and beta-tubulin localization in the myxospore stinging apparatus of *Myxobolus pseudodispar* Gorbunova, 1936 (Myxozoa, Myxosporea). *Tsitologiya* 46:748-54.
- 36- Weill R. 1938 : L'interprétation des Cnidosporidies et la valeur taxonomique de leur cnidome. Leur cycle compare à la phase larvaire des Narcomeduses Culinides. *Trav. Station Zool. Wimereux* 13:27-744.
- 37- Wolf K., Markiw M.E. 1984: Biology contravenes taxonomy in the Myxozoa: New discoveries show alternation of invertebrate and vertebrate hosts. *Science* 225:1449-1452.
- 38- Yasuda H., Okoyama T., Iwata K., Tun T., Yokoyama H., Ogawa K. 2002: Fish-to-fish transmission of *Myxidium spp.* (Myxozoa) in cultured tiger puffer suffering from emaciation disease. *Fish. Pathol.* 37:29-33.

Problématique de la qualité microbiologique des eaux de boisson en milieu scolaire dans les zones rurales : Cas de la Région du Centre-Nord au Burkina Faso.

Titre court : Qualité des eaux de boisson dans les écoles de la Région du Centre-Nord au Burkina Faso.

Kaboré Aminata^{*1}, Savadogo Boubacar², Sawadogo Jacques¹, Konaté Almamy¹, Savadogo W. Paul¹, Kaboré I. Brigitte³, Nikiéma Z. P. Lambert³, Dianou Dayéri²

Résumé

Cette étude a été initiée par l'ONG Catholic Relief Services à travers son projet «koom-yilma» pour faire l'état des lieux de la qualité de l'eau consommée dans les écoles concernées par le programme d'alimentation scolaire «beeogo-biiga» dans les provinces du Bam et du Sanmatenga. Cette évaluation permettra la mise en œuvre des interventions efficaces garantissant la qualité des eaux consommées dans les dites écoles. Pour ce faire, les bactéries indicatrices de contamination fécale (*Escherichia coli*, coliformes fécaux, streptocoques fécaux) ont été isolées et dénombrées dans les échantillons d'eau de forage, des postes d'eau disposés dans les salles de classe et dans les récipients individuels de boisson des élèves suivant la méthode de filtration sur membrane et étalement sur des milieux de culture spécifiques selon la norme NF EN ISO 9308-1 (2000). Globalement, il ressort que l'eau issue des forages est exempte de pollution microbienne d'origine fécale. Cependant, 62,96% de l'eau des postes d'eau potables sont contaminées par des coliformes fécaux, 14,81% par *E. coli* et 33,33% par des streptocoques fécaux. Pour les échantillons d'eau des récipients individuels des élèves, 95,95% contiennent des coliformes fécaux, 61,6% des *E. coli* et 70,7% des streptocoques fécaux. Les résultats ont également montré que la contamination de l'eau est en lien avec l'hygiène de l'environnement scolaire mais indépendant du niveau de scolarisation. Une éducation sur les bonnes pratiques d'hygiène ainsi que l'adoption de méthodes de désinfection de l'eau s'imposent donc pour garantir la qualité de l'eau consommée dans les écoles rurales au Burkina Faso.

Mots clés : eau potable, qualité microbiologique, hygiène, école rurale, Burkina Faso.

Abstract

This study was initiated by "Catholic Relief Services" through its project "koom-yilma" to take stock the quality of water consumed in schools concerned by the school food program called "beeogo-biiga" in Bam and Sanmatenga in Burkina Faso. The objective was to assess the microbiological quality of drinking water in order to implement effective interventions guaranteeing safe drinking water consumption in schools area. Three (3) fecal pollution indicators namely *Escherichia coli*, fecal coliforms and fecal streptococci were isolated and counted in drilling water, water stored in the classrooms and in student's individual drinking containers following the membrane filtration technique. Bacterial cells were concentrated on a 0.2 µm Millipore membrane filter, followed by culture on the chromogenic RapidE. Coli 2 Agar medium to detect *Escherichia coli* and coliform bacteria or on the bile-esculine-azide medium to identify fecal streptococci. Overall, it appears that all drilling waters were exempt of fecal pollution. However, 62.96% of water stored in classroom are contaminated by fecal coliforms, 14.81% by *E coli* and 33.33% by fecal streptococci. For water samples from students individual drinking containers, 95.95% contain fecal coliforms, 61.6% *E coli* and 70.7% fecal streptococci. In addition, the results showed that the water pollution is related to school environment hygiene but independent of schooling level. Thus, an education on good hygiene practices and the adoption of disinfection method of water are necessary to guarantee the quality of water consumed in the rural schools area in Burkina Faso.

Key words: Drinking water, microbiological quality, hygiene, rural schools, Burkina Faso.

¹Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA), 04 BP 8645 Ouagadougou, Burkina Faso.

²Institut de Recherche en Sciences de la Santé (IRSS), 03 BP 7192 Ouagadougou, Burkina Faso.

³Catholic Relief Service (CRS), 01 BP 469 Ouagadougou 01, Burkina Faso.

Auteur pour correspondance : S/C INERA 04 BP 8645 Ouagadougou 04, Burkina Faso

Téléphone : + 226 70 38 56 99 / 78 95 93 89 Courriel : kab.amina@yahoo.fr

Introduction

Au Burkina Faso, malgré la volonté politique environ 50% des écoles en milieu rural ne disposent pas de point d'eau potable et 30% n'ont pas de toilettes fonctionnelles (MENA, 2017). En outre, en dépit de l'existence de sources améliorées d'eau potable, on note une persistance des maladies hydriques dans les zones rurales particulièrement en milieu scolaire où la consommation d'une eau sure demeure un défi à relever. Or il est bien connu que la consommation d'eau insalubre et les mauvaises conditions d'hygiène ont non seulement des conséquences néfastes sur la santé des

enfants de moins de 5 ans, mais affectent également la santé, la fréquentation scolaire et les capacités d'apprentissage des enfants en âge d'être scolarisés (UNICEF, 2006). En renfort à son programme alimentaire «beeogo biiga», Catholic Relief Services a initiée le projet «koom-yilma» pour contribuer à l'amélioration de l'accès à l'eau potable dans les écoles rurales du Burkina Faso. C'est dans ce contexte que durant la première phase du projet, 57 forages équipés de pompe à motricité humaine ont été réalisés dans des écoles des provinces du Bam et du Sanmatenga dans la région du Centre-Nord. Outre la réalisation d'infrastructures, le projet

veut également contribuer à améliorer les pratiques en matière d'Eau, d'Hygiène et d'Assainissement (WASH) chez les élèves, les parents et la communauté au regard de la forte présence de maladies hydriques dans les zones d'intervention. L'assurance de la qualité de l'eau de boisson constitue donc un élément fondamental de la prévention primaire depuis plus de 150 ans et continue d'être la pierre angulaire de la prévention des maladies à transmission hydrique et de la lutte en la matière (OMS, 2011). Pour mieux suivre les performances du projet, mais aussi évaluer la pertinence et la cohérence de la stratégie d'intervention proposée, une évaluation de base de la qualité microbiologique de l'eau de boisson a été réalisée dans des écoles à différents niveaux de consommation. Les résultats de cette étude permettront non seulement d'identifier les facteurs de contamination de l'eau mais aussi d'élaborer une approche fiable, pertinente et complète pour renforcer les actions et acquis des programmes de développement en matière de consommation d'eau potable en milieu rural et scolaire au Burkina Faso.

Matériel et méthodes

Zone d'étude

La région du Centre-Nord est située dans la zone centrale du Burkina Faso entre les parallèles 12°40'1 ; 14° Nord (N) et les méridiens 0°15 ; 25° longitude Ouest (W). Avec une superficie de 18 212 km², elle occupe 6,6% de la superficie du territoire national et est subdivisée en 3 provinces : le Bam, le Namentenga et le Sanmatenga (Conseil Régional du Centre-Nord, 2014). Dans cette région, près de 42% des écoles ne disposent pas de sources d'eau améliorée avec un taux de scolarisation de 71,3%, qui reste en deçà du taux national de 80,3% (MAH, 2012) d'où son choix pour ce programme. L'étude a concerné 10 des 107 écoles d'intervention de la première phase du projet «koom-yilma». Il s'agit des écoles primaires de Kinkirgo, Ouedsé, Koundoula, Loagha Catholique, Loada, Gabou, Sirgui, Mané Mossi, Zana, et Barkana. La figure 1 montre la localisation de ces écoles dans le Centre-Nord.

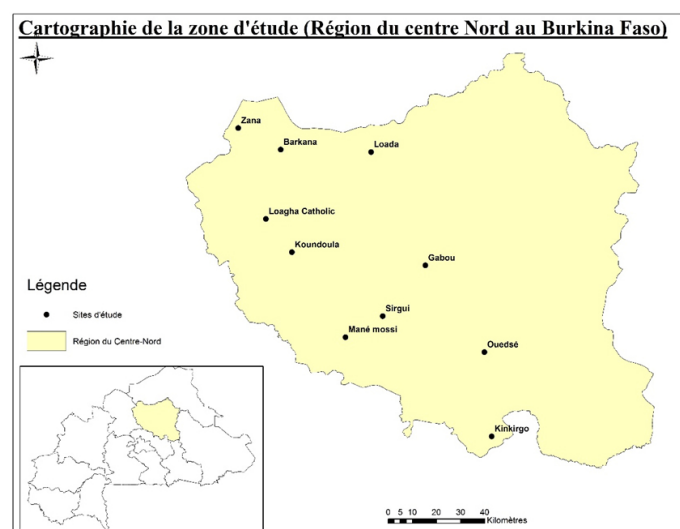


Figure 1 : Situation géographique des 10 écoles d'étude.

Echantillonnage

Un total de 180 échantillons d'eau a été collecté au niveau des

sources améliorées d'eau potable (forage) des écoles, dans les réservoirs de stockages (postes d'eau potables) disposés dans les salles de classe et dans les récipients individuels de boisson des élèves (eaux provenant de l'école ou des ménages). L'échantillonnage a consisté à prélever 100 ml d'eau dans des flacons de verre stériles qui ont été conservés et transportés au laboratoire suivant la norme Européenne EN ISO 19458 (2006). Les élèves concernés par cet échantillonnage ont été ceux des classes de CP1, CP2, CEI, CE2 et CM1; ceux de la classe de CM2 étant indisponibles à participer aux activités du projet.

Analyse des échantillons d'eau

L'analyse microbiologique a consisté à l'isolement et au dénombrement de bactéries indicatrices de contamination fécale suivant la méthode normalisée de filtration sur membrane suivi d'un étalement sur des milieux de culture spécifiques en accord avec la norme Française NF EN ISO 9308-1 (2000). Le milieu de culture Rapid *E.coli* 2 Agar a permis d'isoler à la fois les coliformes fécaux et les *E. coli* qui apparaissent respectivement de couleur bleue et violette ou rose. Sur la gélose Bile Esculine Azide, l'hydrolyse de l'esculine par les streptocoques fécaux fait virer le milieu au noir et ils apparaissent de couleur blanchâtre. Pour chaque échantillon et pour chaque paramètre, les analyses ont été faites en triplicata.

Analyses statistiques

Les résultats obtenus ont été soumis à une analyse de variance ANOVA avec le logiciel d'analyse statistique R.

Résultats et Discussion

Qualité microbiologique des eaux de boisson dans les écoles

L'analyse de variance a montré que la qualité microbiologique de l'eau de boisson varie significativement en fonction des écoles et des niveaux de consommation ($p < 2.2e^{-16}$). Ainsi, pour toutes les écoles, il ressort que l'eau des forages est exempte de bactéries indicatrices de contamination fécale. Selon la norme de l'OMS (2011) ces eaux sont donc potables sur le plan microbiologique. Par contre, pour toutes les écoles confondues, 62,96% de l'eau issue des postes d'eau potables sont contaminées par des coliformes fécaux, 14,81% par *E. coli* et 33,33% par des streptocoques fécaux. En outre, pour ce qui concerne les échantillons d'eau prélevés dans les récipients individuels des élèves, 95,95% renferment des coliformes fécaux, 61,6% des *E. coli* et 70,7% des streptocoques fécaux. Les figures 2, 3 et 4 présentent respectivement le pourcentage des échantillons d'eau contaminés en fonction de la teneur des coliformes fécaux, *E. coli* et streptocoques fécaux pour chaque école.

La figure 2 montre que 40% des échantillons d'eau contaminés de Loagha Catholique contiennent entre 1 à 5000 coliformes/ml contre 50% des échantillons de Barkana, Kinkirgo, Koundoula, Sirgui et Zana. 60% des eaux de Gabou, Mané Mossi et Ouedsé ainsi que 90% de ceux de Loada ont également présentés cette teneur en coliformes fécaux. Pour ce même paramètre, 5000 à 10000 coliformes/100 ml ont été dénombrés dans 30% des échantillons d'eaux contaminés de Barkana contre 20% de ceux de Gabou, Kinkirgo, Mané mossi, Ouedsé et Sirgui. 10% des échantillons

d'eau contaminés de Loada et Loagha Catholic ont présentés la même teneur. La teneur la plus élevée (29 000/100 ml) a été obtenue avec un échantillon de Ouédésé (figure 2).

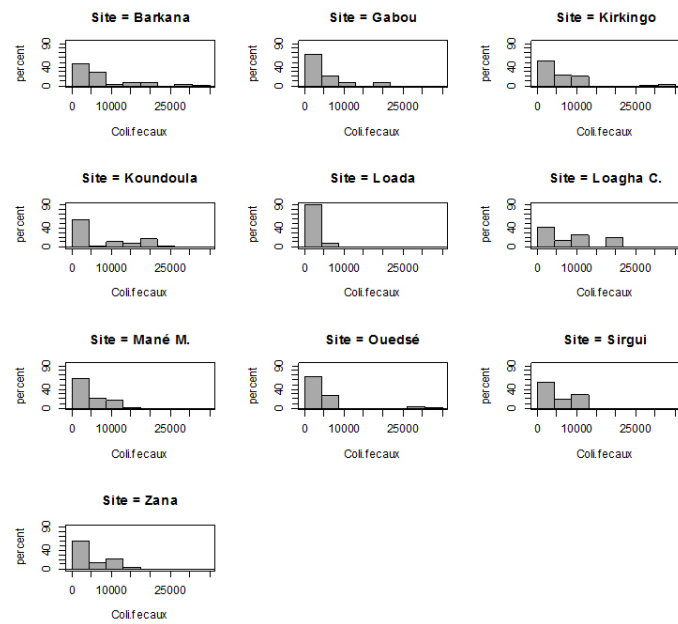


Figure 2 : pourcentage des échantillons d'eau contaminés en fonction de la teneur des coliformes fécaux par école.

En ce qui concerne *E. coli*, il ressort que 90% des échantillons d'eau contaminés de Loada, Loagha Catholic, Mané Mossi, Ouédésé, Sirgui et Zana sont contaminés par 1 à 1500 germes/100 ml contre 70% des échantillons de Koundoula et 80% de ceux de Barkana, Gabou et Kirkingo (figure 3). En outre, 1500 à 3000 *E. coli*/100 ml ont été dénombrés dans 10% des eaux contaminées de Barkana, Sirgui et Gabou (figure 3). La teneur la plus élevée (14800 *E. coli*/100 ml) a été observée avec un échantillon d'eau de l'école Barkana (figure 3).

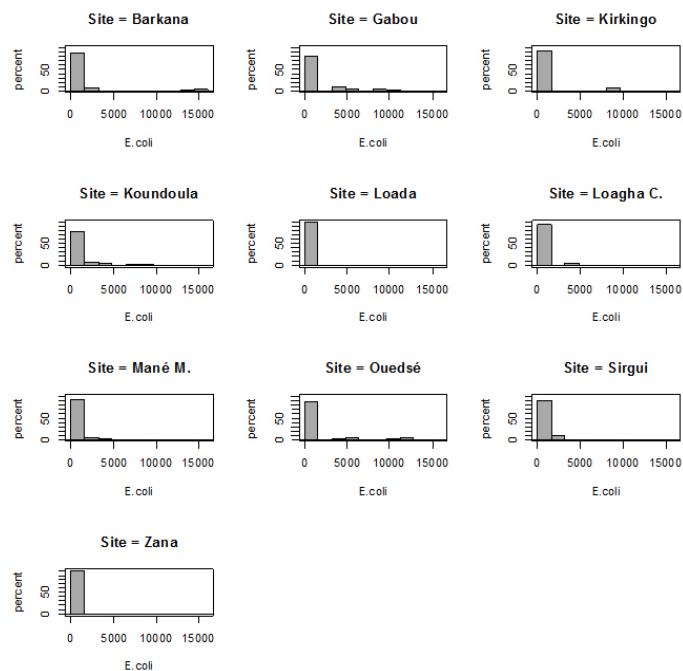


Figure 3 : pourcentage des échantillons d'eau contaminé en fonction de la teneur en *E. coli* par école.

Entre 1 à 8000 streptocoques fécaux ont été dénombrés dans 90% des échantillons de Barkana, Gabou, Loada, Loagha Catholic, Mané Mossi et Zana ainsi que dans 80% des eaux

de Kirkingo, Koundoula, Ouédésé et Sirgui (figure 4). Un échantillon d'eau de Ouédésé a présenté la plus forte teneur (30167 streptocoques fécaux/100 ml) (figure 4).

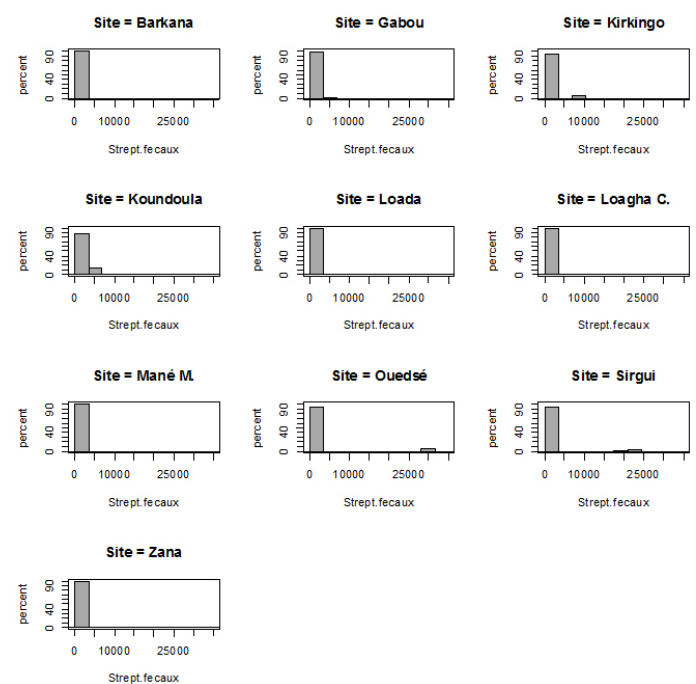


Figure 4 : pourcentage des échantillons d'eau contaminé en fonction de la teneur en streptocoques fécaux par école.

