

THESE

Présentée devant l'ECOLE CENTRALE DE LYON

Ecole Doctorale Matériaux de Lyon

Pour obtenir le grade de DOCTEUR, spécialité Génie des Matériaux

par **Mamadou Babacar NDIAYE**

*Cotutelle internationale
entre
l'Ecole Centrale de Lyon (France)
et
l'Ecole Supérieure Polytechnique (Sénégal)*

Le recyclage de métaux d'origine industrielle au Sénégal

Thèse soutenue le 3 novembre 2006 devant l'Ecole Centrale de Lyon

Composition du jury

Président :

Y. QUERE Professeur émérite, Ecole Polytechnique, Membre de l'Académie des Sciences, Paris

Rapporteurs :

A.C. BEYE Professeur, Université Cheikh Anta Diop, Dakar

T. BRETHERAU Directeur de recherche, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, Paris

Examineurs :

S. BEC Chargée de recherche, Ecole Centrale de Lyon, Ecully

I.K. CISSE Professeur, Ecole Supérieure Polytechnique, Thiès

B. COQUILLET Maître de conférences, Ecole Centrale de Lyon, Ecully

F. NIANG Maître assistant, Ecole Supérieure Polytechnique, Thiès

Y. QUERE Professeur émérite, Ecole Polytechnique, Membre de l'Académie des Sciences, Paris

A. SALL Directeur, Direction de l'Enseignement Élémentaire, Ministère de l'Education, Dakar

Invités :

J. M. GEORGES Professeur émérite, Ecole Centrale de Lyon, Ecully

R. MIDOL Inspectrice de l'Education Nationale honoraire, Innopôle, Vaulx en Velin

Remerciements

Tout d'abord je rends grâce à Dieu, pour la santé qu'il m'a accordée lors de ces années de travail et à mes parents pour les sacrifices auxquels ils ont consenti pour la poursuite de mes études.

Ce travail a été réalisé en cotutelle entre le Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes « LTDS » de l'Ecole Centrale de Lyon et le Laboratoire de Matériaux, Mécanique et Hydraulique « LMMH » de l'Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar.

J'exprime toute ma gratitude et mes sincères remerciements à mes tuteurs. Nos rapports ont dépassé le cadre strictement professionnel. Une véritable amitié est née au cours de ces trois années de collaboration, je les porterai à jamais dans mon cœur. Grand merci donc à :

Madame Sandrine BEC (LTDS) pour son soutien, ses conseils, sa pertinence scientifique et pédagogique et sa disponibilité.

Monsieur Bernard COQUILLET (LTDS), pour sa présence, ses conseils, sa patience et sa très grande compétence scientifique.

Monsieur Ibrahima Khalil CISSE (LMMH), pour m'avoir accueilli dans son laboratoire mais aussi pour avoir proposé ma candidature pour ce travail qu'il a suivi avec beaucoup d'intérêt.

Au-delà de mes tuteurs, j'aimerais également remercier des personnes sans qui cette thèse n'aurait pas vu le jour.

Monsieur Jean Marie GEORGES (LTDS) dont j'ai beaucoup apprécié les conseils, qui a proposé et suivi en partie ce travail.

Madame Renée MIDOL (INNOPOLE) qui a co-proposé ce travail avec M. GEORGES, pour son sens de l'écoute, mais surtout pour sa clairvoyance et sa grande expérience de la pédagogie.

Monsieur Mouhamadou Aly SALL (Directeur de l'Enseignement Élémentaire du Sénégal), pour avoir accepté de participer à ce projet qu'il a aussi suivi. Il a également mis en œuvre le fruit de ce travail dans les écoles sénégalaises dans le cadre de la rénovation de l'enseignement des sciences.

Je remercie beaucoup également plusieurs autres personnes qui ont permis à notre projet d'être réalisé :

M. Youssoupha THIOMBANE président de l'association des fondeurs du Sénégal, pour sa disponibilité, son aide et sa participation active à l'analyse du procédé de valorisation des déchets d'aluminium et de la qualité des produits finis.

M. Aliou NIANI administrateur de la SOSETRA, pour sa participation active à l'analyse du procédé de valorisation des déchets d'acier et de la qualité des produits finis.