Ces résultats montrent la situation préoccupante de l'accès à une eau de boisson saine dans les écoles rurales du Centre-Nord au Burkina Faso. En effet, selon de la norme de l'OMS (2011) ces eaux sont impropres à la consommation. Au regard du risque élevé de maladies diarrhéiques encourues et leur impact sur les capacités d'apprentissage des élèves (UNICEF, 2006), des interventions sont nécessaires pour améliorer la qualité microbiologique de l'eau dans les écoles. Pour la réussite de ces interventions, cette étude a été nécessaire pour favoriser une prise de conscience des différents acteurs du monde éducatif et ainsi obtenir leur adhésion aux activités de formation et de sensibilisation portant sur l'eau potable, l'hygiène et l'assainissement dans les écoles.

Qualité microbiologique de l'eau durant la conservation et la consommation chez les élèves

La figure 5 montre pour chaque germe le pourcentage de contamination des échantillons d'eau de boisson à la source, dans les postes d'eau potables et dans les récipients individuels de boisson des élèves dans les différentes écoles.

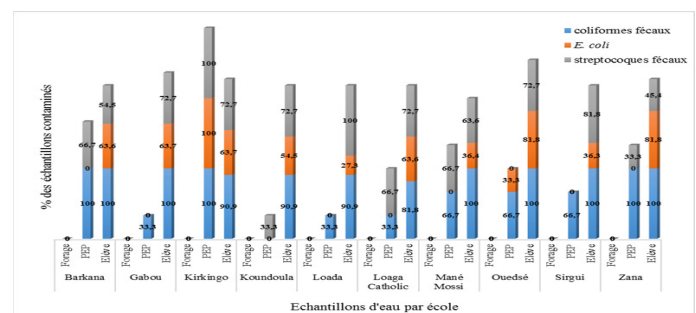


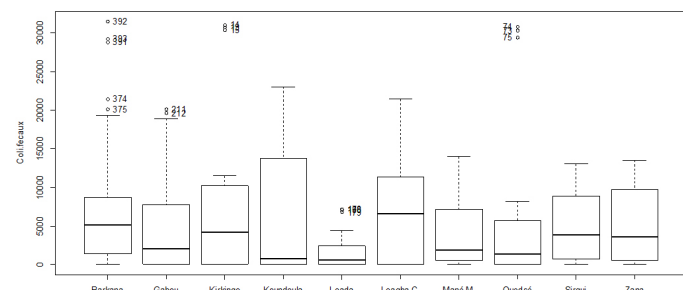
Figure 5: pourcentage des échantillons d'eau contaminé de la source, dans les postes d'eau potable et dans les récipients individuels de boisson des élèves dans les différentes écoles.

De manière générale, il ressort que la teneur des bactéries fécales dans les échantillons d'eau augmente significativement durant la conservation et au moment de la consommation (figure 5). Cette contamination de l'eau qui est plus prononcée dans les eaux des récipients individuels de boisson des élèves que dans les postes d'eau potable a été observé pour tous les échantillons d'eau des écoles exceptés ceux de Kinkirgo pour lesquels des résultats inverses ont été obtenus (figure 5). Cela pourrait être due au fait que la plupart de ces élèves apportent leur eau de boisson du domicile familiale ou d'autres sources hormis celles de l'école.

En accord avec Dianou *et al.*, (2002) et Nkurunziza (2013), ces résultats indiquent clairement de mauvaises pratiques d'hygiène dans la manipulation et la conservation de l'eau. En effet, la contamination fécale de l'eau implique forcément que celle-ci ait été en contact avec des matières fécales soit par l'intermédiaire des mains souillées soit par un récipient contaminé. Au regard de cette situation, il est donc essentiel d'améliorer les pratiques d'hygiène des enfants scolarisés si l'on veut limiter la transmission des maladies liées à l'eau et à l'assainissement dans les écoles. En se référant à des études qui ont montrées que la persistance des maladies diarrhéiques chez les enfants était en partie due à la consommation d'eau contaminée par les matières fécales, l'UNICEF préconise non seulement la réalisation d'infrastructures d'eau potable, d'hygiène et d'assainissement mais également la mise en œuvre de programmes d'éducation sanitaire dans les écoles pour améliorer d'une part la santé des enfants et d'autre part favoriser des changements de comportements positifs dans les communautés (UNICEF, 2006). En effet, des évaluations ont révélé que le seul fait d'inculquer aux enfants des notions d'hygiène et de leur apprendre à se laver les mains aux moments clés contribue à un renforcement des connaissances et à des changements de comportement positifs dans les communautés (UNICEF, 2004).

Relation entre l'hygiène de l'environnement scolaire et qualité microbiologique de l'eau

L'analyse statistique des résultats a montré que les teneurs des bactéries fécales dans les eaux de boisson varient significativement en fonction des écoles ($p < 2.2 \times 10^{-16}$). La figure 6 présente les teneurs globales des coliformes fécaux, *E. coli* et streptocoques fécaux dans les échantillons d'eau par école.



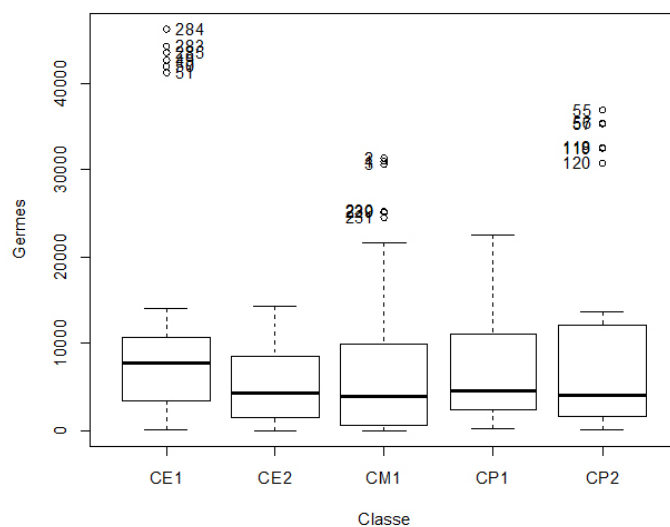
6: Teneur des germes fécaux dans les échantillons d'eau par école.

Globalement, pour toutes les classes et échantillons d'eau confondus, c'est l'école Loagha catholique qui a présenté le taux de contamination le plus élevé. Nos observations sur les conditions d'hygiène de l'environnement scolaire (propreté

de la cours de l'école, des salles de classe, du point d'eau, des postes d'eau potables et des latrines) ont montré que ce sont les échantillons d'eau des écoles les moins salubres qui ont présentées les teneurs les plus élevées de bactéries fécales dans les eaux (figure 6). Cela montre la nécessité de doter les écoles d'infrastructures d'hygiène et d'assainissement mais aussi de renforcer la sensibilisation autour des bonnes pratiques d'hygiène et d'assainissement à l'endroit des élèves mais aussi de tous les acteurs de l'enseignement scolaire primaire.

Relation entre le niveau de scolarisation et la qualité microbiologique de l'eau

L'analyse de la teneur des eaux en bactéries fécales par niveau de scolarisation (classe) n'a montré aucune différence significative. La figure 7 présente les teneurs globales de bactéries fécales des échantillons d'eau par classe, tous échantillons confondus.



nécessaire de mettre un accent particulier sur les bonnes pratiques d'hygiène dans les écoles notamment le lavage des mains aux moments clés, le nettoyage régulier des récipients de puisage, de stockage et de consommation, ainsi que l'application d'une méthode appropriée de traitement de l'eau.

Bibliographie

Conseil Régional Du Centre-Nord, 2014. Plan régional de développement du centre-nord 2015-2019. Burkina Faso, 202 p.

Dianou D., Poda J.N., Thiombiano L., Sorgho H., 2002. Qualité des eaux de boisson de forages et de ménages en milieu rural : Cas de Thion, Blédougou et Kangoula au Burkina Faso. Sud sciences et technologie, N° 9, décembre 2002, pp. 25-33.

DGAT-DLR/MEF, 2010. Profil des régions du Burkina Faso. Direction Générale de l'aménagement du territoire et du développement local et régional, Ministère de l'Economie et des Finances, 2010.

Ministère de l'Agriculture et de l'Hydraulique, 2012. Annuaire statistique 2011 de l'eau potable et de l'assainissement des eaux usées et excréta. Burkina Faso, 258 p.

Ministère de l'Education Nationale et de l'Alphabétisation (MENA), 2017. Rapport du Programme National Santé, Hygiène et Nutrition en milieu scolaire du PDSEB 2016-2021. Burkina Faso, 59 p.

Nkurunziza G., 2013. Etude de la qualité de l'eau de boisson le long de la chaîne de l'eau dans les ménages de trois régions du Burkina Faso : cas des villages de Kamboinsé, Koubri, Sikoro et Bapla. Mémoire de Master II en ingénierie de l'eau et de l'environnement, 2iE, Ouagadougou, Burkina Faso, 84 p.

Norme Française EN ISO 9308-1, 2000. Qualité de l'eau - Recherche et dénombrement des *Escherichia coli* et des bactéries coliformes, Partie 1 : Méthode par filtration sur membrane, Indice de classement : T 90-414, Septembre 2000.

Norme Française EN ISO 19458, 2006. Qualité de l'eau - Echantillonnage pour analyse microbiologique, Indice de classement : T 90-480, Novembre 2006.

OMS, 2011. Stratégies pour la gestion sans risque de l'eau de boisson destinée à la consommation humaine. Rapport du secrétariat, soixante-quatrième assemblée mondiale de la santé, avril 2011.

OMS, 2011. Directives de qualité pour l'eau de boisson. 4^e Edition, OMS, ISBN 978 92 4 1548151, Genève, Suisse, 2011, 531 p.

UNICEF, 2006. Progrès pour les enfants : un bilan de l'eau et de l'assainissement. UNICEF numéro 5, septembre 2006, 26 p.

UNICEF, 2004. Rapports d'évaluation de l'UNICEF soumis par le Malawi (2004), la Zambie (2002), l'Ouganda (2000) et d'autres pays.

Les minéralisations de manganèse du Nord Téra (Liptako, Ouest Niger) : origine et conditions de mise en place.

Hamidou Garba Saley¹, Moussa Konaté^{1*}, Yacouba Ahmed¹ et Amadou Soumaila¹

Résumé

Les minéralisations de manganèse du Nord Téra sont situées dans la ceinture de roches vertes de Diagorou-Darbani, dans la zone de contact avec le pluton de Téra-Ayérou à l'extrême ouest du Niger.

L'objectif de cette étude est de dégager les principales caractéristiques de la minéralisation de manganèse du Nord Téra et de proposer un modèle métallogénique de sa mise en place. La méthodologie mise en œuvre a consisté à faire une étude de terrain puis une analyse au microscope polarisant en lumières transmises et réfléchies des roches porteuses de minéralisations de manganèse. L'utilisation des diagrammes de référence a permis, d'une part de confirmer l'origine de la minéralisation en manganèse (Nicholson, 1992a) et, d'autre part de préciser les conditions de formation de cette minéralisation (Hansuld, 1967 et Brookins, 1987).

Deux types de minéralisation de manganèse ont été mis en évidence : l'une primaire (exhalativo-sédimentaire) et l'autre secondaire (par altération supergène des gondites).

La minéralisation primaire est concomitante de la mise en place de pélites gréseuses enrichies en Mn, qui ont été affectées par la schistosité/foliation régionale (S1//S0), d'orientation moyenne NE-SW. Celle-ci résulte du raccourcissement régional NW-SE, associé à la mise en place de plutons granitoïdiques, en relation avec le fonctionnement de grands couloirs cisailants N45° (Soumaila & Konaté, 2005). Ces déformations sont associées à un métamorphisme dans les conditions de faciès amphibolite qui a transformé l'ensemble des roches en quartzite à grenat (gondite) riche en manganèse, en amphibolite et en micaschiste à disthène-staurotide-cordierite-sillimanite-grenat (Soumaila, 2000 ; Soumaila & Garba, 2006).

La minéralisation secondaire résulte de l'altération des gondites, à grenat de type spessartine à 33,3% de Mn métal selon Machens (1961). Des processus d'altération supergène (oxydation, hydrolyse et lessivage d'éléments chimiques), dans des conditions de PH = 7 à 9 et Eh = +0,4 à +0,6 V, ont conduit au développement d'un gîte résiduel de Mn sous forme d'oxydes (pyrolusite) en croûte botryoidale avec des teneurs de 39,4% de Mn métal (Machens, 1961).

Mots-clés : Manganèse, Nord-Téra, Liptako, exhalativo-sédimentaire, grenatite, altération supergène.

Abstract

Manganese mineralizations of the North Téra (Western part of Niger) are located in the Diagorou-Darbani greenstone belt, closely to the Téra-Ayorou pluton.

The methodology developed consisted of a field study, a polarizing microscope analysis in transmitted and reflected light, of rocks bearing manganese mineralizations: garnet micaschists, garnet amphibolites and grenatites.

Using reference diagrams made it possible to confirm the origin of the manganese mineralization (Nicholson, 1992a) and specifying the conditions of the mineralization formation (Hansuld, 1967 and Brookins, 1987).

Two types of manganese mineralization have been identified: one primary (exhalativo-sedimentary) and the other secondary (by supergene alteration of the gondites).

The primary mineralization is concomitant with the setting of Mn-enriched pelites sandstone, which have been affected by the regional schistosity / foliation (S1 // S0), with a mean NE-SW orientation. These results from the NW-SE regional shortening, associated with the setting of granitoid plutons, in relation with large N45° shear zones activation (Soumaila & Konaté, 2005). These deformations are associated with metamorphism in amphibolite facies conditions that transformed all rocks into manganese rich quartzite with garnet (gondite), amphibolite, and micaschist-stauroilite-cordierite-sillimanite-garnet (Soumaila, 2000; Soumaila & Garba, 2006).

Secondary mineralization results from the alteration of gondites, with spessartine-type garnet at 33.3% of Mn metal. Supergene alteration processes includes oxidation, hydrolysis and chemical elements leaching, under high PH (7 to 9) and Eh (+ 0.4 to +0.6 V) conditions, leading to the development of residual manganese deposits. In the study area, pyrolusite oxides in a botryoidal crust are observed. They content 39.4% of manganese metal (Machens, 1961).

Keywords: Manganese, North-Téra, Liptako, exhalativo-sedimentary, grenatite, supergene alteration.

¹Université Abdou Moumouni de Niamey, Faculté de Sciences et Techniques, Département de Géologie, Laboratoire Eaux Souterraines et Géoressources, BP 10662, Niamey, Niger

*Corresponding author : konate.moussa@gmail.com

1. INTRODUCTION

Les gisements de manganèse ont été décrits dans plusieurs régions du globe, au Ghana (Mücke *et al.*, 1999), en Inde (Ghosh *et al.*, 2015), en Grèce (Papavassiliou *et al.*, 2017), en Hongrie (Polgári *et al.*, 2004), au Maroc (Lafforgue, 2016) dans

des contextes géologiques variés (Wissink, 1972). Plusieurs classifications ont été proposées (Machens, 1961; Grandin, 1968; Wissink, 1972; Kuleshov, 2011; Papavassiliou *et al.*, 2017). Ces classifications prennent en compte les contextes qui peuvent être : tectonique, sédimentaire, supergène,

métamorphique, minéralogique ou exhalativo-sédimentaire (volcano-sédimentaire).

Dans le Liptako nigérien, au Nord de Téra, un important indice de manganèse a été mis en évidence par Machens (1961, 1964) dans la zone de contact entre le pluton de Téra et la ceinture de Diagorou-Darbani, objet de la présente étude (fig. 1). D'autres indices de moindre importance ont été signalés dans la ceinture de Diagorou-Darbani et dans celle de la Sirba Machens (1964). Depuis les travaux de reconnaissance des années 1970, aucune étude détaillée n'a été entreprise à ce jour.

Le but de cette étude est :

- d'affiner la cartographie géologique de la zone Nord Téra ;
- de caractériser les minéralisations de manganèse associées aux grenatites à spessartine;
- de proposer un modèle métallogénique de mise en place de cette minéralisation de manganèse.

2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

2.1. Principaux traits de la géologie régionale du Liptako nigérien

La région de Téra fait partie du Liptako nigérien qui correspond à la partie Sud-Est du Craton Ouest-Africain, stabilisé depuis 1700 Ma. Les travaux de reconnaissance géologique de Machens (1961, 1964, 1967, 1973) et divers travaux ultérieurs dont ceux de Dupuis *et al.* (1991), Pons *et al.* (1995), Ama Salah *et al.* (1996), Abdou *et al.* (1998), Affaton *et al.* (2000), Soumaila (2000), Soumaila *et al.* (2004), Soumaila et Konaté (2005), Soumaila *et al.* (2008) ont contribué à l'amélioration des connaissances sur l'évolution géodynamique du Liptako.

Ainsi, deux principaux ensembles géologiques ont été distingués :

- (1) le socle, d'âge paléoproterozoïque 2300 à 2000 Ma (Soumaila, 2000) qui comprend des plutons granitoïdiques alternant avec les ceintures de roches vertes (fig. 1).
- (2) la couverture sédimentaire qui regroupe des formations infracambriennes, tertiaires (post-éocène) du Continental terminal, et quaternaires.

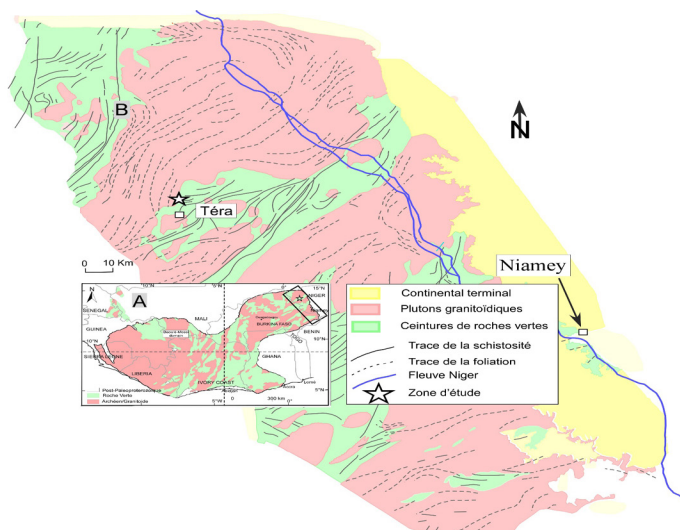


Figure 1 : (A) - Le Liptako nigérien dans le contexte du Craton Ouest Africain. (B) - Carte géologique simplifiée localisant le secteur d'étude (d'après Machens, 1967, modifiée).

2.2. Géologie du Secteur d'étude

Dans le secteur d'étude, le pluton granitoïdique de Téra-Ayorou daté à 2158 Ma \pm 9 (Lama, 1993 et Cheilletz *et al.*, 1994) sépare la ceinture de roches vertes du Gorouol à l'ouest de celle de Diagorou-Darbani à l'est (fig. 1). Les affleurements étudiés sont localisés à la limite du pluton granitoïdique de Téra/ceinture de roches vertes de Diagorou-Darbani (fig. 1).

La ceinture de roches vertes de Diagorou-Darbani consiste en des metabasites à débit en coussins (pillow lavas), des amphibolites, des roches grenues ultramafiques à mafiques. Ces dernières sont souvent transformées en talcschistes, talc-chloritoschistes et chloritoschistes. Les métasédiments et les métavolcano-sédiments sont métamorphisés selon le cas en micaschistes, grenatites (gondites), quartzites avec ou sans grenat et en quartzites à manganèse (les micaschistes datés à 2300 Ma, Soumaila *et al.*, 2008). L'intensité du métamorphisme varie du faciès schiste vert au faciès amphibolite. Ce dernier est surtout développé au contact du pluton de Téra. Sur ses bordures, le pluton de Téra présente une foliation concordante à celle des micaschistes et des amphibolites.

La minéralisation de manganèse du Nord Téra est portée essentiellement par des affleurements de grenatites (gondites), formant un chaînon de collines d'orientation globale NW-SE. Les minéralisations sont contenues dans des blocs métriques à centimétriques enrichis en Mn (fig. 2).

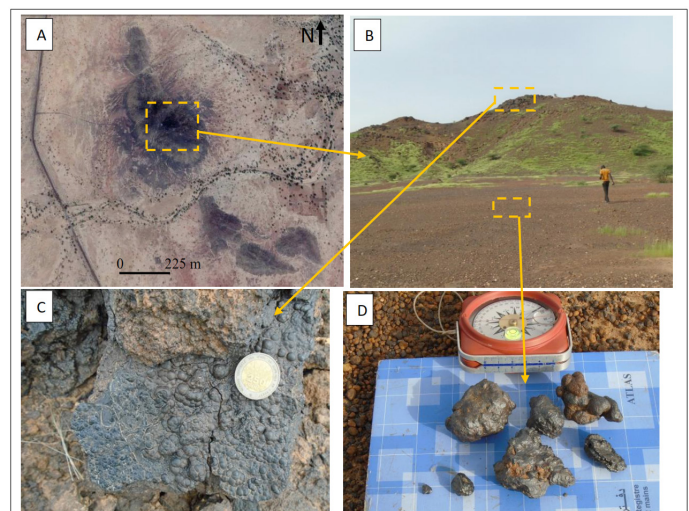


Figure 2 : Indice de manganèse du Nord Téra. A) Images Google Earth de l'indice de Mn de Téra. B) Colline principale à Mn. C) Blocs de manganèse mamelonnés. D) Concrétions de manganèse.

3. MATERIEL ET METHODES

La méthodologie mise en œuvre pour mener cette étude a consisté :

- (1) en des travaux de lever géologique ayant permis de réaliser une carte géologique sectorielle, puis de faire des coupes géologiques ainsi qu'un profil d'altération de la minéralisation de manganèse;
- (2) en des travaux de laboratoire qui ont consisté en des analyses microscopiques, (minéralogique, microstructurales et métallogéniques) ;
- (3) à traiter les données géochimiques préexistantes (Machens, 1961) sur le diagramme géochimique discriminant (Nicholson 1992a) permettant de déterminer l'origine primaire de cette minéralisation ;

- (4) à déterminer le type d'oxyde de manganèse et les conditions (pH-Eh) d'altération supergène, en superposant le diagramme de Hansuld (1967) sur ce celui de Brookins (1987) ;
- (5) et à proposer un modèle de mise en place de la minéralisation.

4. RESULTATS

4.1. Caractéristiques géologiques de l'indice de Mn du Nord Téra

Les principales caractéristiques géologiques du secteur d'étude ont été mises en évidence par la réalisation d'une carte géologique sectorielle (fig. 3) et de coupes géologiques (figs. 4, 5 et 6).

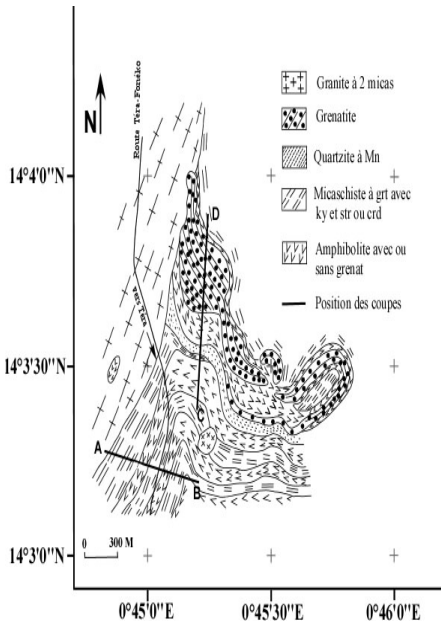


Figure 3 : Carte géologique simplifiée du secteur d'étude. A-B et C-D représentent les traits de coupes géologiques (figs. 4 et 5).

La coupe AB (zone S-W du secteur d'étude) montre que l'encaissant du gîte de manganèse consiste en une alternance de micaschistes et d'amphibolites, intrudée par des filons de granites, de quartz et de pegmatite à disthène (fig. 4). Cet ensemble est affecté par une schistosité de direction N20° à N50° (globalement N30°) ayant des pendages de 40° à 65°SE.

Au niveau de la coupe C-D, apparaissent les faciès pétrographiques de plus en plus riches en grenat. Il s'agit de quartzites noirs, d'amphibolites et de grenatites (porteuses de la minéralisation). Les micaschistes, les quartzites et les amphibolites (sans grenat) sont relativement pauvres en grenat. Ces roches sont affectées par une schistosité/foliation de direction N90° à 140° (globalement N110°) avec des pendages de 35° à 60° N (fig. 5).

Les variations des trajectoires de la schistosité/foliation observées sur ces roches sont le résultat d'une interférence entre :

- une déformation transcurrente régionale ayant provoqué la schistosité/foliation N30° compatible avec un raccourcissement régional NW-SE ;
- et la schistosité/foliation N110° serait liée à la mise en place des plutons granitoïdes intrusifs (tectonique verticale) et leur expansion latérale (Dupuis et al., 1991 ; Soumaila, 2000, Soumaila et Konaté, 2005).

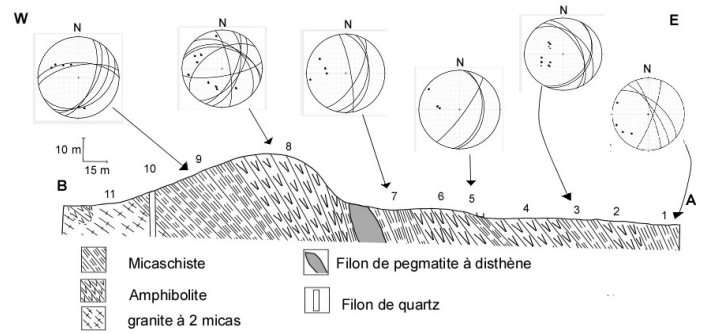


Figure 4 : Coupe géologique A-B (SW du secteur d'étude). 1 à 11 : différentes stations de mesures et les stéréogrammes représentant les projections des plans de schistosité/foliation avec leurs pôles correspondants.

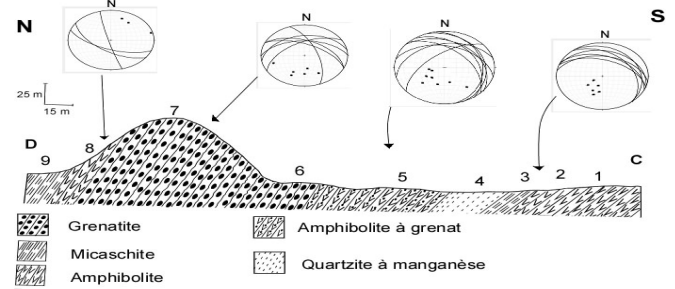


Figure 5 : Coupe géologique passant par la colline principale de manganèse (localisation fig. 3). Les différentes stations de mesures sont numérotées de 1 à 9 et les stéréogrammes représentant les projections des plans de schistosité/foliation avec leurs pôles correspondants.

La succession lithostratigraphique observée se présente comme suit : micaschistes (à disthène, staurotide et tourmaline), amphibolites sans grenat, micaschistes (à disthène, staurotide, cordiérite et sillimanite), quartzites à grenat, amphibolites à grenat et grenatites. Une coupe conceptuelle du secteur montre que les roches affleurantes forment une structure synclinale perchée dont les grenatites (gondites) occupent une position sommitale dans la lithostratigraphie (fig. 6).

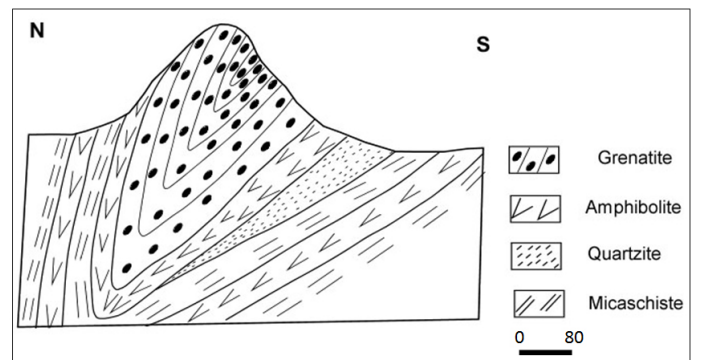


Figure 6 : Coupe synthétique montrant les faciès pétrographiques du secteur d'étude, l'échelle verticale a été volontairement exagérée.

Localement, dans les micaschistes, des amas de restites biotitiques à disthène (fig. 7-A) et des filons de quartz à tourmaline ont été observées (fig. 7-B) ainsi que des boudins de quartzites autour desquels se moule la schistosité S1 (fig. 8). La présence des amas de restites biotitiques suggèrent que certains de micaschistes ont atteint le stade de la fusion partielle (Soumaila et Garba, 2006).

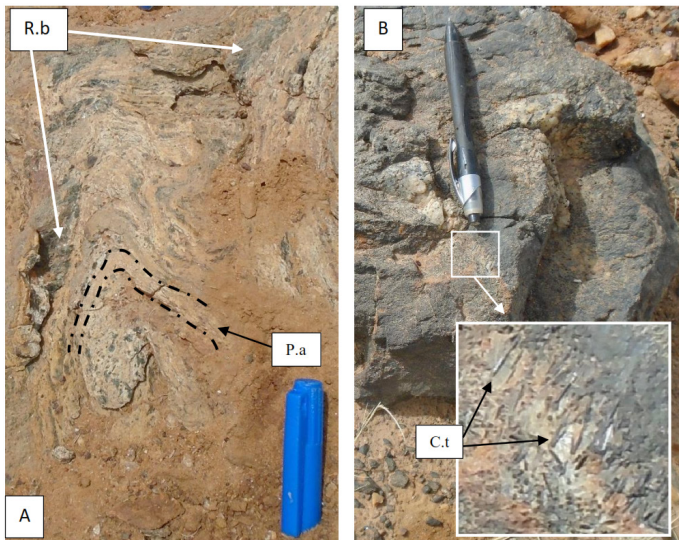


Figure 7 : (A)- Restites de biotite dans un micaschiste, **R.b** : restites biotitiques ; **P.a** : plis anisopaque (B)-une poche de tourmalinite dans un filon de quartz. **C.t** : cristaux de tourmaline.

La présence de boudins de quartzites dans les micaschistes correspondrait originellement à des passées gréseuses au sein de niveaux pélitiques. En effet au cours de la déformation métamorphique, les niveaux argileux à rhéologie ductile sont plus favorables au développement d'une schistosité contrairement aux niveaux gréseux plutôt résistant.

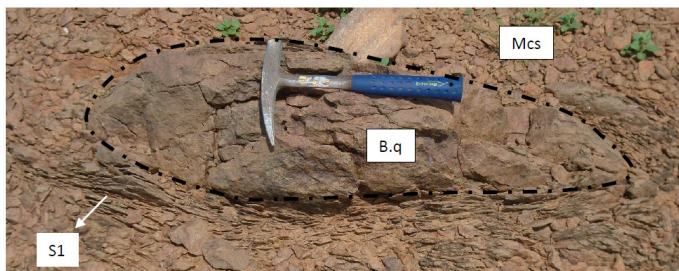


Figure 8 : La schistosité S1 se mouplant autour d'un boudin de quartzite dans les micaschistes.

S1 : la schistosité N40° ; **B.q** : boudin de quartzite à mica ; **Mcs** : micaschiste.

4.2. Analyses microscopiques

La texture dominante des micaschistes est de type grano-lépidoblastique. Les micaschistes sont constitués de quartz, de muscovite, de grenat, de staurotide, de disthène, de cordiérite, de sillimanite, de biotite, de tourmaline, d'épidote (pistachite et clinozoïsite), de chlorite (provenant de la rétro-morphose de la biotite) et de plagioclase (fig. 9 A, B et C).

Les amphibolites, sont constituées de hornblende, de quartz, de grenat, et de plagioclase. La présence de la hornblende indique que le faciès amphibolite (mésozone) est atteint (fig. 9 D).

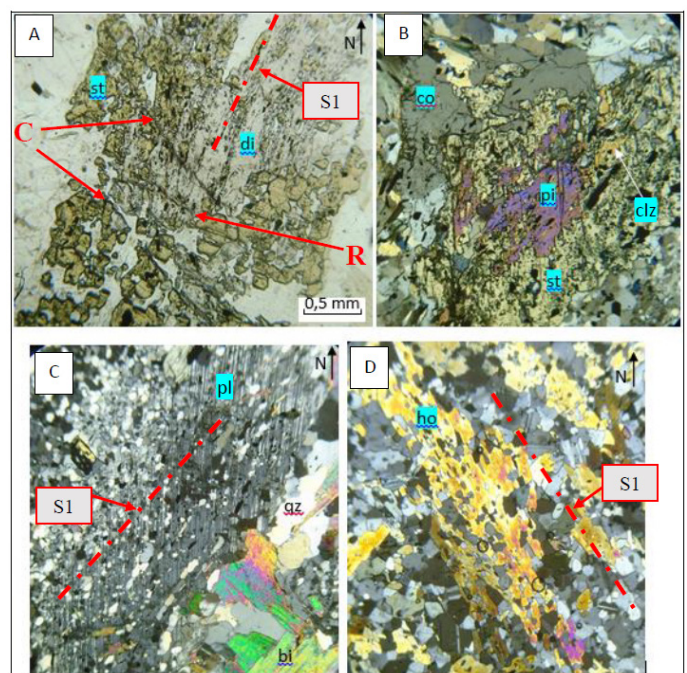
Les micaschistes renferment des minéraux tels que le disthène, la cordiérite, la sillimanite, et la staurotide. Tous ces minéraux ne sont pas stables dans les mêmes conditions thermo-barométriques. En effet le disthène et la staurotide se forment à haute et moyenne pression, tandis que la cordiérite et la sillimanite caractérisent les conditions de basse pression. Soumaila et Garba (2006) ont associé les paragenèses à disthène et staurotide à des pressions relativement élevées (7 à 9 kbar) tandis que les paragenèses à sillimanite et cordiérite correspondent à des pressions plus faibles (3 à 5 kbar). Les mêmes auteurs expliquent cette baisse de pression par une exhumation de ces micaschistes.

L'analyse microscopique a permis la mise en évidence de trois climats métamorphiques attestés par les trois types de paragenèses observées :

- à disthène et staurotide indiquant des pressions moyennes du faciès amphibolite ;
- à cordiérite et sillimanite (fibrolite) indiquant de faibles pressions du faciès amphibolite ;
- à chlorite et pistachite, paragenèse caractérisant le faciès schiste vert.

L'association de ces minéraux indique qu'il y a au moins deux climats métamorphiques qui ont prévalu lors de la formation des roches du secteur :

- (1) un enfouissement de l'encaissant (micaschiste) jusque dans les conditions du «faciès amphibolite» de moyenne à relativement forte pression (T = 600 à 700°C et P = 7 à 9kb) favorisant l'apparition du grenat ;



pl : plagioclase ; qz : quartz ; ho : hornblende ; bi : biotite ; st : staurotide ; pi : pistachite ; clz : clinozoïsite ; co : cordiérite ; di : disthène.

Figure 9 : Compositions minéralogiques : micaschistes (A, B, C) et amphibolites (D). En lumière naturelle (A) et en lumière polarisée analysée (B, C et D). **A**-Recristallisation syncinématique de la staurotide et du disthène, affectée par une microdéformation cassante à fabrique R/C (plan de fracture R de Riedel/ plan de Cisaillement). **B**-Paragenèse de type cordiérite- staurotide. **C**-Surimposition d'un phénocristal de plagioclase sur la foliation S1. **D**-Minéraux de hornblende soulignant la foliation S1 dans une amphibolite. NB : la schistosité/foliation S1 est plissée : au niveau du micaschiste S1= 30°E et l'amphibolite S1=110°NE.

- (2) une remontée rapide conduisant à de faibles pressions (P= 3 à 5kb) et à des températures analogues (560 à 680°C), qui empêche la transformation du disthène en andalousite (Soumaila et Garba, 2006) mais qui favorise la cristallisation de cordiérite et sillimanite (fibrolite).

4.3. Analyse structurale

L'analyse microtectonique montre que le secteur d'étude est affecté par des déformations ductiles, semi-ductiles et cassantes. Deux phases majeures de déformations ont été distinguées :

- (1) la première phase D1, ductile à semi-ductile, comporte deux épisodes. Le premier épisode D1a est caractérisé par une schistosité/foliation (S1//S0) d'orientation N20° à N50°E, par aplatissement pur, souligné par le caractère quasi-symétrique des marqueurs de déformation tel que des boudins de quartzite à grenat (**fig. 10**). Ces marqueurs mettent en évidence une forte composante coaxiale, compatible avec un raccourcissement régional NW-SE. La tectonique souple a généré des plis pluridécamétriques (**fig. 3**) et des plis dysharmoniques qui affectent la schistosité/foliation S1. Ce premier épisode de déformation est suivi par un autre D1b, à composante non coaxiale. En fonction de la rhéologie, deux type de fabriques peuvent être distingués : une première fabrique semi-ductile S/C, à quartz déformé sigmoïde dextre (**fig. 11 A**) et des microdécrochements ductiles sénestres NW-SE (**fig. 12**), et une deuxième fabrique cassante R/C à jeu dextre (**fig. 11 B**) et sénestre observables à l'échelle microscopique (**fig. 9 A**).

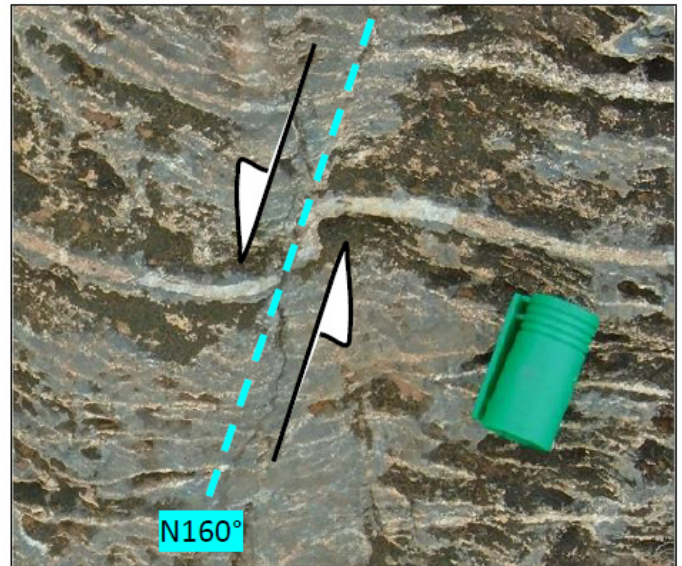


Figure 12 : Décrochement sénestre induisant une flexuration d'un niveau quartzo-feldspathique. Ceci dénote une relative ductilité du matériel pendant le jeu décrochant.