M. Alioune Badara NDOYE responsable « QUALITE » de la SOSETRA, pour sa disponibilité et sa participation active à l'analyse du procédé de valorisation des déchets d'acier et de la qualité des produits finis.

M. Philippe KAPSA, (LTDS), Directeur de mon laboratoire d'accueil pour m'avoir accueilli et intégré à son équipe.

M. Daniel TREHEUX (LTDS), Directeur de mon département d'accueil pour m'avoir intégré à son équipe.

M. Abdoulaye MBODJ (Direction de l'Enseignement Élémentaire du Sénégal), pour son aide et ses conseils lors de notre travail avec les écoles élémentaires sénégalaises.

M. Nicolas POUSSIELGUE (coopération française au Sénégal), pour son soutien logistique et ses conseils lors de notre travail avec les écoles élémentaires sénégalaises.

M. Alain CREDEVILLE (coopération française au Sénégal), pour sa disponibilité et son soutien lors de notre travail avec les écoles élémentaires sénégalaises.

M. NDIAYE (Directeur de l'école médina Gounass, Guédiawaye), pour m'avoir accueilli dans son établissement.

Mme DIOP (Directrice de l'école Point E II à Dakar), pour avoir accepté de participer avec son école à la réalisation de ce projet.

M. NOVELLA (Directeur de l'école des Sablons, Décines) pour m'avoir intégré au dispositif de mise en œuvre de la main à la pâte dans son école.

M. SEGUY (Directeur de l'école Henry WALLON, Vaulx en Velin) pour m'avoir permis de suivre la mise en œuvre de module pédagogique dans son établissement.

Mme Oulimata AW (enseignante à l'école Médina Gounass, Guédiawaye) et ses élèves pour leur participation active à la mise en œuvre de notre module pédagogique.

M. THIOBANE (enseignant à l'école Point E II, Dakar) et ses élèves pour leur contribution à la mise en œuvre de notre module pédagogique.

M. Christophe MANTE (enseignant à l'école Henry WALLON, Vaulx en Velin) et ses élèves pour m'avoir permis de suivre la mise en œuvre de modules pédagogiques dans une classe française.

Mme Monique SANIA (enseignante à l'école des Sablons, Décines) et ses élèves pour leur participation à mon initiation à « La main à la pâte », mais aussi pour leur collaboration à la mise en œuvre de notre module pédagogique.

Mme Nicole ROCHON (responsable des sciences à l'école des Sablons, Décines) pour son aide lors de la mise en œuvre de notre module.

M. LANICOT (lycée H. Guimard) pour sa disponibilité et pour l'aide qu'il nous a apportée.

Mme Christelle GUERRET (LTDS) pour sa disponibilité lors de la correction du manuscrit.

M. Alain MIDOL pour ses conseils et les corrections qu'il a apportées au manuscrit.

M. René GARASSINO (association INNOPOLE, Vaulx en Velin) pour ses conseils et son soutien lors de la rédaction du manuscrit.

M. MBAYE (artisan fondeur d'aluminium à Colobane, Dakar) pour son aide lors de l'analyse de la qualité des produits issus de la valorisation des déchets d'aluminium.

M. Lamine SAGNA (artisan fondeur d'aluminium à Colobane, Dakar) pour l'aide qu'il m'a apportée pour l'analyse de la qualité des produits issus du recyclage des déchets d'aluminium.

M. Hassan ZAHOUANI pour son soutien et l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

M. Roberto VARGIOLU pour son aide et sa compétence en mesures topographiques de surface.

Mme Denyse JUVE pour ses conseils et ses encouragements tout le long de ces trois années.

M. Jean Michel VERNET pour sa joie de vivre, son hospitalité et ses conseils tout au long de ces années.

L'ensemble du personnel et des étudiants du LTDS pour tous leurs conseils et leur convivialité pendant toute la durée de ma thèse.

Je remercie également monsieur QUERE pour avoir accepté d'être le président de mon jury, messieurs BEYE et BRETHERAU pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant d'en être les rapporteurs. Je remercie également messieurs NIANG, SALL et GEORGES ainsi que Mme MIDOL pour avoir apporté leurs connaissances scientifiques et pédagogiques pour apprécier ce travail en acceptant de faire partie du jury.