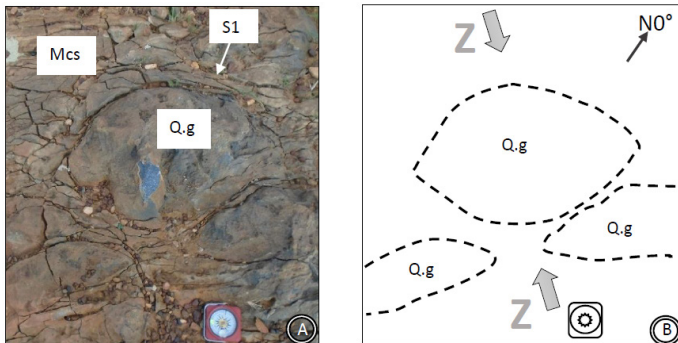


Figure 10 : A) : Schistosité/foliation S1 (N35°) qui se moule autour d'amygdales quasi-symétriques de quartzite à grenat boudiné (Q.g), dans un micaschiste (Mcs). B) : Schéma d'interprétation de la photo A indiquant la direction moyenne de raccourcissement.

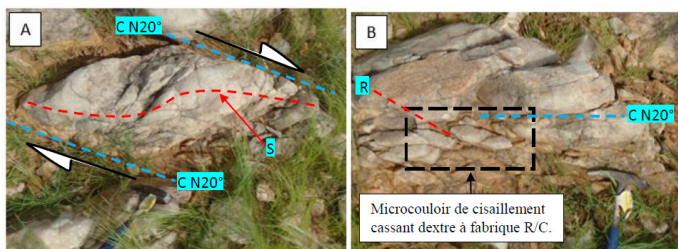


Figure 11 : Microcouloir de cisaillement dextre. A) La déformation ductile dextre à fabrique S/C. B) la déformation cassante dextre à fabrique R/C.

- (2) la deuxième phase de déformation cassante D2, est marquée par la présence de failles normales N50° à N75° à composante décrochante dextre ou sénestre correspondant à un épisode à raccourcissement NE-SW. Abdou *et al.* (1998) ainsi que Soumaila et Konaté (2005) ont décrit à l'échelle du Liptako des accidents cisailants dextres N130° à N150° et sénestre N60° à N90°. Cette deuxième phase de déformation a été associée à une rotation des contraintes depuis l'azimut N130° jusqu'à N0° (Soumaila et Konaté, 2005). Ces derniers ont souligné des réactivations de couloirs cisailants N40° à l'échelle de la ceinture de Diagourou-Darbani.

4.4. Origine de la minéralisation en Mn de Nord-Téra

Les observations de terrain montrent de fortes concentrations de concrétions de manganèse au voisinage des grenatites

(gondites). Les gondites correspondent à des quartzites à grenat de type spessartine $Mn_3Al_2(SiO_4)_3$ (10 à 95%) avec 33,3% de Mn métal (Machens, 1961).

4.4.1 Origine primaire

Ces gondites sont associées à des micaschistes et des amphibolites avec ou sans grenat, dont le spectre sont très enrichis en terres rares légères et appauvris en terres rares lourdes (**fig. 13**). Ce résultat suggère une mise en place en contexte d'arc et de bassin arrière arc océanique pour les formations du Nord de Téra (Soumaila *et al.*, 2004 et 2008). Ces environnements sont propices à la mise en place des minéralisations de type sedex (exhalativo-sédimentaire).

Cette origine exhalativo-sédimentaire a été d'ailleurs mise

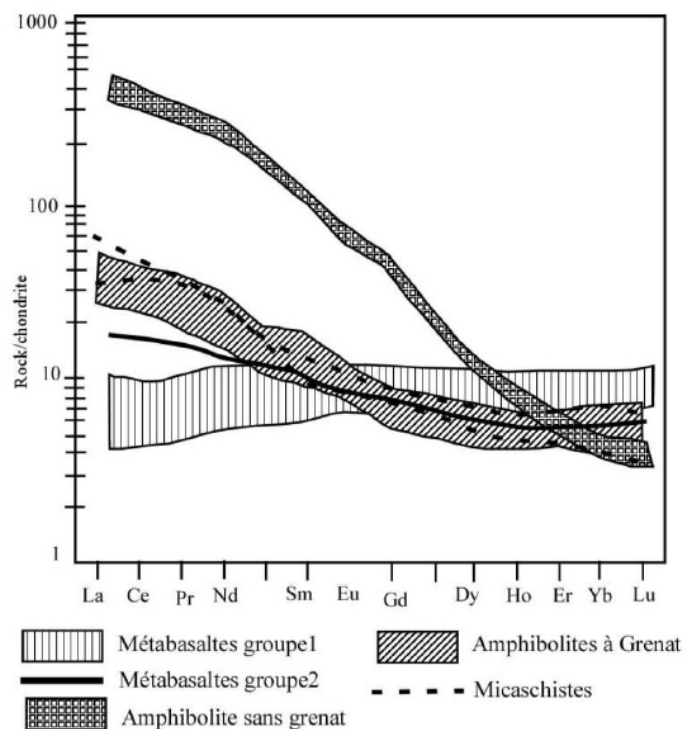


Figure 13 : Diagramme de terres rares des micaschistes, et amphibolites avec ou sans grenat (Soumaila *et al.*, 2004 et 2008).

en évidence par Reformatsky (1932) et Machens (1964). A diverses époques, le volcanisme a apporté dans les parties hautes de la lithosphère, des éléments métalliques (fer, manganèse, cuivre et autres métaux) d'origine plus profonde, par l'intermédiaire des solutions hydrothermales minéralisatrices. Cette dernière observation est en accord avec celle de Papavassiliou *et al.*, (2017) qui attribue une origine hydrothermale aux minéralisations de manganèse localisées en Grèce au Nord-Ouest de Milos island.

Des coulées de laves sous-aqueuses et des tufs, surtout sous-marins, peuvent par exhalaison gazeuse apporter dans les eaux des éléments surtout chimiques qui se sédimentent au-dessus des coulées. Il s'accompagne de la libération de la silice, qui entraîne souvent la prolifération de radiolaire ou radiolarite (Routhier, 1963 ; Papavassiliou *et al.*, 2017). En même temps peuvent être introduites dans l'eau de mer de grosses quantités de fer ou de manganèse qui se sédimentent, surtout sous forme d'oxydes en lits ou en lentilles alternant avec les jaspes.

4.4.2 Métamorphisme des pélites gréseuses en gondites

Les gondites sont le produit d'un métamorphisme régional de roches pélitico-gréseuses, riches en manganèse (Reformatsky, 1932 ; Machens, 1961 ; Routhier, 1963). Dans le contexte général, le Mn contenu dans les pélites ou shales proviendrait de la précipitation (sur les fonds marins ou sur les plateformes peu profondes) : soit des fluides hydrothermaux (sedex ou sédimentaire exhalatif), soit des fluides d'altération supergène résultant du démantèlement et de la remobilisation d'une ancienne minéralisation de Mn (Lafforgue, 2016). Dans les fluides, le Mn se trouve à l'état dissout (Mn^{2+}) et précipite sous l'action des processus d'oxydo-réduction, d'augmentation de l'alcalinité ou de processus microbiens (Lafforgue, 2016).

4.4.3 Origine secondaire : altérations supergènes

Dans les conditions supergènes (ou de surface), les roches endogènes (roches magmatiques et métamorphiques) subissent l'altération physique (désagrégation) et ou chimique (lessivage, hydrolyse) sous l'effet des agents atmosphériques (interface géosphère/hydrosphère/atmosphère). Le résultat de l'altération est une libération dans le milieu de particules et d'ions en solution, provenant de la roche-mère. Le comportement de ces éléments est fonction de leur potentiel ionique (**fig. 14**) (Goldschmidt, 1954).

De l'exploitation du diagramme de Goldschmidt (1954), il apparaît que lorsque le potentiel ionique d'un cation comme le Mn est inférieur à 3 il est soluble (**fig. 14**). C'est ce phénomène qui se produit dans les solutions hydrothermales où le manganèse est à l'état réduit (Mücke *et al.*, 1999 ; Kuleshov, 2011 ; Lafforgue, 2016). Par contre, lorsque le potentiel ionique est supérieur à 3 le manganèse précipite. Cette situation se produit au contact de l'eau de mer ou dans les conditions d'une altération supergène. Chacune de ces situations peut favoriser l'oxydation du manganèse (Mücke *et al.*, 1999 ; Hein et Tshibubudze, 2015 ; Lafforgue 2016).

Les processus d'hydrolyse, de lessivage et d'oxydation pendant l'altération des silicates de manganèse produisent des oxydes et des hydroxydes de manganèse dans une large gamme tel la *cryptomélane* [$K(Mn^{4+}, Mn^{2+})_8O_{16}$], *lithioporite* [$(Al, Li)MnO_2(OH)_2$], *manganite* [$Mn^{3+}O(OH)$], *nsutite* [$(Mn^{4+}, Mn^{2+})(O, OH)_2$], *psilomélane* [$Ba(Mn^{+2})(Mn^{+4})_8O_{16}(OH)_4$], *pyrochroïte* [$Mn(OH)_2$], *pyrolusite* [MnO_2], *todorokite* [$(Ca, K, Na, Mg, Ba, Mn)(Mn, Mg, Al)_6O_{12} \cdot 3H_2O$],

groutite [$Mn^{3+}O(OH)$]... et de la silice (Mücke *et al.*, 1999). Cette dernière provenant de l'altération des minéraux silicatés s'injecte dans les fractures de la roche et une partie reste sous forme de colloïde amorphe dans la structure des minéraux (Machens 1961).

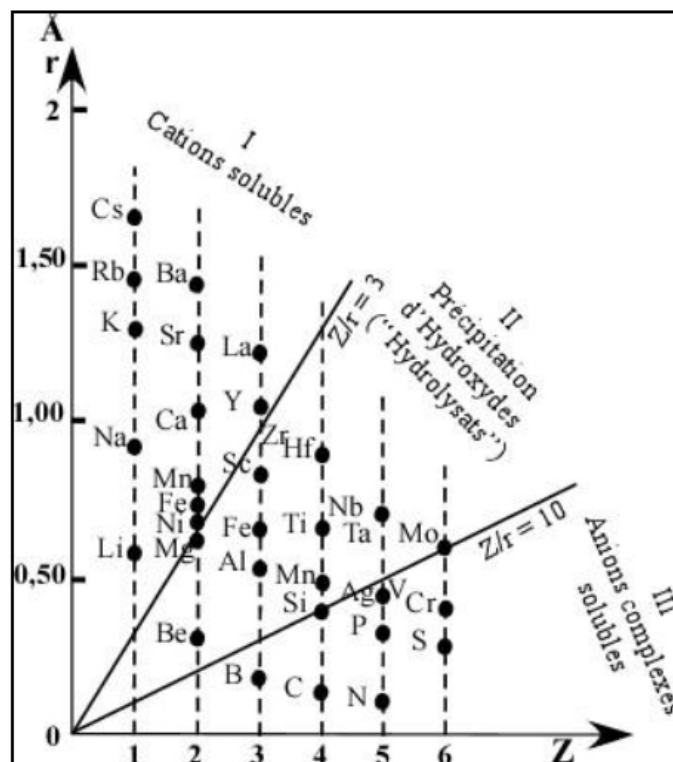


Figure 14 : Diagramme de référence de Goldschmidt (1954) représentant la variation du potentiel ionique Z/r des cations.

Dans le cas des gondites du Nord de Téra, l'altération supergène libère une partie du manganèse contenue dans le grenat (de type spessartine). Ce manganèse forme des encroutements d'oxyde de manganèse qui couvrent la roche. L'altération supergène a développé 4 horizons (**fig. 15A**) de la base au sommet :

- **Un niveau de base où les gondites sont peu ou non altérées** à 1,1% Mn ;
- **Une zone d'altération** d'environ 5 m d'épaisseur. Dans cette zone, l'altération à un stade relativement avancé a généré des blocs de gondite non altérée ainsi que des veinules de quartz. Le lessivage de la silice des gondites est suivi par l'accumulation d'oxydes de manganèse dans des cassures recoupant la stratification (**fig. 15B**). Ce processus est à l'origine de la formation des minerais hétérogènes de manganèse, dont les teneurs varient de 4 à 6,6% ;
- **Une zone intermédiaire à carapace poreuse** d'environ 40m. Dans cette zone l'altération est à un stade plus avancée. La majorité de la silice ayant été lessivée, cette carapace forme une grande partie de la colline principale. Les teneurs en manganèse sont plus importantes que dans le niveau sous-jacent (10,5 à 17,9% Mn) ;
- **Une couche supérieure correspondant à une cuirasse massive**. En effet, au sommet de la colline, suite à un lessivage et une hydrolyse intense, se forme une cuirasse massive, à structure localement

botryoïdale (**fig. 16A**). L'observation microscopique montre que les oxydes/hydroxydes de manganèse et de fer précipitent dans les microfractures (**fig. 16B**). La cuirasse résultante a une épaisseur estimée environ 2 m. Elle s'étend sur environ 5000 m². Les concentrations en manganèse sont devenues plus importantes, les teneurs varient de 38,8 à 39,4% (Machens, 1961).

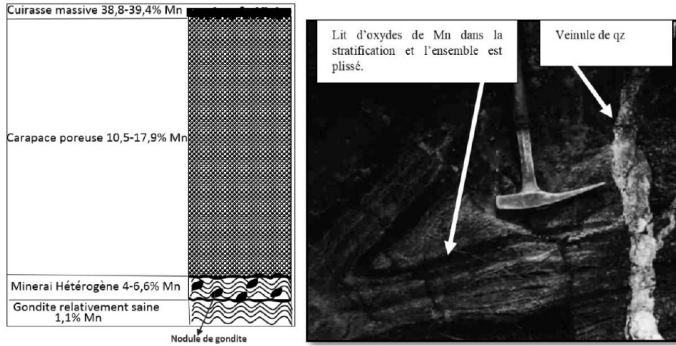


Figure 15 : Effet de l'altération supergène des gongites du Nord de Téra. A) Profil schématique d'altération de la colline principale. B) Injection dans les fractures de gongite de veinule de quartz provenant de l'altération des minéraux silicatés (Machens, 1961).

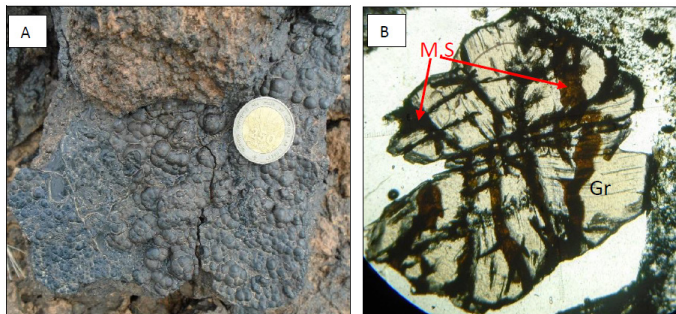


Figure 16 : Altération météoritique des gongites. A) Structures botryoïdales de la cuirasse ; B) Image microscopique en LNA montrant, dans les cassures du grenat (Gr), renfermant les minéraux secondaire (M.S) comme l'hématite et la pyrolusite.

Du fait de l'altération, ces gongites donnent des concrétions d'oxyde de manganèse oblitérant la schistosité/foliation S1. En effet, l'altération du grenat donne des concrétions noirâtres, mises en relief par une dissolution sélective des autres minéraux (**fig. 17**). Ces concrétions (**fig. 18**) renferment des teneurs importantes en manganèse (jusqu'à 39,4%, Machens 1961).

L'étroite relation entre les concrétions de manganèse et les gongites montre que la minéralisation de Nord Téra provient du processus d'altération supergène de ces dernières.

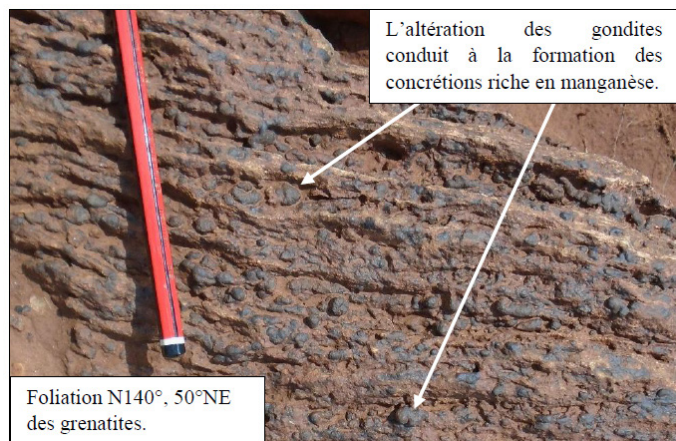


Figure 17 : Libération du Mn par altération.



Figure 18 : Concrétions de manganèse.

5. DISCUSSION

Les résultats obtenus se rapportant à l'origine de la minéralisation et au processus de mise en place, ont été comparés à ceux des études antérieures.

5.1. Origine de la minéralisation

La source des matériaux à l'origine de la minéralisation peut être déduit par le diagramme de discrimination du rapport Si / Al qui différencie les matériaux d'origine hydrothermale, ou détritique. Machens (1961) a étudié dans les détails l'affleurement de gongite du Nord Téra, en procédant à des analyses géochimiques (**tableau 1**).

Ces analyses géochimiques ont été utilisées dans le diagramme Si/Al (Nicholson, 1992a) permettant de déterminer l'origine primaire de cette minéralisation. Dans les 8 échantillons projetés, 6 se situent dans la zone hydrothermale (**fig. 19**). Ce qui confirme l'origine primaire hydrothermale (exhalative) de cette minéralisation.

Une autre indication importante prouvant l'exhalation volcanique sous-marine est la présence de la tourmaline (**fig. 7B**). En effet, plusieurs types de minéralisations d'origine exhalative sous-marine connues depuis l'Archéen jusqu'au Mésozoïque, sont associées à la tourmaline (Al₆Y₃Na[(Si₆O₁₈)(BO₃)₃(OH, F)₄]) (Cleland *et al.*, 1996).

Des résultats analogues ont été obtenus par Mücke *et al.* (1999) sur le gisement de manganèse de Nsuta au Ghana.

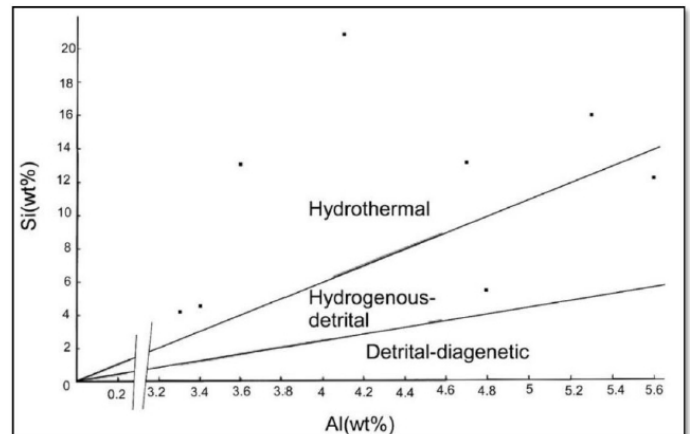


Figure 19 : Diagramme Si/Al permettant de déterminer l'origine hydrothermale ou détritique des dépôts de manganèse (Nicholson 1992a ; modifié) et les points analytiques des échantillons de Nord Téra.

Tableau 1 : Analyses géochimiques (Machens 1961).

Eléments chimiques	Cuirasse massive			Carapace poreuse		Minerai hétérogène		Gondite peu ou non altérée
	Echantillon N°1	Echantillon N°2	Echantillon N°3	Echantillon N°1	Echantillon N°2	Echantillon N°1	Echantillon N°2	Echantillon N°1
Mn soluble	38,8%	39,4%	32,0%	10,5%	17,3%	4,0%	6,6%	1,1%
Fe ₂ O ₃	9,2	5,6	9,6	5,8	10	8,4	10,4	12,8
Al ₂ O ₃	12,5	13,1	18,2	17,9	19,4	15,7	21,5	13,6
SiO ₂	5,8	9,7	12,4	28,3	34,4	45,5	26,1	27,7
Al	3,3	3,4	4,8	4,7	5,3	4,1	5,6	3,6
Si	4,1	4,5	5,7	13,2	16	21,2	12,2	12,9
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,46	0,74	0,68	1,58	1,77	2,89	1,21	2,03

5.2. Métamorphisme des sédiments sous-marins en gondite (quartzite à grenat manganésifère)

L'association des minéraux tel que le disthène, la cordiérite, la sillimanite et la staurotite indique qu'il y a au moins deux climats métamorphiques qui ont prévalu lors de la formation des gondites :

- un enfouissement de l'encaissant (micaschiste) jusque dans les conditions du «faciès amphibolite» de moyenne à relativement forte pression (T = 600 à 700°C et P = 7 à 9kb) favorisant l'apparition du grenat ;
- une remontée rapide conduisant à de faibles pressions (P = 3 à 5kb) et à des températures analogues (560 à 680°C), qui empêche la transformation du disthène en andalousite (Soumaila et Garba, 2006) mais qui favorise la cristallisation de cordiérite et sillimanite (fibrolite) et la stabilisation du grenat.

5.3. Altération supergène

Pour déterminer les conditions de concentration secondaire de manganèse, les analyses pétrographiques et minéralogiques des échantillons porteurs ont permis de signaler la présence des oxydes de Mn, cela a servi à établir un diagramme discriminant croisé (Brookins, 1987 et Hansuld, 1967). Ces deux diagramme superposés, associés à la température de stabilité des oxydes de manganèse (300°C pour la pyrolusite MnO₂ (Folch et al., 2005), 530 à 800°C pour le manganate Mn₂O₃ et entre 900 et 1000°C pour la hausmanite Mn₃O₄) ont permis de préciser la nature exact de l'oxyde de manganèse présent (Das Gupta, 1965) , mais aussi les conditions de PH et Eh qui ont prévalu lors de sa formation (fig. 20).

Selon ces considérations, la pyrolusite semble être la plus stable dans les environnements d'altération supergène. Les conditions sont estimées à PH = 7 à 9 et Eh = + 0,4 à +0,6 V (fig. 20).

Ce résultat théorique est accompagné par une observation des échantillons de la gondite au microscope polarisant à lumière réfléchiée en vue d'effectuer une analyse métallogénique. Cette dernière confirme que les minéraux opaques sont constitués d'oxydes de fer et de manganèse et que l'oxyde de manganèse présent est de la pyrolusite MnO₂ (fig. 21A et C) et l'oxyde de fer est de l'hématite Fe₂O₃ (fig. 21A).

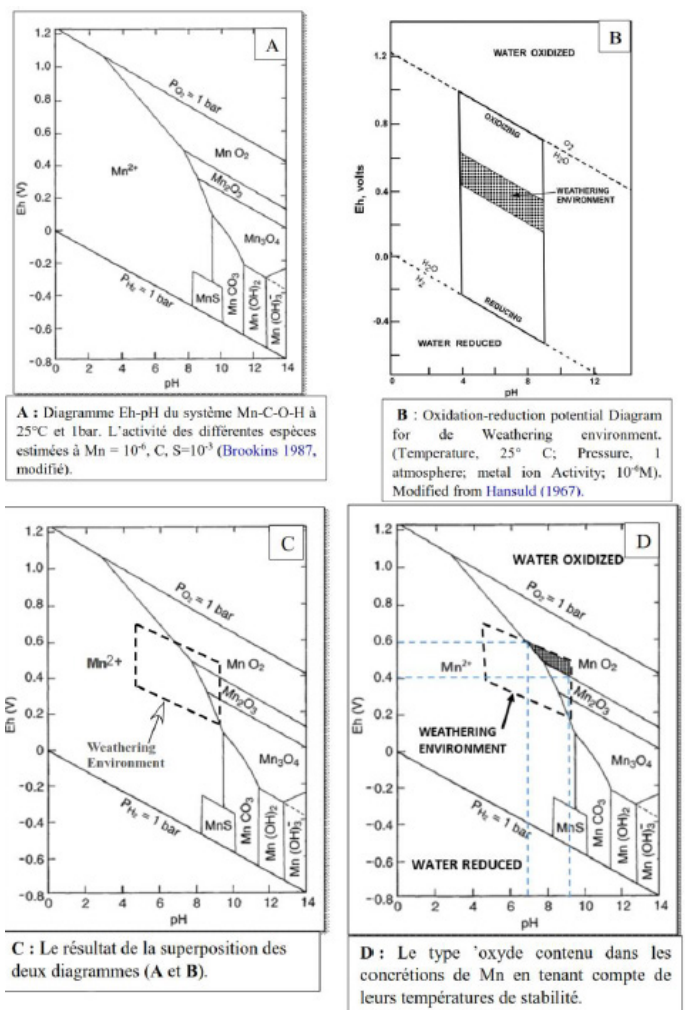
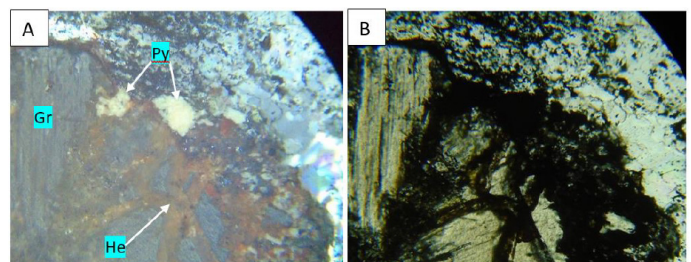


Figure 20 : Détermination graphique des conditions d'altération supergène (pH-Eh) des gondites du Nord-Téra.



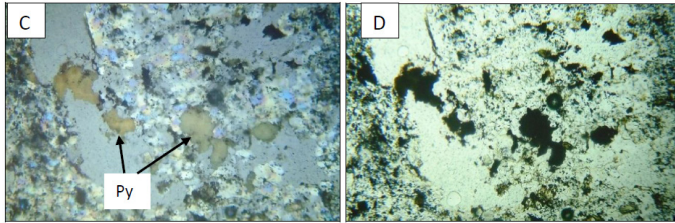


Figure 21 : Observations métallogéniques de la gondite altérée. Les images A et C sont en lumière réfléchie et les images B et D sont leurs correspondants en lumière transmise. L'oxyde de manganèse présent dans le grenat (Gr) est de la pyrolusite (Py) et l'oxyde de fer est l'hématite (He).

5.4. Modèle de minéralisation du manganèse de Nord Téra

La minéralisation observée dans le Nord Téra, ayant une histoire métallogénique complexe (exhalativo-sédimentaire, métamorphique et supergène), ne peut être rangée dans la classification de Nicholson (1992b) qui est basée sur les dépôts d'oxyde, ne prenant pas en compte les minéralisations métamorphisées.

Par contre, dans la minéralisation de type hydrothermal marin (Hmar) de Nicholson (1992b), Routhier (1963) propose deux modèles de mise en place primaire du manganèse, en relation avec le volcanisme et la sédimentation sous-marine :

- **(1) Premier modèle de mise en place syn-sédimentaire.** Dans ce modèle, l'exhalation s'associe à la sédimentation qui se produit au-dessus des épanchements de lave sous-aqueuse. Le gisement birimien de Nsuta au Ghana, d'âge compris entre 2170 et 2180 Ma, correspond à ce modèle de mise en place (Mücke *et al.*, 1999). Le modèle syn-sédimentaire a également été décrit dans le Liptako par Machens (1961). En effet, dans la région de Téra, comme dans plusieurs régions d'Afrique de l'Ouest, les tuffés appartenant à la série birimienne présentent des minéralisations de manganèse. Selon Machens (1961), ces minéralisations proviennent des exhalations sous-marines, liées à des phénomènes volcaniques ou subvolcaniques qui se seraient produits à plusieurs reprises durant la sédimentation dans un domaine océanique. Toute chose qui est conforme au modèle syn-sédimentaire de Routhier (1963).

- **(2) Deuxième modèle de mise en place post-sédimentaire.** Par l'intermédiaire de solutions hydrothermales, le manganèse d'origine profonde vient imprégner les sédiments supérieurs tels que les schistes ou les grauwaques non consolidés. Dans ce modèle, le caractère post-sédimentaire est marqué par la présence de diaclases, à remplissage en manganèse, recoupant la stratification (Machens, 1964). Selon Machens 1964, sur plus de 8 échantillons de schistes manganésifères, prélevés dans le Liptako nigérien, les teneurs en manganèse dépassent rarement 5%, la moyenne étant de 3%.

En effet, Machens (1961) a montré que dans le Nord Téra, l'altération supergène a engendré un résidu saprolitique recouvert par un encroûtement botryoidal d'oxyde de manganèse. Cette altération a ainsi permis un enrichissement en manganèse (de 1,1 à 39,4%).

Les datations radiométriques des minéralisations de manganèse du Liptako burkinabé (mine de Tambao) donnent un âge de 59-45 Ma pour le résidu saprolitique et un âge de 29-24 Ma à 18-11,5 Ma pour la croûte indurée (Beauvais *et al.*, 2008). Compte tenu du contexte géologique identique entre le Liptako burkinabé et nigérien les travaux de Beauvais *et al.* (2008) permettent d'attribuer pour les minéralisations supergènes du Nord Téra, un âge paléocène-éocène pour le résidu saprolitique et un âge oligo-miocène pour la croûte indurée.

A la lumière de ce qui précède, le modèle génétique suivant (fig. 22) est proposé pour expliquer la formation de la minéralisation en manganèse du Nord Téra. Ce modèle comprend trois étapes :

- Au cours de la première étape, une minéralisation primaire dans un sédiment de boue, déposé dans un environnement sous-marin serait associé à une exhalation hydrothermale dans des conditions réductrices. Cette étape se serait déroulée vers 2230-2260 Ma (Soumaila *et al.*, 2008) ;
- La deuxième étape serait liée à un métamorphisme dans les conditions du faciès amphibolite du sédiment argileux riche en Mn. Il se forme alors des gondites (quartzites à grenat spessartine) ;
- La troisième étape implique le développement des zones à oxyde de manganèse dans lesquels l'étape d'oxydation passe de cations divalents à des cations à charge supérieur. Les minéraux secondaires de manganèse (pyrolusite) ont été générés par l'oxydation et la décomposition de la spessartine qui ne sont pas stables dans les conditions supergènes. Cette altération se serait déroulée dans les conditions de PH = 7 à 9 et Eh = +0,4 à +0,6V. Cette étape a un âge paléocène à miocène dont paléocène-éocène pour le résidu saprolitique et oligo-miocène pour la croûte indurée.

Ce modèle de mise en place de la minéralisation de Mn au Nord de Téra est comparable à celui du gisement de Nsuta au Ghana (Mücke *et al.*, 1999). La seule différence est que le gisement de Nsuta présente des intercalations de couches de carbonate de manganèse (Rhodocrosite $MnCO_3$) avec les métasédiments, comme à Tambao au Burkina Faso (Hein et Tshibubudze, 2015) où les formations consistent en des roches volcano-sédimentaires et carbonates riches en manganèse. A Ansongo-Inlier (Mali) également, les minéralisations sont encaissées dans une intercalation de quartzites et de silts à carbonate de Mn, métamorphisé en gondite (Servant, 1956).

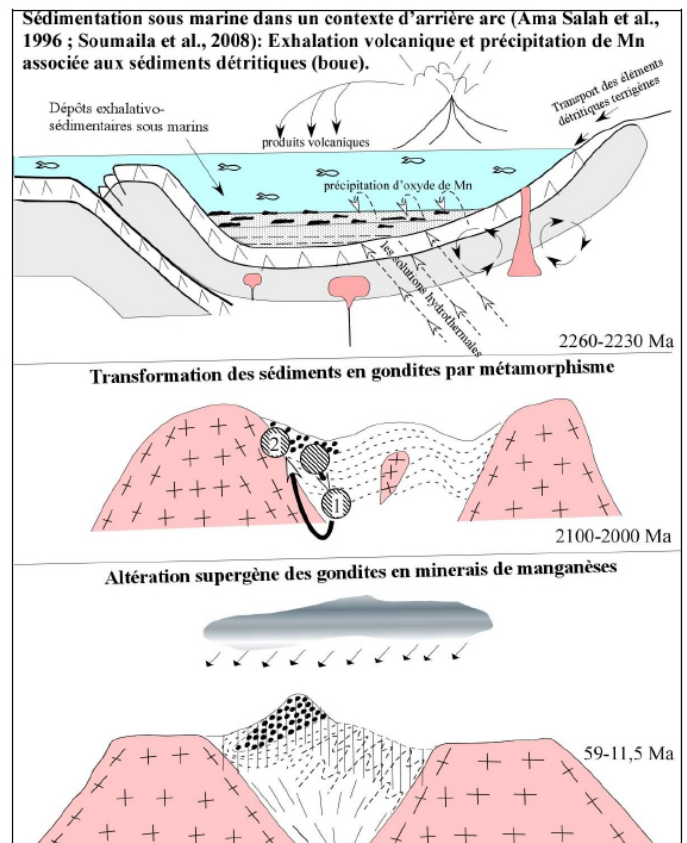


Figure 22 : Modèle d'évolution génétique de la minéralisation de Mn du Nord-Téra (inspiré de Soumaila 2000 ; Soumaila & Garba, 2006 et Kuleshov, 2011). 1 : (paragenèses à staurotide-disthène) et 2 : (paragenèses à cordiérite-

sillimanite) sont les paragenèses développées dans les micaschistes pendant la tectonique verticale lors de la mise en place des plutons. 1 : mouvement descendant de l'encaissant du pluton ; 2 : remontée de l'encaissant facilitée par la fusion partielle locale (Soumaila et Garba, 2006).

CONCLUSION

L'étude du gîte de manganèse du Nord de Téra permet de préciser que :

- 1) Les grenatites constituent le sommet d'une alternance de micaschistes et d'amphibolite ayant subi au moins trois phases de déformation;
- 2) Ces roches constituent un ensemble sédimentaire à volcano-sédimentaire mis en place dans un contexte océanique, suivi d'un métamorphisme dans les conditions du faciès amphibolites de moyenne pression ;
- 3) La minéralisation de Mn a une double origine ; (a) une origine primaire sédimentaire-exhalatif par le biais de fluides hydrothermaux, avec enrichissement de shales (argiles marines), suivie de métamorphisme, (b) une origine secondaire par altération supergène ;
- 4) L'hydrolyse et la déstabilisation de la spessartine, ont conduit par lessivage des cations divalents et de la silice à la précipitation des oxydes de fer et de Mn. Ces processus se sont produits dans les conditions $PH = 7 \text{ à } 9$ et $Eh = +0,4 \text{ à } +0,6 V$ et ont développé un résidu saprolitique recouvert par un encroûtement de pyrolusite (MnO_2). Ils ont conduit à un enrichissement en manganèse, d'une teneur de 1,1% dans la roche saine à 39,4% dans l'encroûtement. Des résultats comparables ont été obtenus dans les dépôts de manganèse de :

- Nsuta au Ghana (Mucke *et al.*, 1999);
- Tambao au Burkina Faso (Beauvais *et al.*, 2008; Peters, 2011; Peters, 2014; Hein et Tshibubudze, 2015);
- Ansongo-Inlier au Mali (Servant 1956; Hein et Tshibubudze, 2015).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDOU A. et BONNOT H., BORY KADEY D., CHALAMET D., SAINT MARTIN M., YOUNFAI. (1998):- Notice explicative des cartes géologiques du liptako à 1/100 000 et 1/200 000, Ministère des Mines et de la géologie, Rép. Niger 64p.
- AFFATONP., GAVIGLIOP et PHARISATA. (2000):- Réactivation du craton ouest africain au Panafricain : paléocontraintes déduites de la fracturation des grès néoprotérozoïques de Karey Gorou (Niger, Afrique de l'Ouest). C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes, n° 331, pp 609-614.
- AMA SALAH I., LIEGEOIS J.P. et POUCKET A. (1996):- Evolution d'un arc insulaire océanique birimien précoce au Liptako nigérien (Sirba) : géologie, géochronologie et géochimie. Journal of African Sciences, Vol. 22, n° 3, pp 235-254.
- BEAUVAIS A., RUFFET G., HENOCQUE O. and COLIN F. (2008):- Chemical and physical erosion rhythms of the West African Cenozoic morphogenesis: the $^{39}Ar-^{40}Ar$ dating of supergene K-Mn oxides. J. Geophys. Res. 113, 1-15.
- CHEILLETZ A., BARBEY P., LAMA C., PONS J., ZIMMERMANN J-L., ET DAUTEL D. (1994):- Age de refroidissement de la croûte juvénile birimienne d'Afrique de l'Ouest, Données U/Pb et K-Ar sur les formations à 2.1Ga du SW du Niger. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Série II, 319, 435-442.
- CLELAND J.M., MOREY G.B. and MCSWIGGEN P.L. (1996):- Significance of tourmaline-rich rocks in the North Range Group of the Cuyuna Iron Range, east-central Minnesota. Econ Geol 91: 1282-1291 Das Gupta.
- DAS GUPTA D.R. (1965):- Oriented transformation of manganite during heat treatment; Min. Mag., vol.35, 131-139.
- DUPUIS D., PONS J. et PROST A.E. (1991):- Mise en place de plutons et caractérisation de la déformation birimienne au Niger occidental. Compte Rendus Acad. Sci. Paris, n° 312 (II), pp 769-776.
- FOLCH B., LARIONOVO J., GUARI Y., GUÉRIN C. et REIBEL C. (2005):- Synthesis of $MnOOH$ nanorods by cluster growth route from $[Mn_{12}O_{12}(RCOO)_{16}(H_2O)_n]$. Rational conversion of $MnOOH$ into Mn_3O_4 or MnO_2 nanorods; *Journal of State Chemistry*, vol.178, n°7, 2368-2375.
- GHOSH R., CHAKRABORTY D., HALDER M. and BAIDYA T.K. (2015):- Manganese mineralization in Archean greenstone belt, Joda-Noamundi sector, Noamundi basin, East Indian Shield. *Journal Ore Geology Reviews* 70 (2015) 96-109.
- GOLDSCHMIDT, V. M. (1954):- *Geochemistry* : Clarendon Press, Oxford, 730 pp.
- GRANDIN G. (1968):- Aspects exogènes du gisement de manganèse de Grand-Lahou (Côte d'Ivoire). Extrait de la Chronique des Mines et de la Recherche Minière, juillet-août 1968 No. 375, pp. 199-206.
- HANSULD J.A. (1967):- Eh and pH in geochemical prospecting. Geol.Sur. Canada Paper 66-54, 172-187.
- HEIN K.A.A. and TSHIBUBUDZE A. (2015):- Manganese deposits of the Oudalan province in the northeast of Burkina Faso, and Ansongo Inlier in eastern Mali. School of Geosciences, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa. *Journal Ore Geology Reviews*, pp 1-7.
- KULESHOV V. N. (2011):- Manganese Deposits : Communication 1. Genetic Model of Manganese Ore Formation. *Lithology and Mineral Resources*, Vol. 46, No. 5, pp. 473-493.
- LAFFORGUE L. (2016):- Place de la minéralisation de manganèse de Bouarfa dans l'évolution mésocénozoïque de l'oriental marocain. *Minéralogie*. Thèse, 357p. Université Paris-Saclay.
- LAMA C. (1993):- Apport de la Méthodes K-Ar à la compréhension de l'histoire géologique des granitoides birimiens du Liptako (Niger occidental) et des leucogranites à 2 micas de Tgragra d'Akka (Anti-Atlas Occidental, Maroc), Thèse INPL Lorraine, 142p.
- MACHENS E. (1961):- Prospection générale du liptako, campagne 1960-1961. B.R.G.M. pp 8-12.
- MACHENS E. (1964):- Mission de prospection générale du liptako, rapport de fin de mission (1958-1964) et inventaire d'indice de minéralisation. B.R.G.M ; 74, Rue de la fédération Paris XVe. 81-84p.
- MACHENS E. (1967):- Notice explicative sur la carte géologique du Niger occidental, Carte géol. 1/200 000^{ème}, Dir. Mines Géol., Niger.
- MACHENS E. (1973):- Contribution à l'étude des formations du socle cristallin et de la couverture sédimentaire de l'Ouest de

la République du Niger. Mémoire du Bureau des Recherches Géologiques et Minières, France, n°82.