Des remerciements spéciaux vont à :

La famille COQUILLET à Champagne au Mont d'Or pour son hospitalité et son amitié. Soyez assurés de ma profonde gratitude. Je vous remercie également pour m'avoir fait découvrir les charmes de la montagne française aussi bien en été (balade en forêt, VTT, etc.) qu'en hiver (ski alpin).

La famille BEC à Sainte Consorce pour son hospitalité, son amitié et pour les nombreuses excursions auxquelles elle m'a convié pour découvrir les richesses de la région lyonnaise. Merci aussi pour cette inoubliable journée de ski à Saint-Pierre de Chartreuse.

La famille MIDOL à Charly pour son hospitalité, son amitié, pour les nombreuses visites des beautés de la région lyonnaise mais également pour avoir organisé et assuré ma visite guidée d'une semaine sur la Côte d'Azur.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes parents, Khady FALL et Pierre NDIAYE, pour leurs prières, leurs conseils, leur présence et les sacrifices auxquels ils ont consenti pour l'éducation de leurs enfants.

Ma grand-mère Seynabou DIOP, que j'aime de tout mon cœur, pour ses prières et son soutien permanent. Elle restera à jamais dans mon cœur.

Mes défunts grands-pères Soulèye NDIAYE et Mademba DIOP et ma défunte grand-mère Penda NDIAYE, trop tôt arrachés à notre affection, que la terre leur soit légère.

A mon regretté frère Aboubacar GUEYE, que nous aimons beaucoup et qui nous a quitté sans crier gare à la suite d'une courte crise de paludisme, que Dieu l'accueille dans son paradis.

A mes frères (René, Mademba, Daouda, Ngala) et sœurs (Astou, Marie Louise, Bineta, Ndèye Fatou, Penda) que j'affectionne profondément. Merci pour cet attachement au sens de la famille.

A mes amis et plus que frères (Cheikh NDAO, Moussa Gueye, Dame Diagne, Awenko Diedhiou, Chérif Cissé et Assane Diallo), à leur famille et à tous les membres du GNP (Zeum ba gueleum, wala ?).

A toutes mes familles NDAO, GUEYE, NDIAYE, DIOP et FALL (oncles, tantes, grands-pères et grands-mères, cousins et cousines) de Dakar, Thiès et Saint-Louis.

Et tout particulièrement à Marie Ibrahima Sy pour son amour et sa présence à mes côtés depuis toutes ces années. Et à travers elle toute sa famille, pour leur gentillesse et leur attachement à mon égard.

SOMMAIRE GENERAL

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Contexte et problèmes associés au recyclage des métaux au Sénégal	5
Introduction	6
I Le cycle de vie des matériaux et des objets.....	6
II Les déchets.....	8
III La transformation des déchets	13
Conclusion.....	23
Chapitre 2 : Valorisation des déchets d'acier au Sénégal.....	25
Introduction	26
I Cahier des charges des armatures à haute adhérence pour béton armé.....	27
II Fabrication des armatures pour béton armé au Sénégal.....	31
III Méthodes expérimentales	33
IV Résultats expérimentaux.....	35
V Discussion et synthèse des résultats	55
Conclusion.....	62
Chapitre 3 : Transformation des déchets d'aluminium au Sénégal	63
Introduction	64
I Pratique artisanale de la fonderie au Sénégal.....	65
II Étude bibliographique.....	76
III Étude de la qualité métallurgique des alliages artisanaux	78
IV Résistance à la corrosion en milieu culinaire	91
V Discussion.....	109
Conclusion.....	113
Chapitre 4 : La question éducative dans la problématique de l'environnement au Sénégal.....	117
Introduction	118
I La démarche pédagogique.....	119
II Contexte de la mise en place de la méthode « La main à la pâte » au Sénégal.....	123
III Création du module sur les déchets	125
Conclusion.....	132
Le module : Une nouvelle vie pour les déchets.....	133
Conclusion générale	135
Annexes	141

INTRODUCTION GENERALE

La préservation de l'environnement et ses nombreux enjeux socio-économiques occupent une grande place dans les défis de ce siècle. L'incessante croissance de la production entraîne une baisse des niveaux des réserves naturelles de matières premières et génère une grande quantité de déchets. En plus du problème environnemental, la gestion de ces déchets pose une question plus globale ayant trait au comportement et au mode de vie de la société et sa réponse passe en particulier par l'éducation des jeunes enfants afin de faire naître un comportement citoyen responsable face à l'accumulation des déchets et à leur devenir.