MUCKE A., K. DZIGBODI-ADJIMAH A. and ANNOR (1999):- Mineralogy, petrography, geochemistry and genesis of the Paleoproterozoic Birimian manganese-formation of Nsuta/Ghana. © Springer-Verlag 1999. Mineralium Deposita (1999) 34: 297-311.

NICHOLSON K. (1992b):- Contrasting mineralogical-geochemical signatures of manganese oxides: guides to metallogenesis. *Econ Geol* 87: 1253-1264.

PAPAVASSILIOU K., VOUDOURIS P., KANELLOPOULOS C., GLASBY G., ALFIERIS D. and MITSIS I. (2017): - New geochemical and mineralogical constraints on the genesis of the Vani hydrothermal manganese deposit at NW Milos island, Greece: Comparison with the Aspro Gialoudi deposit and implications for the formation of the Milos manganese mineralization. *Journal Ore Geology Reviews* 80 (2017) 594–611.

PETERS L. (2011):- Geology of the Eastern Markoye Region, Oudalan–Gorouol Greenstone Belt, NE Burkina Faso. University of the Witwatersrand, Johannesburg, p. 61.

PETERS L. (2014):- The volcanology, geochemistry and metallogenic potential of the Goren Volcano-sedimentary belt, northeast Burkina Faso, West Africa. Master of Science dissertation (unpublished) University of the Witwatersrand Johannesburg, pp 155.

POLGÁRIM., SZABÓ-DRUBINA M. and SZABÓ Z. (2004):- Theoretical model for Jurassic manganese mineralization in Central Europe, Úrkút, Hungary. *Bulletin of Geosciences*, Vol. 79, No. 1, 53–61

PONS J., BARBEY P., DUPUIS D. and LÉGER J.M., (1995):- Mechanism of emplacement and structure of a 2.1 Ga juvenile continental crust: the Birimien of southwestern Niger. *Précambrien research*, n° 70, pp 281-301.

REFORMATSKY N. (1932):- Rapport sur les recherches

géologiques effectuées dans la colonie du Niger, année 1930/1932 B.R.G.M, Dakar.

ROUTHIER P. (1963):- Les gisements métallifères. TOME I, Page 650.

SERVANT J. (1956):- Les Gisements et Indices de Manganèse de l'Afrique Occidentale Française. In: Reyna, J.G. (Ed.), Symposium on Manganese Deposits, Vol II, Africa, XXth International Geological Congress, Mexico, pp. 89–98.

SOUMAILA A. (2000):- Etude structurale, pétrographique et géochimique de la ceinture de Diagorou-Darbani, Liptako, Niger Occidental (Afrique de l'Ouest). Thèse, Univ. Franche-Comté, 56-203p.

SOUMAILA A., HENRY P. et ROSSY M. (2004):- Contexte de mise en place des roches basiques de la ceinture de roches vertes birimienne de Diagorou-Darbani (Liptako, Niger, Afrique de l'Ouest) : plateau océanique ou environnement d'arc/bassin arrière-arc océanique. *C. R. Géoscience*, n° 336, pp 1137–1147.

SOUMAILA A. et KONATE M. (2005):- Caractérisation de la déformation dans la ceinture birimienne (paléoprotérozoïque) de Diagorou-Darbani (Liptako nigérien, Afrique de l'Ouest). *Afr. Geo. Review.*, vol. 13, n° 3, pp 161-178.

SOUMAILA A. et GARBA Z. (2006):- Le métamorphisme des formations de la ceinture de roches vertes birimienne (paléoprotérozoïque) de Diagorou-Darbani (Liptako, Niger, Afrique de l'Ouest). *Africa Geoscience Review*, Vol.13, No.1, pp.107-128.

SOUMAILA A., HENRY P., GARBA Z. and ROSSIM. (2008):- REE Patterns, Nd-Sm and U-Pb ages of the metamorphic rocks of the Diagorou-Darbani greenstone belt (Liptako, SW Niger): implication for Birimian (Paleoproterozoic) crustal genesis, *Geological Society, London, Special Publications*, v. 297; p. 19-32.

WISSINK A. (1972):- Les gisements de manganèse du monde. Conditions de dépôts, typologie et métal contenu. B.R.G.M, chronique des mines, section II, France, n°1.

SHORT NOTE

First report of a tomato leaf curl virus (genus *Begomovirus*) on *Corchorus olitorius* in Togo

Atassé DANSOU-KODJO^{1,2*}, Djodji Kossikouma ADJATA¹, Assion Sétu MIVEDOR¹, Jérôme DUCLERCQ²,
Emmanuelle MULLER³, Yawovi Mawuena Dieudonné GUMEDZOE¹

¹Laboratory of Plant Virology et de Biotechnology (LVBV): High School of Agronomy (ESA)/University of Lomé, BP :1515, Tel: 22 25 41 97 Lomé, Togo,

²Laboratory of Agroecology, Ecophysiology and Integrative Biology (AEB), Unit EDYSAN FRE 3498 CNRS/University of Picardie Jules

Verne, 33 rue St Leu 80039 Amiens, Tel: +33(0) 3 22 82 76 48/ www.u-picardie.fr/edysan

³CIRAD / Virologie, UMR BGP, ITA A54/K, Campus International de Baillarguet, 34398 MONTPELLIER CEDEX 5, Tel : +33(0) 4 99 62 48 46
Corresponding Author : dansouk07@gmail.com

Vegetables play a major role in the livelihood- of the poor rural Africans. Among major constraints to vegetable production worldwide, are diseases caused by a group of viruses belonging to the genus *Begomovirus*, family of *Geminiviridae*. Begomoviruses are plant-infecting viruses, which are transmitted by the whitefly vector *Bemisia tabaci* and have been known to cause extreme yield reduction in a number of economically important vegetables around the world (Leke *et al.*, 2015). Vegetable, *Corchorus olitorius* L., commonly known as wild okra, belongs to the family of *Malvaceae* (APG classification) former *Tiliaceae* (Barbara *et al.*, 2003). It is cultivated for fiber production, and as a food plant (leaves). *Corchorus olitorius* seemed resistant to diseases and pests, but another species of the genus, *Corchorus capsularis* is sensitive to begomoviruses which emerge as a serious biotic constraint for jute fiber production in Asia (Ha *et al.*, 2006; Ghosh *et al.*, 2012).

In 2015-2016, foliar samples of *Corchorus olitorius* were collected from cassava based cropping system fields in Plateau and Maritime regions of Togo as part of begomoviruses emerging in cassava based cropping systems study. Eleven samples were tested and one is found to be positive for the presence of begomoviruses by PCR, using degenerate primers AC1048/AV494 (Wyatt and Brown, 1996). PCR product was sequenced using Miseq V2 Reagent Kit (Illumina Inc., San Diego, CA, USA). One of the sequences (G90a) shared the highest nucleotide identity (89%) with two isolates of Tomato leaf curl viruses: *Tomato leaf curl Nigeria virus*-[Nigeria:2006] (FJ685621.1) and *Tomato leaf curl Kumasi virus*-LIONGO1 (FM210062.1).

This is the first report of tomato leaf curl virus on *Corchorus olitorius* in Togo. These results show that *Corchorus*

olitorius is host and reservoir of tomato leaf curl viruses, and suggest that the strain identified can be a recombinant.

Acknowledgements

This research was supported with funds provided to K.A. DANSOU-KODJO by the International Foundation for Science (IFS) as a research grant (No C/5596-1).

References

- Ghosh R., Palit P., Paul S., Ghosh S.K., Roy A. 2012. Detection of *Corchorus* golden mosaic virus Associated with Yellow Mosaic Disease of Jute (*Corchorus capsularis*). *Indian Journal of Virology*, 23 (1):70–74
- Ha, C., S., Coombs, P., Revill, R., Harding, M., Vu and J., Dale, 2006. *Corchorus* yellow vein virus, a New World geminivirus from the Old World. *Journal of General Virology*, 87, 997–1003. DOI: 10.1099/vir.0.81631-0; PMID: 16528050;
- Leke W.N., Mignouna D.B., Brown J.K., Kvarnheden A., 2015. Review: Begomovirus disease complex: emerging threat to vegetable production systems of West and Central Africa. *Agriculture & Food Security*, 4:1.
- Barbara AW, Kenneth GK and William SA (2003) Chloroplast DNA sequences confirm the placement of the enigmatic *Oceanopapaver* within *Corchorus* (Grewioideae: Malvaceae S.L., formerly Tiliaceae). *Int. J. Plant Sci.* 164 : 35-41.
- Wyatt, S.D., and J.K., Brown, 1996. Detection of subgroup III Geminivirus isolates in leaf extracts by degenerate primers and Polymerase Chain Reaction. *Phytopathology* Vol. 86, No. 12, 1996 pp 1288-1293. DOI: 10.1094/Phyto-86-1288

Successional dynamics of tree species during forest recovery in the southeast of Côte d'IvoireCommon title : **Forest successional dynamics**VROH Bi Tra Aimé^{1*}, ADOU YAO Constant Yves^{1,2}**Abstract**

Secondary forests constitute currently a large and growing component of forest cover, and can be found to be very important for a wide range of goods and services. A synchronic study has been achieved about successional stages in the forest recovery in the Southeast of Côte d'Ivoire. The objectives were to determinate trees species diversity at different successional stages and the auto-ecological characters of the most abundant species following abandonment of agricultural areas. Tree species with dbh ≥ 2.5 cm were counted in 85 plots from fallows gradient and 20 plots from two old-growth forests as control. Five successional stages were identified based on patch occupancy of the 10 best competitor / colonizer advantages. Tree species richness and diversity were significantly higher in the oldest forests. During the first 30 years of secondary regrowth, richness and diversity profile have not been influenced by age since abandonment. At least 14 % of forest tree species were surveyed in young fallows. From two to five pioneer, non pioneer light demanding and shade-tolerant species have the most abundant according to successional stages. Sixty percent of these species were confined to the Guineo-Congolian region and at least 80 % of diaspores were sarcochory and sclerochory types. This study shown that farmers practices in the rural area, were favorable to forest recovery in terms of faster regeneration after agricultural abandonment. This rapid forest recovery can provide the availability of farmlands and can be a good opportunity for human pressures reduction on protected forests.

Key words : successional dynamics, fallows, forest disturbance, auto-ecological character, Yapo protected forest**Résumé****Dynamique de succession des espèces arborescentes pendant la reconstitution forestière au sud-est de la cote d'ivoire**Titre courant : **Dynamique de succession forestière**

Les forêts secondaires constituent actuellement une composante importante de la couverture forestière, et peuvent être considérées comme très importantes pour une large gamme de biens et de services écosystémiques. Une étude synchronique a été réalisée sur les stades de succession dans la reconstitution forestière au Sud-est de la Côte d'Ivoire. Les objectifs étaient de déterminer la diversité des espèces d'arbres à différents stades et des caractères autoécologiques des espèces les plus abondantes, après abandon cultural. Les espèces d'arbres avec un dbh $\geq 2,5$ cm ont été comptées dans 85 parcelles issues d'un gradient d'âge de jachère et 20 parcelles issues de deux forêts anciennes prises comme témoin. Cinq stades successifs ont été identifiés en fonction des abondances des 10 meilleures espèces colonisatrices / Compétitrices dans les parcelles. La richesse et la diversité des espèces étaient significativement plus élevées dans les forêts anciennes. Au cours des 30 premières années de reconstitution, le profil de diversité des espèces n'est pas influencé par l'âge des jachères. Au moins 14% des espèces rencontrées dans les forêts anciennes, sont présentes dans de jeunes jachères. Deux à cinq espèces pionnières, non pionnières ou tolérantes à l'ombre, ont les plus fortes abondances selon les stades de succession. Soixante pourcent de ces espèces sont endémiques à la région Guinéo-Congolaise et au moins 80% des diaspores étaient des types sarcochore et sclérochore. Cette étude a montré que les pratiques agricoles au Sud-est de la Côte d'Ivoire, sont favorables à un rapide rétablissement des forêts. Cette reconstitution forestière peut assurer la disponibilité des terres agricoles en zone rurale et peut être une bonne opportunité pour la réduction des pressions humaines sur les forêts protégées.

Mots clés : Dynamique successionnelle, Jachères, perturbation forestière, caractères autoécologiques, Forêt classée de Yapo, Côte d'Ivoire¹ UFR, Biosciences, University Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, 22 BP 582 Abidjan 22² Centre Suisse de Recherches Scientifiques en Côte d'Ivoire (CSRSCI)* Correspondance author : email : vrohbitra@gmail.com; Tel. 00225 09174556 / 02073037**INTRODUCTION**

The West African moist forests have been reported as rich ecosystems with complex structures which contain many notable endemic species (Sayer et al., 1992). However, forests in this region of the world are under serious threats. According to the Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO, 2016), the annual rate of deforestation in the region has been estimated at 4.2 million ha per year from 1990 to 2000 and at 2.7 million ha per year from 2000 to 2015.

In this region, with past and continued destruction of primary forests, secondary forests constitute a large and growing component of forest cover, and can be found to be very important for a wide range of goods and services.

These secondary forests, such as in many others tropical regions, are subject of an increasing interest (Smith et al., 1999, de Jong et al., 2001). This is mainly, the forests that have naturally regenerated after anthropogenic disturbance (Chazdon et al., 2007). These secondary forests currently, constitute a large proportion with 90 % of West Africa's forests cover (Schroeder et al., 2017). They contribute to biodiversity conservation by relieving pressure on primary forests, by functioning as corridors for the migration of flora and fauna in fragmented landscapes, and by maintaining plant and animal genetic resources (FAO, 2006). If properly managed, they have the potential important environmental benefits and services.

In Côte d'Ivoire, until 1935, tracts of virgin forest could still be seen when travelling along the roads (Aubreville, 2015). But, the expansion of cocoa, coffee, rice crops and also the forest clearing have involved the rarity of the primary forest in the South of the country (Aké-Assi, 1998 ; Chatelain et al., 2004). Currently, some more or less intact forests are under protection, such as the Taï National Park and the Azagny National Park. As the area of secondary forests in Côte d'Ivoire is expanding and represents the major forest type, the conservation of only old-growth forests in national parks and other protected areas, will hardly be sufficient. Indeed, the expanding secondary forest may mitigate extinction caused by declining areas of old-growth habitats (Wright and Muller-Landau, 2006). The conservation of secondary forests, which potentially contain a significant proportion of biodiversity, appears so to be timely and imperative.

Generally after disturbance, the regeneration and secondary succession of tropical moist forests is rapid in terms of species richness, plant growth, and other developmental features (Murphy and Lugo, 1986). But, successional processes are not always directional or predictable, and multiple pathways can lead to a range of mature forest types rather than a single stable endpoint (Gleason, 1926). Indeed, successional changes in richness and diversity may be driven by several stages and intrinsic species auto-ecology character differences such as recruitment, growth and mortality rates (Richards, 1952).

In Côte d'Ivoire, despite the increasing area of secondary forests (Aubreville, 2015), the forest recovery process in relation to fallows time, remains poorly explored. This study tried to answer this question: what processes are underlying natural regeneration on abandoned agricultural lands ? The analysis focused on the determination of the successional stages and the auto-ecological characters of the most abundant trees species following abandonment of agricultural fields in the Southeast of Côte d'Ivoire where the agricultural has affected 71 % of forest cover (Etc Terra, 2016). The objectives of the study were : (1) to identify the successional stages based on age that both early and late successional species are able to persist during the reconstitution of forest landscape, (2) to determine the diversity and the most abundant of early and late successional species, and (3) to characterize some auto-ecological characters of these most abundant species.

METHODS

Description of the study area

The study took place around the locality of Azaguié in the Southeast of Côte d'Ivoire (Figure 1). Despite the biggest deforestation rate (71 %) in the Southeast (Etc Terra, 2016), Azaguié area supports yet, one of the largest and only block of the rainforest remains: Yapo Protected forest (YPF). Also, there are many perennial crop types cultivated according to farmers' empirical practices in this area (Vroh et al., 2017). Among these crop farms, cocoa (*Theobroma cacao*), cola (*Cola nitida*), teck (*Tectona grandis*) and rubber (*Hevea brasiliensis*) take the larger place in the landscape. The secondary forests studied here, resulted mainly after abandonment of these crop farms.

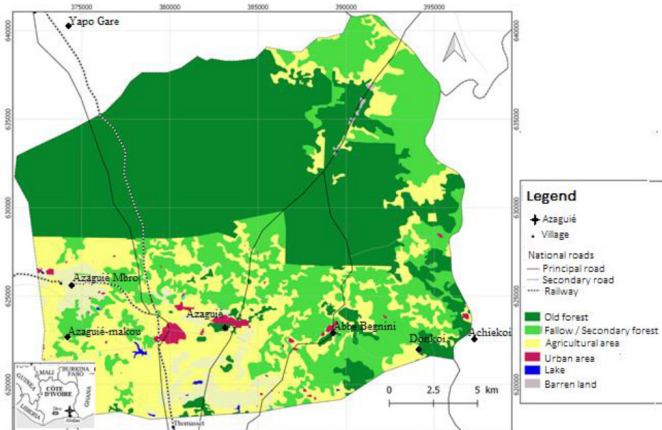


Figure 1 : Map of land use in Azaguié area
(Source: Poorter et al., 2004)

Rainfall and temperature database from 1996 to 2009 showed that, climate regime for this area had four seasons : two dry and two rainy seasons. The duration of the dry season was less than 5 months. Annual rainfall varied between 1,500 and 2,000 mm. In 1907, Chevalier was the first botanist who inventoried in this area (Corthay, 1996). The vegetation of the area is characterized by *Diospyro-Mapanietum* association (Mangenot, 1955). The main vegetation is evergreen rainforest (Guillaumet, 1967) that is being replaced by disturbed biotopes such as farms, fallows and secondary forests.