Concrètement, pour répondre au problème posé par la diversité et la quantité des déchets, leur valorisation par une réintroduction dans le circuit normal de production, autrement dit leur recyclage, est une solution qui a été adoptée autant par les pays développés que par ceux en voie de développement comme le Sénégal. Dans ce pays, les déchets les plus valorisés en termes de quantité sont les métaux, en particulier l'acier et l'aluminium.

Cette thèse, réalisée en cotutelle entre l'École Supérieure Polytechnique de Dakar (ESP) et l'École Centrale de Lyon (ECL), s'intéresse au problème du recyclage de ces métaux au Sénégal, depuis la production du déchet jusqu'à la qualité du produit issu de sa valorisation, tout en interagissant directement, à plusieurs niveaux, avec les principaux acteurs sur le terrain : entreprise de valorisation industrielle ou artisans fondeurs du secteur informel, consommateurs, Direction de l'Artisanat et organisation non gouvernementale mais aussi Direction de l'Enseignement Élémentaire. L'originalité de cette recherche tient au fait qu'elle intègre l'ensemble des préoccupations allant du traitement du déchet à l'éducation des populations tout en restant centrée sur une problématique scientifique. Plusieurs protagonistes interagissent ainsi plus ou moins directement avec elle :

i) La Société Sénégalaise de Transformation (SOSETRA)

Elle est située au km 24 sur la route de Rufisque. C'est la seule entreprise de sidérurgie qui valorise les déchets d'acier au Sénégal. Par un processus complètement industrialisé, elle produit des armatures pour béton armé dont la qualité est décriée par certains clients et utilisateurs d'après lesquels la sécurité des ouvrages du génie civil utilisant ces produits serait en jeu. Un projet majeur de cette société vise donc l'amélioration de la qualité de son produit fini.

ii) Les consommateurs sénégalais

A travers une association, les consommateurs posent le problème de la qualité alimentaire des ustensiles de cuisine fabriqués avec de l'aluminium recyclé. Cette association a par exemple produit une émission à la télévision nationale (diffusée le 18 janvier 2006) pour sensibiliser la population sur les conditions de fabrication des ustensiles de cuisines et attirer ainsi leur attention sur la qualité alimentaire de tels produits. Depuis, l'opinion souhaite être fixée sur leur nocivité.

iii) La Direction de l'Artisanat du Sénégal

A travers un projet (réf : AG/DCE/mn/20030429-018) réalisé en partenariat avec l'Agence Intergouvernementale de la Francophonie (A.I.F.), et le Centre Technique Industriel de la Fonderie (C.T.I.F.), la Direction de l'Artisanat travaille à une réorganisation et une modernisation de la filière de

valorisation des déchets d'aluminium. Ce projet a pour objectif l'amélioration de la productivité et de la qualité des produits finis. Cette action est donc essentiellement orientée vers les artisans fondeurs d'aluminium qui développent un savoir-faire remarquable pour valoriser ces déchets en ustensiles culinaires.

iv) ECOPOLE

C'est une structure de l'organisation non gouvernementale Environnement Développement et Action (ENDA). Elle offre une éducation alternative aux plus démunis tout en œuvrant pour leur développement communautaire. Elle a un rôle fondamental dans le projet initié par la Direction de l'Artisanat et ses partenaires puisqu'elle s'intéresse aux récupérateurs des décharges publiques, principaux acteurs de la collecte des déchets valorisables. Cette collecte doit se faire sur des bases scientifiques claires et c'est une de ses préoccupations.

v) La Direction de l'Enseignement Élémentaire du Sénégal (D.E.E.)

Elle est actuellement engagée dans une rénovation de l'enseignement des sciences à l'école élémentaire. Ce grand défi est intégré par le Ministère de l'Éducation Nationale (M.E.N.) dans un projet de rénovation qui couvre tout le système éducatif : de l'enseignement préscolaire au supérieur. La création, dans le cadre de cette thèse, d'un module scientifique sur le thème du recyclage, s'inscrit dans ce projet de rénovation tout en contribuant à l'éducation des enfants au respect et à la protection de l'environnement.

Grâce aux résultats de nos travaux de recherche et aux interactions de ces projets avec notre travail de thèse, les résultats profiteront, à des degrés différents, à tous les acteurs de la filière recyclage au Sénégal.

Une évaluation de la qualité des produits finis et de leur processus d'élaboration permettra d'identifier des causes possibles aux problèmes dénoncés sur les armatures pour béton armé de la SOSETRA et de proposer à cette dernière des solutions adaptées pour les résoudre.

Une analyse des propriétés mécaniques et de la résistance à la corrosion en milieu culinaire des ustensiles de cuisine en aluminium recyclé, croisée avec les résultats obtenus sur un échantillon industriel témoin certifié, permettront de définir leur degré de qualité aussi bien au niveau de la métallurgie que de la conformité aux normes européennes en vigueur relatives aux alliages d'aluminium en contact avec des denrées alimentaires. Nous fournirons ainsi des éléments de réponse à la question posée par l'opinion sénégalaise sur la nocivité de ces produits.

Les résultats issus du travail effectué pour évaluer la filière de mise en valeur des déchets d'aluminium et la qualité métallurgique et alimentaire de ses produits finis pourront aussi être utilisés pour servir de base scientifique au tri qui sera effectué sur les déchets d'aluminium dans le cadre du projet de la Direction de l'Artisanat et de ses partenaires (A.I.F. et C.T.I.F.).

Ces résultats pourront aussi être mis à profit pour améliorer la qualité de la collecte effectuée par les récupérateurs de déchets valorisables dans les décharges publiques dont s'occupe ECOPOLE dans le cadre de son projet avec la Direction de l'Artisanat.

Ils pourront enfin contribuer à l'éducation de la population pour l'émergence d'une nouvelle génération de citoyens plus responsables et plus respectueux de la nature. En effet, en relation avec la

D.E.E., nous avons élaboré un module d'enseignement des sciences pour l'école primaire dont le sujet traite de la protection de l'environnement et de la valorisation des déchets. Ce sujet s'appuie en particulier sur la technique de fonderie, ce qui permet aussi une sensibilisation des enfants à l'artisanat.

Cette thèse sur le recyclage des métaux au Sénégal a vu le jour à la suite d'un partenariat mis en place au Sénégal entre l'École Supérieure Polytechnique (E.S.P.) de Dakar et la D.E.E., grâce à l'appui de l'association INNOPÔLE et l'École Centrale de Lyon (ECL). Elle est ainsi le fruit d'une collaboration nord-sud à quatre parties, impliquant deux pays et leurs communautés scientifiques et pédagogiques (voir annexe I-1 : historique du partenariat entre l'École Centrale de Lyon, l'inspection de Vaulx en Velin et INNOPÔLE, l'École Supérieure Polytechnique de Dakar et la Direction de l'Enseignement Élémentaire du Sénégal).

Elle intègre, avec l'approche que nous lui avons donnée, plusieurs actions en interconnexions ainsi que différents acteurs et outils qui permettent de les réaliser (figure introductive).