In the area the old-growth forests included the Yapo Protected Forest (YPF) and a Voluntary Natural Reserve (VNR). The two forests are differently managed. YPF was subjected to logging with enrichment in some compartments (experimental plots) which resulted in changes in its vegetation and natural flora (Corthay, 1996). The VNR is a private forest patch created by an individual. In this forest any intervention of local people was prohibited since 2005 (Vroh et al., 2010).

There were also secondary forests which included all small patches in the agricultural landscape. They are constantly penetrated by people for various reasons. These included « community forest » fragments. In these secondary forests, the farmers' activities of harvesting non-timber forest products (NTFPs) were uncontrolled and difficult to measure. According to the farmers, the fallows concerned all resting sites which have not reached optimum fertility conditions for agriculture. These fallows resulted from activities such as cocoa, cola, rubber, and teak smallholder farming systems. For this study, three biotope types (fallows, secondary forests and old-growth forests) have been selected for botanical investigation (Figure 1).

Data collection

This study based on secondary successions has been done under the synchronic approach (Tchiengué, 2012). The searching of fallows and their ages was one of the most difficult step for the approach during this study. This step was achieved through the commitment of farmers who are owners of fields. On the site, the farmer showed the fallows / secondary forests and answered questions regarding when the farm was abandoned. This reasoning allowed to select 17 habitat types including fallows and secondary forest of 1 to 45 years old. The two remaining old-growth forests (YPF and VNR)

were additionally selected. These two sites were considered as control old-growth forests without any history of major disturbances in the area and their age was estimated more than 60 years. In the case of the present study, only Yapo Protected forest's compartments without logging activities and enrichment, were carefully selected and inventoried.

Survey was conducted using stratified sampling method. Each habitat type was considered as a stratum and plots were randomly set up. A total of 105 plots of 500 m² were sampled and inventoried in the YPF (N = 10 plots), the VNR (N = 10 plots), the young and old fallows (N = 85 plots). In each plot, all trees with a dbh (diameter at breast high) greater or equal to 2.5 cm, were identified, measured, and counted. Only trees with dbh ≥ 2.5 cm have been included because trees of small size contribute more to the vast majority of plant diversity (Tchouto, 2004). The dbh ≥ 2.5 cm has then been taken in the objective to take into account the maximum species and individuals. Identification of species was made on field according to Cronquist (1981) classification system. Undetermined specimens (less than 2%) were identified by Laurent Aké-Assi and by comparison to those of the National Herbarium of Côte d'Ivoire (*Herbarium ivorensis* UCJ).

Data analysis

Identification of the succession stages

It is recognized that forest recovery followed mainly some successional stages based on the chronosequences and/or the most dominant species or group of species (Ruiz et al., 2005 ; Norden et al., 2015). Here the succession stages were identified from the multispecies competition-colonization tradeoff (Pacala and Rees, 1998). According to Tilman (1994), this competition-colonization trade-off is currently the most visible explanation of successional diversity. The process is based on the multispecies "patch-occupancy models" (Caswell and Etter, 1993) in an area with several sites. Lehman and Tilman (1997) showed that this model induce more species coexistence if the competition-colonization trade-off is reached based on some references values: best competitor abundance at least 20 % ; mortality rate equal to 10 %. Indeed, each succession stage is characterized by the dominance of one or a group of better colonizer species or better competitor's species. At plot level, the trade-off result from a constant presence of an unoccupied areas during the forest recovery process (Lett et al., 1999). These unoccupied area are therefore, favourable to species eliminated by best colonizer / competitor's species. To avoid extrapolation of the result, each curve was stopped at the maxima estimated age (60 years) of the habitats. This analysis was done with EcoVirtual Package (Stevens, 2009) for R.

Floristic description of the different succession stages

Firstly, to illustrate how many tree species are shared between the different successional stages, a Venn diagram was drawn with the Bioinformatics & Evolutionary Genomic Tool (<http://bioinformatics.psb.ugent.be/webtools/Venn/>).

Secondly, considering the different succession stages, many diversity indices were calculated to compare trees species

diversity: Species richness, Shannon, Pielou's evenness, Simpson (See Kent and Cooker, 1992 for formula details).

Thirdly, considering the fact that since a single diversity index will not provide sufficient information (Morris et al., 2014), the Renyi diversity profile was calculated. That is one of the techniques for diversity ordering and specifically designed to rank communities from low to high diversity (Kindt et al., 2006). Renyi diversity profile values ($H\alpha$), based on 100 randomisations, are calculated from the frequencies of each component species and a scale parameter α ranging from zero to infinity (Legendre and Legendre, 1998). The mathematical formula of $H\alpha$ is :

$$H\alpha = \frac{\ln \sum (p_i)^\alpha}{1-\alpha}$$

In this formula, p_i is the abundance of species i and α is a scale parameter.

Legendre and Legendre (1998) and Shaw (2003) have demonstrated that values of the Renyi profile at the respective scales of 0, 1, 2 and ∞ are related to species richness S , the Shannon diversity index H' , the Simpson diversity index and the Berger-Parker diversity index. The Berger-Parker index of dominance is the proportion of the most common (abundant) species in the community or sample and the inverse of this index is used as an index of diversity. An increase inverse of Berger-Parker index means increasing diversity and then the reduction in dominance of one species (Berger and Parker, 1970). Considering the comparison based on the Renyi diversity profile, community A is more diverse than a community B if the diversity profile for community A is everywhere above the diversity profile for community B (Kindt et al. 2006). Communities that have intersecting profiles have the same diversity level. In other words, Renyi diversity ordering is a graphical method of diversity ranking that allows to distinguish between situations where ecological communities (such as successional stages in this survey) can be ranked in diversity or situations where this is not conceptually possible (Magurran, 1988 ; Purvis and Hector, 2000).

Finally, using the rank abundance analysis, the diagnostic species of each fallowstage were identified. For these species, we determined three auto-ecological characters (Tchiengué, 2012) : phytogeographical distribution, types of diaspore's dispersal, and regeneration guilds. The phytogeographical distribution types were inspired from White (1983). For this study, we distinguished in Africa, the Guineo-Congolian (GC) species, the Soudano-Zambezian species (SZ) and the species common to Guineo-congolian and sudano-zambezian regions (GC-SZ) between these two areas. All species outside of these areas have been considered as exotic. Among the Guineo-Congolian species, we have distinguished those endemic to Guineo-Congolian West forest (GCW). The types of diaspore's dispersal were determined according to the classification of Dansereau and Lems (1957) which had been widely used in tropical Africa (Mosango and Lejoly, 1990; Sonké, 1998). The guild category of different most abundant species was identified considering the classification established by Hawthorne and Abu-Juan (1995). These authors recognize three categories of plants: the pioneer trees, the non pioneers light demander species and the shade-tolerant species.

RESULTS

In total 4607 trees individuals ($dbh \geq 2.5$ cm) belonging to 196 species, 97 genera, and 52 families were censused in the 19 sites aged from 1 to 60 years. The number of species ranged from 2 in fallows of one year old to 166 in older forests. The most rich families were Rubiaceae (17 species), Apocynaceae (12 species), Euphorbiaceae (9 species) and Fabaceae (6 species). In all habitats, at least 50 % of species were endemic to Guineo-Congolian area. From 23.5 to 37 % of species were endemic to Guineo-Congolian and Soudano-Zambezi transitional phytogeographical area.

Succession stages and the floristic diversity

Five (5) successional dynamics sequences have been ranked based on the patch occupancy (occurrence ≥ 10 % of plots) of the 10 best competitor / colonizer advantages (Figure 2). The first sequence concerned habitats aged from 1 to 10 years. This sequence is dominated by 5 best colonizer species. The second sequence concerned habitat that aged from 10 to 20 years. This sequence is dominated by only one species (occurrence ≥ 10 % of plots) which mark the transition between best colonizer and best competitor species. The last three sequences were dominated by best competitor species. These sequences concerned all habitats characterised by the chronosequences [20 – 30 years [; [30 – 50 years [and [50 – 60 years]. These sequences were also characterised by species which competitive dominant value was increasingly greater with the forest age.

Based on these five chronosequences, the species richness ranked from 166 in old forest (60 years) to 19 in old fallows with 20–30 years (Table I).

The Nonsymmetric Venn diagram (Figure 3) showed that, 14 species (7.14 %) are shared between all the five chronosequences. Among the 36 recorded species in the young fallows [1 – 10 years [, seven (19.4 %) were strictly present in these habitats. These species were not recorded in the other habitats. For the sequence [10 – 20 years [, only two species were strict. All species censused in the old fallows [20 - 30 years [were also recorded in at least one other sequence. The old forests (60 years) and the oldest fallows (30 – 50 years) shared more species (64). Old forests showed 95 unique species and the oldest fallows showed 16.

The total value of Shannon index is 3.97 and ranking from 3.94 in old forest to 2.38 in secondary forest. The correspondance Eveness index in all habitat types was 0.75. The lower values of Eveness (0.73 and 0.77) were reached in the old forest and the oldest fallows. The higher value (0.82) was reached in the younger fallows with 1 – 10 old. The Simpson diversity index slightly differed between the five chronosequences (Table I).

The diversity profiles of each successional dynamic sequences are represented by Figure 4. The profile of the old forests is consistently higher than other sequences for all values of alpha. The values of species richness at H ($\alpha = 0$) are clearly different except those between the first two younger fallows (1 - 10 and 10 – 20 years) which are still rather tight. The curves became more tight for Simpson diversity Index at H ($\alpha = 2$) between the younger fallows (1 – 10 years) and oldest fallows (30 – 50 years). For Berger–Parker diversity index at H ($\alpha = \infty$), excepted old forests, the curve from all other chronosequences stay tight.

Finally results from the comparison based on the diversity profiles, showed that all successional stages have a clear bend towards low values of H-alpha at higher scales of alpha.

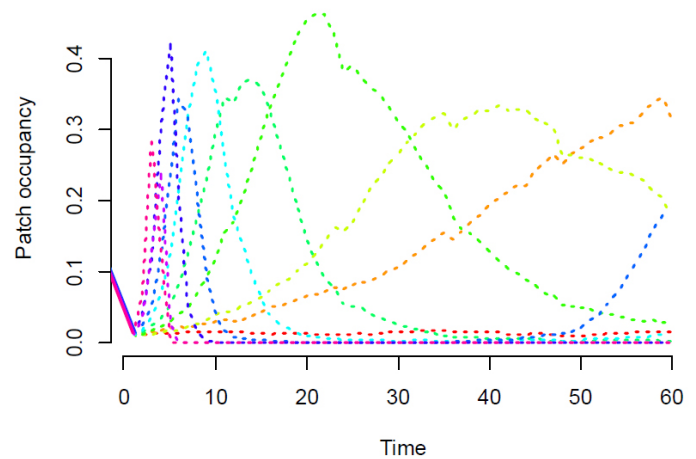


Figure 2: Successional dynamics generated by the ten best competitor / colonizer species.

Best competitor abundance = 20 % ; mortality rate = 10 % , Disturbance frequency = 10 % , disturbance intensity = 10 %

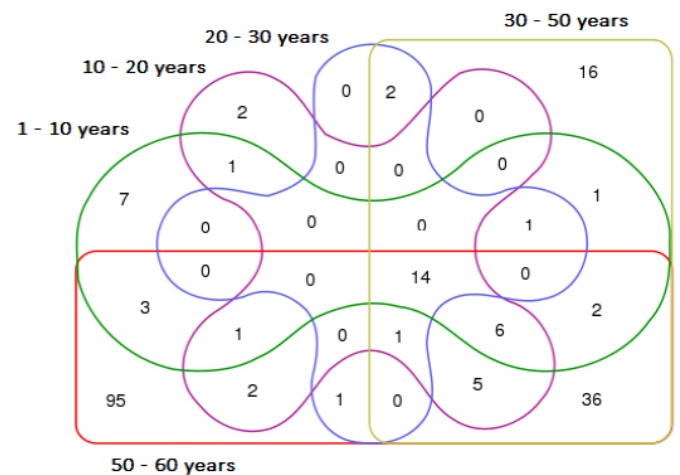


Figure 3: Nonsymmetric Venn diagram showing the number of species shared between the successional stages

Table I : Characteristics of the flora from differents successional stages

Successional stages (years)	abundance	Richness	Shannon	Simpson	Eveneness
[1 - 10[	476	36	2.94	0.92	0.82
[10 – 20 [	232	32	2.69	0.88	0.78
[20 – 30 [	113	19	2.38	0.85	0.81
[30 - 50[	1117	84	3.21	0.91	0.73
[50 – 60]	2669	166	3.94	0.96	0.77
All habitats	4607	196	3.97	0.96	0.75

Description of the most abundant species

The composition of the five most abundant species changed significantly with successional stages (Table II). Also, these most abundant species have different auto-ecological characters. Three main guild categories were distinguished : non pioneer light demanding (npld), pioneer (pi), and shade tolerant (sb) species.

In the youngest fallow (1 – 10 years), *Acacia mangium* was ranked 1 as this species had the largest total abundance of 85 (18.4 %). *Funtumia elastica* and *Harungana madagascariensis* with respectively 13.6 and 9.3 % were fairly abundant. The other species in this chronosequence

have relatively low total abundance. In this sequence, only *Funtumia elastica* was non pioneer light demanding (npld). The others were pioneer species.

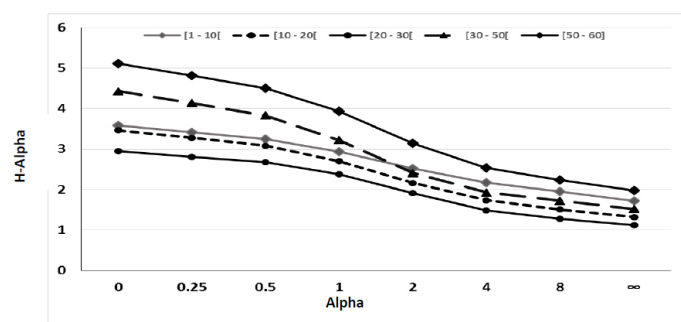


Figure 4 : Comparison of diversity profile for the successional stages

abundant but they proportion was lower than non pioneer light demanding and pioneer species.

In the successional dynamic sequence with 30 – 50 years, the most common abundant species were *Funtumia elastica* (21.8 % of individuals) and *Dacryodes klaineana* (16.8 % of individuals). For the old forest, the most abundance species were *Tarrietia utilis* (13.9 % of individuals) and *Baphia nitida* (10.2 % of individuals).

For this sequence, non pioneer light demanding and shade tolerant species (*Baphia nitida*) account for more than 50 % of the individuals. For this sequence, the abundance of most pioneer species decreased.

The phytogeographic types of distribution showed more

Successional stages (years)	Species	Proportion (%)	Abundance (stems)	Ecological guilds	Diaspores type	Phytogeography / Biology
[1 – 10[	<i>Acacia mangium</i>	18,4	85	pi	sarcochory	Exotic / mp
	<i>Funtumia elastica</i>	13,6	63	nph	pogonochory	GC / MP
	<i>Harungana madagascariensis</i>	9,3	43	pi	sarcochory	GC / mp
	<i>Macaranga hurifolia</i>	7,6	35	pi	sclerochory	GC / mp
	<i>Anthocleista nobilis</i>	6	28	pi	sarcochory	GCW / mp
[10 - 20[	<i>Funtumia elastica</i>	26,7	62	nph	pogonochory	GC / MP
	<i>Anthocleista nobilis</i>	12,9	30	pi	sarcochory	GCW / mp
	<i>Macaranga hurifolia</i>	9,9	23	pi	sclerochory	GC / mp
	<i>Dacryodes klaineana</i>	8,2	19	nph	sarcochory	GC / mP
	<i>Musanga cecropioides</i>	5,2	12	pi	sarcochory	GC / mP
[20 - 30[	<i>Funtumia elastica</i>	32,7	37	nph	pogonochory	GC / MP
	<i>Dacryodes klaineana</i>	10,6	12	nph	sarcochory	GC / mP
	<i>Pentadesma butyracea</i>	9,7	11	sb	sarcochory	GC-SZ / MP
	<i>Anthocleista nobilis</i>	8	9	pi	sarcochory	GCW / mp
	<i>Macaranga heudelotii</i>	7,1	8	pi	sclerochory	GC / mp
[30 – 50[	<i>Funtumia elastica</i>	21,8	244	nph	pogonochory	GC / MP
	<i>Dacryodes klaineana</i>	16,8	188	nph	sarcochory	GC / mP
	<i>Baphia nitida</i>	6,5	73	sb	ballochory	GC / mp
	<i>Macaranga hurifolia</i>	5	56	pi	sclerochory	GC / mp
	<i>Tarrietia utilis</i>	3,6	40	nph	pterochory	GCW / mP
[50 - 60]	<i>Tarrietia utilis</i>	13,9	372	nph	pterochory	GCW / mP
	<i>Baphia nitida</i>	10,2	272	sb	ballochory	GC / mp
	<i>Dacryodes klaineana</i>	5,1	136	nph	sarcochory	GC / mP
	<i>Macaranga hurifolia</i>	4,3	116	pi	sclerochory	GC / mp
	<i>Maesobotrya barteri</i>	3,4	92	sb	sclerochory	GCW / mp

In the fallows of 10 – 20 years old, *Funtumia elastica* was ranked 1 with the largest total abundance (26,7 %) followed by *Anthocleista nobilis* (12,9 %) and *Macaranga hurifolia* (9,9%). For this sequence, *Funtumia elastica* and other lower abundant species such as *Dacryodes klaineana* were non pioneer light demanding. For these fallows, pioneer species account for more than 50 % of the most abundance species.

In the fallows with 20 – 30 years, *Funtumia elastica*, *Dacryodes klaineana*, and *Pentadesma butyracea* were the most abundant with respectively 32.7, 10.6 and 9.7 % of total individuals. For this sequence, shade tolerant species become

than 60 % of the most abundance species was confined to the Guineo-Congolian (GC) area. Only one species, *Acacia mangium* is exotic from Africa. Some species such as *Maesobotrya barteri*, *Tarrietia utilis* and *Anthocleista nobilis* are endemic to Guineo-Congolian West forest (GCW).

Regardless the diaspora types, sarcochory and sclerochory were well represented and constitutes at least 80 % of the most abundant species in fallows aged from one to thirty years. In more than 30 years old sites, many diaspora types were observed in the same proportion of the most abundant species: sclerochory, ballochory, pterochory and pogonochory.

DISCUSSION

Usually, without human intervention, forest recovery was based on several successional stages characterized by some most dominant species or group of species with different auto-ecological characters (Naeem and Wright, 2003). In the South-east of Côte d'Ivoire, the identification of the different succession stages during forest recovery, has been based on the «multispecies competition-colonization tradeoff» approach. According to this approach, a successional stage is established when there is a trade-off between the best colonizer / competitor species during the forest recovery process. So, each successional stage could be characterized by more species coexistence (Lehman and Tilman, 1997). However, this approach has some limits, of which, one has been mainly commented by several authors. For Huston et al. (1988), this forest dynamic model is based on assumptions that don't respect a fundamental biological principle. One of these assumptions is that "all individuals in a population, are identical". That is a paradox because, each individual is unique, and his behavior and physiology result from genetic characteristics modulated by the influence of the environment (Lett, 1999). In other words, parameters (mortality = 10 % and abundance = 20 %) for all species may therefore be the model limits. Shugart and West (1977) recommended the use of individual models in the population dynamics. In these models, the individual is the basic entity. However, these models called "gap models" (Botkin et al., 1972), are more adapted for small-scale plots such as forest gaps.

For the present study, the "multispecies competition-colonization tradeoff" approach has been based on the existence of a disturbance frequency (20 %) with an intensity of 10 %. This suggested that successional processes are not always directional or predictable (Gleason, 1926). There are biological phenomena, which makes this approach one of the best in forest recovery (Shugart 1984; Lett et al., 1999). The assumption that succession is orderly or deterministic and will eventually reach the original forest structure and species composition present before the disturbance, has been so, avoided.

The "multispecies competition-colonization tradeoff" approach permitted to identify five (5) successional stages in the South-east of Côte d'Ivoire. Considering the chronosequence, the age class after abandonment of agricultural ([1 – 10 years [, [10 – 20 years [, [20 – 30 years [, and [30 – 60 years]) were more extensive (in the time) than those assumed by some authors on the basis of simple field observation. For example, Kassi et al. (2010) and Mukul and Herbohn (2016) categorized their sites into four different fallow categories: fallows less than 5 years old, hereafter referred to as new, those with 5 - 10 years old, called young fallows, 11-20 year old fallows, considered as middle-aged, and 21-30 year old fallow, considered as oldest. Some other authors such as Richards (1952) have identified three (3) main successional stages for west african forest : early stage (1 – 15 years), young secondary forests (15–20 years), and late secondary forest (30–40 years). However, the identified stages in this study were similar to those described by Zanini

et al. (2014). These authors have categorized four tree species successional stages according to the age classes proposed by Chazdon (2008) for tropical successional forests : Stage 1 (6 – 10 years), stage 2 (10 – 25 years), stage 3 (26 – 45 years) and stage 4 (over 45 years old). Usually, this last stage was categorized as old-growth forest. One of the main and common questions about all these study is "what are the diversity levels and the most dominant species at each stage?"

Numerous studies have documented the relationship between forest age and species diversity. At least, during the first 30 years of secondary regrowth, this case study shows that chronosequence data do not correctly reflect true species dynamics. Indeed, over 30 years, there were an increasing of 16 - 95 unique species (19 - 57 %) respectively in the secondary forests (30 – 50 years old) and in the old forests. Fallows of [1 – 10 years [have most species richness and diversity than those of [10 – 20 years [, [20 – 30 years [. Direct comparisons are difficult due to lack of standardization of diversity measures (Chazdon et al., 2007). Saldarriaga et al. (1988) found a positive relationship between stand age and species diversity (Shannon index) in 40 years old secondary forests and old-growth in very small plots. Andel (2001) found higher diversity (Fisher's alpha) in old secondary forests in northwest Guyana than in neighbouring old-growth forests.

For this case study, the decreasing in species richness and diversity from young fallows (1 – 10 years) to secondary forests (10 – 30 years) can be explained by different human pressures. Indeed, the secondary forests locally called « black forest » according to farmers perception, were under human pressures such as timber logging, hunting, harvesting of toothpicks and of other non timber forest products (NTFPs) harvesting. Effects of all these uncontrolled activities could reduce plant diversity and richness as observed in community forests by Vroh et al. (2015) in the same area. These forests were so regularly disturbed by local people activities. In the old forests including Yapo Protected Forest, the human activities were controlled by SODEFOR (State management structure). Also, in the Natural Voluntary Reserve, these activities were prohibited since 2005. So these two controlled forests have been less harmful to plant species diversity according to all calculated diversity indices.

The results showed also that, for any successional stage, one to three most abundant species were pioneer. There were *Acacia mangium*, *Harungana madagascariensis*, *Musanga cecropioides*, *Anthocleista nobilis*, *Macaranga heudelotii*, and *Macaranga hurifolia*. *Acacia mangium* and *Harungana madagascariensis* were among the most abundant species only in the younger fallows (1 - 10 years). This mean that these pioneer species were best colonizer and dominated the community during the first years of regeneration (Chazdon et al., 2007). *Acacia mangium*, an exotic species from Africa, was more used in fallows in order to increase the soil fertility capacity. It was also presented to be a good fuelwood 5 years after the plantation. This is a relatively short-lived species that does not exceed fifteen years under the climatic conditions of Côte d'Ivoire (Gnahoua and Loupe, 2003). Moreover, this species flowers precociously, and viable seeds can

be harvested 24 months after planting (Orwa et al., 2009). The others early colonizer (*Harungana madagascariensis*, *Musanga cecropioides*, *Anthocleista nobilis*, *Macaranga heudelotii* and *Macaranga hurifolia*) have been already reported as best colonizer species with the same characters, in the South of Côte d'Ivoire (Alexandre, 1982 ; Khan, 1982). By contrast to *Acacia mangium*, the other pioneer species were among the most dominant in the secondary forests and the old-growth forests. These kind of species have been reported as very long lived pioneer species (Gemerden et al., 2003).

The study showed also that *Funtumia elastica*, commonly named « African wild rubber », a non pioneer light demanding species, was constantly among the most abundant species in all fallows aged from one to 50 years old. This species was reported as a typical secondary forest species in the South of Côte d'Ivoire and also in other tropical areas (Vroh et al., 2010 ; Verbeeck et al., 2014). *Funtumia elastica* could mark the transition between best colonizers and best competitor species during the successional stages. This species was replaced progressively by two other non pioneer light demanding species (*Dacryodes klaineana* and *Tarrietia utilis*) in the old-growth forests.

In the South-east of Côte d'Ivoire, the abundance of *Tarrietia utilis* and *Dacryodes klaineana* had been demonstrated by Corthay (1996) and Vroh et al. (2015). From 20 to 60 years, these two species could be the best competitor species in this area. The gregarious behavior (fruits dispersal no far from mature stems) of *Tarrietia utilis* mentioned by Aké-Assi (2002) in the study area, could be one of the reasons that explain this observation. Trees of *Dacryodes klaineana* may produce a limited number of female flowers, and thus, little fruits (Orwa et al., 2009). These two late successional species have the opposite traits (including relatively low fecundity, short dispersal) to those described about early pioneer species.

The first shade tolerant species (*Pentadesma butyracea*, *Baphia nitida*, and *Maesobotrya barteri*) were among the most abundant species from the secondary forests of 20 – 30 years to the old-growth forests. It is well known that during the tropical forest recovery process, such as the study area, many shade-tolerant climax tree species are capable of survival and growth beneath pioneer trees (Howlett et Davidson, 2003) and may, over time, replace them in a successional sequence (Whitmore, 1998).

The two diaspore types of seed dispersal, sarcochory (fully, partially soft or fleshy diaspore such as those of *Pentadesma butyracea*) and sclerochory (very light diaspore such as those of *Tarrietia utilis* and *Funtumia elastica*) characterized respectively plant species with adaptations for zoochorous and autochorous dispersal (Mosango and Lejoly, 1990). These diaspore types were well represented and constituted at least 80 % of the most abundant species in this case study. This result confirms that the proportion of plant species with adaptations for zoochorous and autochorous dispersal is high among trees and shrubs (Dirzo and Dominguez, 1986) in tropical forest.

CONCLUSION

All results from this study tried to describe the successional process during the forest recovery in the South-east of Côte d'Ivoire. The identified successional stages were similar to those described by some authors based on the direct observations on fields. But, these stages were more extensive (in the time) than those assumed by other authors. This means that the sequence and duration of successional phases may vary substantially among tropical forests, depending on the nature of the initializing disturbance and the potential for tree colonization and forest structural development. However, for any author, the forest recovery began with very early pioneer species having short live, followed by the long lived pioneer species, the non pioneer light demanding species, and the shade tolerant species. During the successional stages, the richness and diversity have not been influenced by age since abandonment. Clearly, unknown and undetermined factors, other than age, could have had influenced these floristic parameters in the study area. At least, 14 % of forest tree species were surveyed in young fallows. This study showed that farmers practices in Azaguié area, were favorable to the faster regeneration after agricultural abandonment. This rapid forest recovery in the area can provide the availability of farmlands and can be a good opportunity for human pressures reduction on protected forests such as national parks and reserves. However, will this situation persist for a long time, given the rapid population growth and the growing needs for farmlands in the country?

BIBLIOGRAPHY

- Aké Assi L. 2002. Flore de la Côte d'Ivoire 2 : Catalogue, systématique, biogéographie et écologie. Boissieria 58 : 1 - 441.
- Alexandre D.Y. 1982. Aspects de la régénération naturelle en forêt dense de Côte d'Ivoire. Candollea 37: 579 - 588.
- Andel T.V. 2001. Floristic composition and diversity of mixed primary and secondary forests in northwest Guyana. Biodivers. Conserv. 10 : 1645 – 1682.
- Aubréville A. 2015. In Search of the Forest in Côte D'ivoire, parts 1 & 2. Bois et Forêt des Tropiques 323 (1) : 71 – 101.
- Berger W.H., Parker F.L. 1970. Diversity of Planktonic foraminifera in deep sea sediments. Science 168: 1345 – 1347.
- Botkin B.D., Janak J.F., Wallis J.R. 1972. Rationale, limitation, and assumptions of a northeastern forest growth simulator. IBM J. Develop. 16: 101 – 116.
- Caswell H., Etter R.J. 1993. Ecological interactions in patchy environments : from patch-occupancy models to cellular automata. In Levin S.A., Powell T., Steele J.H. (eds) Patch dynamics. Springer-Verlag : 93 – 103.
- Chazdon R.L. 2008. Chance and determinism in tropical forest succession. In : Carson W.P., Schnitzer S.A. (eds) Tropical forest community ecology. Blackwell Publishing Ltd. pp : 384 – 408.
- Chazdon R.L., Letcher S.G., van Breugel M., Martinez-Ramos M., Bongers F., Finegan B. 2007. Rates of change in tree communities of secondary Neotropical forests following

- major disturbances. *Phil. Trans. R. Soc. B* 362 : 273 – 289
- Corthay R. 1996. Analyse floristique de la forêt sempervirente de Yapo (Côte d'Ivoire). Travail de diplôme, Université de Genève.
- Cronquist A. 1981. *An Integrated System of Classification of Flowering Plants*. Columbia University Press. New York (1981).
- Dansereau P., Lems K. 1957. The grading of dispersal types in plant communities and their significance. University of Montreal, Montreal
- Dirzo R., Domínguez C.A. 1986. Seed shadows, seed predation and the advantages of dispersal. In Estrada A., Fleming T.H. (eds) *Frugivores and Seed Dispersal*. Dordrecht: pp. 237– 249.
- ETC TERRA, 2016. Analyse qualitative des facteurs de déforestation et de dégradation des forêts en Côte d'Ivoire. Rapport Final, Programme ONU-REDD, Abidjan, Côte d'Ivoire.
- FAO 2016. Situation des forêts du monde. Forêt et Agriculture : défis et possibilités concernant l'utilisation des terres. Rome.
- Gemerden B.S., Olff H., Parren M.P.E., Bongers F. 2003. The pristine rain forest? Remnants of historical human impacts on current tree species composition and diversity. *J. Biogeogr.* 30 : 1381–1390.
- Gleason H.A. 1926. The individualistic concept of the plant association. *Bull. Torrey Bot. Club* 53 : 7–26.
- Gnahoua G.M., Loupe D. 2003. *Acacia mangium*. CNRA, Abidjan, Côte d'Ivoire
- Guillaumet J.L. 1967. Recherche sur la végétation et la flore de la région du Bas Cavally (Côte d'Ivoire). Mémoire ORSTOM 20. Paris, France.
- Hawthorne W.D., Abu-Juam M. 1995. Forest protection in Ghana with particular reference to vegetation and plant species. IUCN, Gland
- Howlett B.E., Davidson D.W. 2003. Effects of seed availability, site conditions, and herbivory on pioneer recruitment after logging in Sabah, Malaysia. *Forest Ecology and Management* 184 : 369 – 383.
- Kassi N.J., Aké-Assi E., Tiébré M.S. 2010. Biodiversité végétale et vitesse de la régénération de la forêt classée de Sanaimbo (Côte d'Ivoire). *Sciences & Nature* 7 (2) : 195 - 206
- Kent M., Cooker P. 1992. *Vegetation description and analysis: a practical approach*. London: Belhaven Press.
- Khan F. 1982. La reconstitution de la forêt tropicale humide au ? Sud-ouest de la Côte d'Ivoire. ORSTOM, Collection mémoires, Paris.
- Kindt R., Van Damme P., Simon A.J. 2006. Tree diversity in western Kenya: Using profiles to characterise richness and evenness. *Biodiversity and Conservation* 15: 1253 - 1270
- Legendre P., Legendre L. 1998. *Numerical Ecology*. 2nd edition, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Lehman C.L., Tilman D. 1997. Composition in spatial habitats. In Tilman D., Kareiva P. (eds) *The role of space in populations dynamics and interspecific interaction*, *Monographs in population biology* 30. Princeton University press, 185 – 203.
- Lett C. 1999. Modélisation et simulation des écosystèmes forestiers: des modèles agrégés aux modèles individuels spatialisés. Thèse de docteur de l'Université Louis Pasteur Strasbourg 1 en Sciences du vivant.
- Lett C., Silber C., Barret N. 1999. Comparaison of a cellular automata network and an individual-based model for the simulation of forest dynamics. *Ecological modelling* 121 : 277 – 293.
- Magurran A.E. 1988. *Ecological diversity and its measurement*. Princeton University Press
- Mangenot G. 1955. Etude sur les forêts des plaines et plateaux de la Côte d'Ivoire. *Etudes éburnéennes* 4 : 5 - 61
- Morris E.K., Caruso T., Buscot F., Fischer M., Hancock C., Maier T.S., Meiners T., Muller C., Obermaier E., Prati D., Socher S.A., Sonnemann I., Waschke N., Wubet T., Wurst S., Rillig M.C. 2014. Choosing and using diversity indices: insights for ecological applications from the German Biodiversity Exploratories. *Ecology and Evolution* 4 (18): 3514 – 3524.
- Mosango M., Lejoly J. 1990. La forêt dense humide à *Piptadeniastrum africanum* et à *Celtis mildbraedii* des environs de Kisangani (Zaire). *Mitt Ints Allg Bot* 23: 853 - 970
- Mukul S.A., Herbohn J. 2016. The impacts of shifting cultivation on secondary forests dynamics in tropics: A synthesis of the key findings and spatiotemporal distribution of research. *Environmental Science & Policy* 55 : 167 – 177.
- Norden N., Angarita H.A., Bongers F., Martinez-Ramos M., de la Cerda G., van Breugel M., Lebrija-Trejos E., Meave J.A., Vandermeer J., Williamson B., Chazdon R.L. 2015. Successional dynamics in Neotropical forests are as uncertain as they are predictable. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 112 : 8013-8018.
- Orwa C.A.M., Kindt R., Jamnadass R.S.A. 2009. *Agroforestry Database: a tree reference and selection guide version 4.0*.
- Pacala S.W., Rees M. 1998. Models suggesting field experiments to test two hypotheses explaining successional diversity. *Am Nat.* 152: 729 – 737
- Purvis A., Hector A. 2000. Getting the measure of biodiversity. *Nature* 405: 212 – 219.
- Richards P.W. 1952. *The Tropical Rain Forest*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Ruiz J., Fandino M.C., Chazdon, R.L. 2005. Vegetation structure, composition, and species richness across a 56-year chronosequence of dry tropical forest on Providencia Island, Colombia. *Biotropica* 37 : 520 – 530.
- Saldarriaga J.G., West D.C., Tharp M.L., Uhl C. 1988. Long-term chronosequence of forest succession in the upper Rio Negro of Colombia and Venezuela. *J. Ecol.* 76 : 938 – 958.
- Shaw P.J.A. 2003. *Multivariate statistics for the environmental sciences*. London: Hodder Arnold.

- Schroeder J.-M., Oke D.O., Onyekwelu J.C., Yirdaw E. 2017. Secondary Forests in West Africa: a Challenge and Opportunity for Management. Presentation based on chapter 18 in *Forests and Society – Responding to Global drivers of Change*, IUFRO World Series Vol. 25
- Shugart H.H. 1984. *A theory of forest dynamics*. Springer-Verlag, New-York.
- Shugart H.H., West D.C. 1977. Developpment of an Appalachian deciduous forest succession model and its application to assessment of the impact of the chestnut blight. *Journal of environmental management* 5: 161 – 179.
- Sonké B. 1998. Etudes floristiques et structurales des forêts de la Réserve de Faune du Dja. Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles.
- Stevens M.H.H. 2009. *A primer of ecology with R*. Monograph, Springer NewYork.
- Tchiengué B. 2012. Secondary successions after shifting cultivation in a dense tropical forest of southern Cameroon (Central Africa). Thèse de docteur de Johann Wolfgang Goethe University, Frankfurt.
- Tchouto G.P.M. 2004. Plant diversity in Central African rain forest: implication for biodiversity conservation in Cameroon. PhD Thesis, Departement of Plant Sciences, Biosystematic Group, Wageningen University.
- Tilman D. 1994. Competition and biodiversity in spatially structured habitats. *Ecology* 75 (1) : 2 - 16
- Verbeeck H., Betehndoh E., Maes W.H., Hubau W., Kearsley E., Buggenhout L., Hufkens K., Huygens D., van Acker J., Beeckman H., Mweru J.P.M., Boeckx P., Steppe K. 2014. Functional leaf trait diversity of 10 tree species in congolese secondary tropical forest. *Journal of Tropical Forest Science* 26 (3): 409 – 419
- Vroh B.T.A., Adou Yao C.Y., Kouamé D., N'Da D.H., N'Guessan K.E. 2010. Diversités Floristique et Structurale sur le Site d'une Réserve Naturelle Volontaire à Azaguié, Sud-est de la Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research* 45 (3): 411 - 421
- Vroh B.T.A., Adou Yao C.Y., Kouamé D., Kpangui K.B., Goné Bi Z.B., N'Guessan K.E. 2015. Trees species diversity and above ground biomass in three tropical forest types in Azaguié area, Côte d'Ivoire. *Global Advanced Research Journal of Plant Science* 1 (2) : 30 - 38.
- Vroh B.T.A., N'Guessan K.E., Adou Yao C.Y. 2017. Trees species diversity in perennial crops around Yapo protected forest, Côte d'Ivoire. *Journal of Horticulture and Forestry* Vol. 9(11), pp. 98-108.
- Whitmore T.C. 1998. *Tropical Rain Forests of the Far East*. Clarendon Press, Oxford.
- Zanini K.J., Bergamin R.S., Machado R.E., Pillar V.D., Müller S.C. 2014. Atlantic rain forest recovery: successional drivers of floristic and structural patterns of secondary forest in Southern Brazil. *Journal of Vegetation Science* 25 : 1056 – 1068