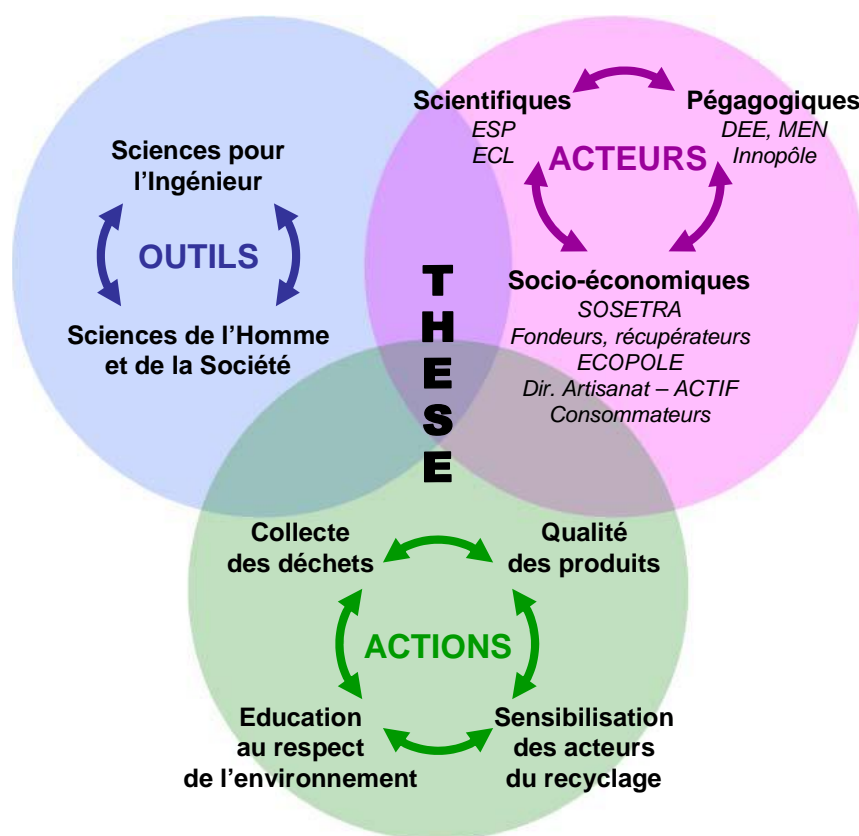


Figure introductive : Interactions entre les acteurs, les outils et les actions de la thèse.

Cette recherche pose ainsi un problème plus global, celui de la protection de l'environnement et du développement durable, idée lancée depuis la conférence de Rio en 1992¹. Ainsi, une des visées innovantes de cette thèse est d'adopter une approche du recyclage des métaux qui s'inscrive dans la globalité et la complexité du problème de l'environnement et du développement durable en intégrant, dans une même problématique, les Sciences de l'Ingénieur et les Sciences de l'Homme et de la Société. Les Sciences de l'Ingénieur sont mobilisées pour identifier les problèmes liés à la qualité des produits

¹ Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement, Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement : Sommet planète terre, Rio de Janeiro Brésil 3-14 juin 1992.

recyclés. Mais la résolution durable de ces problèmes nécessite conjointement avec les Sciences de l'Ingénieur, la mobilisation des Sciences Humaines et Sociales pour contribuer à la fois à une évolution adaptée, par le biais d'une éducation citoyenne, des conduites et des usages, et à une amélioration de la qualité des produits. C'est ainsi que cette coopération entre les Sciences de l'Ingénieur et les Sciences Humaines et Sociales va se réinvestir dans la question éducative et pose donc l'éducation comme enjeu majeur et clé du développement durable. Cette association entre l'éducation et le développement durable est d'ailleurs préconisée par l'UNESCO depuis le congrès (ECO-ED) tenu au Canada dans le sillage de la conférence de Rio².

L'intérêt des différentes parties impliquées dans le recyclage de l'acier et de l'aluminium au Sénégal, ainsi que le rôle joué par la thèse en tant que point de convergence de plusieurs de leurs préoccupations, légitime ainsi largement le choix d'un tel sujet et l'approche que nous avons choisie pour le traiter.

Tous ces problèmes seront étudiés grâce :

- aux enquêtes menées sur le terrain auprès du monde éducatif et auprès des fabricants et des utilisateurs des produits issus du recyclage de l'acier et de l'aluminium ;
- aux expériences menées en laboratoire mais aussi en classe avec les enfants ;
- à une grande coopération scientifique et pédagogique Nord-Sud, Élémentaire-Supérieur et scolaire-non scolaire.

Le traitement de l'ensemble du sujet se fera en 4 chapitres.

La présentation du contexte environnemental ainsi que l'état des lieux de la chaîne de valorisation des déchets métalliques au Sénégal et des problèmes de qualité qui en découlent feront l'objet du premier chapitre.

Puis dans les chapitres 2 et 3, qui traitent respectivement du recyclage de l'acier et de l'aluminium, nous verrons en détail le processus de valorisation afin de déceler les causes des problèmes qui ont été relevés. Une grande partie de chacun de ces deux chapitres sera consacrée à l'évaluation de la qualité des produits finis, grâce à une analyse complète et une confrontation des propriétés du produit formé avec son cahier des charges et avec les normes en vigueur dans son domaine. Nous déterminerons ainsi les dangers potentiels qu'ils peuvent présenter lors de leur utilisation dans leur milieu respectif (milieu du génie civil pour les armatures pour béton armé et milieu alimentaire pour les ustensiles de cuisine). Les conclusions qui seront tirées sur la qualité des produits finis permettront de proposer des solutions adaptées aux spécificités de chaque secteur.

Enfin, le quatrième chapitre concrétisera l'aspect éducatif de la réponse à la question environnementale de la gestion des déchets en proposant un outil pédagogique, réalisé en accord avec la D.E.E. et visant à faire naître chez les jeunes enfants de nouveaux comportements citoyens face aux problèmes des déchets. Mais avant de présenter ce document, nous parlerons de la mise en place de l'investigation raisonnée au Sénégal et du processus de création du module scientifique

² F. MAYOR, *allocution d'ouverture du Congrès mondial sur l'éducation et la communication en matière d'environnement et de développement (ECO-ED): "L'éducation au service d'un développement durable, relever le défi de Rio"*, Toronto, Canada, 17 Octobre 1992.

Chapitre 1

CONTEXTE ET PROBLEMES ASSOCIES AU RECYCLAGE DES METAUX AU SENEGAL

SOMMAIRE

Introduction	6
I Le cycle de vie des matériaux et des objets	6
II Les déchets	8
III La transformation des déchets	13
III-1 Un point de vocabulaire	13
III-2 Les enjeux du recyclage	14
III-3 Le recyclage des métaux d'origine industrielle	15
III-3-1 Le recyclage des métaux dans les pays à fort potentiel technologique	15
III-3-2 Le recyclage des métaux au Sénégal	19
Conclusion	23

Introduction

L'accroissement de la population sur la planète et l'augmentation générale du niveau de vie moyen des habitants entraînent une augmentation de la production des biens de consommation, engendrant parallèlement un flux de déchets de plus en plus important. Par exemple chaque parisien se débarrassait quotidiennement de 200 g d'ordures en 1872, de 700 g en 1922 et de 1,6 kg en 1994³. L'accumulation de ces déchets, dont la durée de vie peut atteindre plusieurs milliers d'années, pose de grands problèmes à nos sociétés de consommation car ces derniers polluent l'environnement et occasionnellement créent des dégâts dans les milieux vivants.

Par ailleurs, cette activité débordante de production consomme des ressources naturelles et de l'énergie et met donc en danger l'économie de certains pays.

Depuis une quinzaine d'années, une prise de conscience générale a permis le développement de concepts de gestion et de politiques orientés vers la protection de l'environnement et des ressources naturelles. Dans ces politiques, le recyclage tient une place importante.

Dans les pays défavorisés où les habitants peuvent jeter jusqu'à 600 g d'ordures par jour, le recyclage est une pratique courante qui fait vivre ou survivre bon nombre d'individus au sein d'un secteur dit informel car non contrôlé et non maîtrisé.

Le Sénégal, qui figure parmi les pays d'Afrique les plus industrialisés, n'échappe pas à la règle. Grand nombre d'objets issus de l'importation suivent des parcours variés au cours de leur vie pour finir à l'état de déchet. Pour certains d'entre eux, une nouvelle vie commence entre les mains de fondeurs artisanaux ou industriels. C'est le cas des déchets d'aluminium et d'acier que l'on trouve en quantité suffisante dans le pays.

Compte tenu du manque de moyens déployés dans cette activité par les opérateurs locaux, se pose le problème de la qualité des objets issus de cette chaîne de transformation, problème auquel nous voulons apporter notre contribution.

Notre objectif, dans ce premier chapitre, est de situer le recyclage dans son contexte politique, environnemental, économique, social et technique et de faire une photographie de cette activité telle qu'elle est pratiquée au Sénégal. Dans cette description, une comparaison sera faite avec les pratiques connues dans les pays plus avancés sur le plan technologique.

I Le cycle de vie des matériaux et des objets

La problématique à laquelle nous nous intéressons dans ce travail intègre des composantes scientifiques, techniques, environnementales et éducatives. Aussi, avant de développer les différents aspects de cette problématique, nous avons jugé intéressant de rappeler les étapes de la vie des matériaux et des objets pour introduire les fondements et le contexte de notre étude. C'est ce que les

³ C. DE SILGUY dans *L'histoire des hommes et de leurs ordures du moyen âge à nos jours*, Le Cherche Midi éditeur, Paris (1996).

ouvrages et les auteurs désignent par « cycle de vie des matériaux » (figure 1-1).

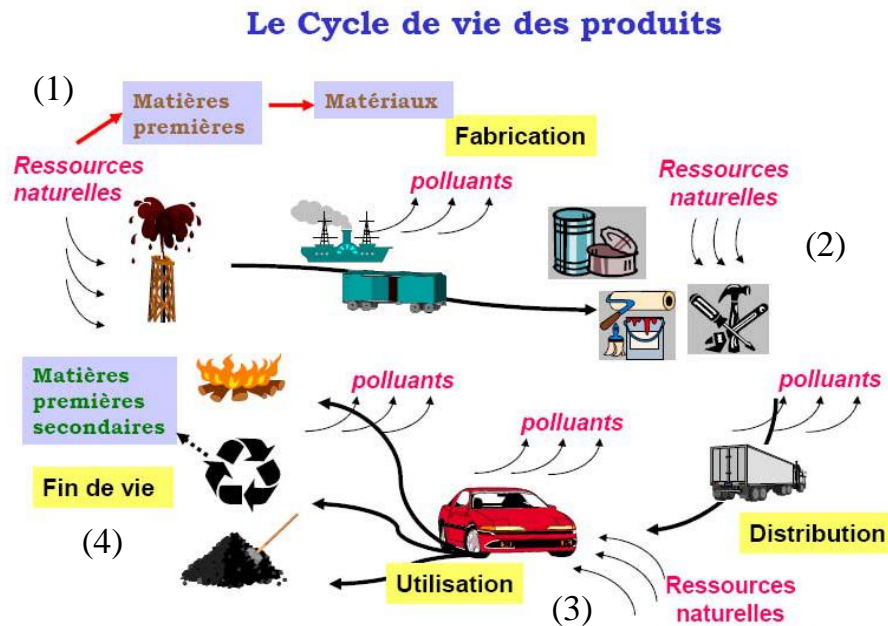


Figure 1-1 : Le cycle de vie des produits⁴.

La vie d'un matériau ou d'un objet se déroule suivant 4 grandes étapes (figure 1-1) :

1. production / élaboration du matériau à partir de la matière première puisée initialement dans les ressources naturelles ;
2. fabrication d'objets par transformation du matériau ;
3. utilisation de l'objet ;
4. fin de vie de l'objet.

Cette dernière étape intervient lorsque l'objet ne remplit plus les fonctions pour lesquelles il a été créé, ou encore parce que son propriétaire en a décidé ainsi.

L'objet devient alors un déchet (nous donnerons plus loin la définition de ce terme), dont l'existence peut suivre trois voies :

- stockage, dans le meilleur des cas sur des aires aménagées , ou bien abandon dans la nature ;
 - incinération pour en extraire son énergie ou pour réduire son encombrement ;
 - réintroduction dans la chaîne de production des matériaux et nouvelle transformation en objet.
- Cette dernière alternative est nommée par le terme générique de « recyclage ».

Ainsi est bouclé le cycle de vie du matériau, de sa naissance à sa renaissance. Et par la « magie » du recyclage, une boîte de conserve alimentaire peut se retrouver dans le fuselage d'un avion ou encore dans une marmite au Sénégal.

⁴ J.C. PREVOT et C. HOCQUARD, Présentation à un séminaire de l'Agence Rhône-Alpes pour la maîtrise des matériaux : "Matériaux et matières premières : développement du recyclage ou pénurie durable" Serrières, France 24 Mars 2006.

L'étude que nous avons menée se situe précisément à ce niveau du cycle, entre le moment où l'objet ne sert plus et celui où il retrouve une nouvelle fonction.

Tout au long de ce cycle, de l'énergie et des matières sont consommées. De la chaleur et des effluents gazeux, liquides, solides sont produits, parmi lesquels peuvent se trouver des matières polluantes voire toxiques. Ainsi donc, le travail et l'usage de la matière placent l'activité humaine de fabrication au carrefour entre plusieurs problématiques qu'il faut obligatoirement prendre en compte dans une perspective de développement durable rendue nécessaire par la croissance démographique et par la progression constante du niveau moyen de consommation des habitants de la planète. Ce sont plus particulièrement :

- la santé publique ;
- la gestion de l'environnement ;
- l'épuisement des ressources naturelles ;
- la gestion des déchets ;
- l'éducation ;
- la sécurité / qualité.

Ce sont les aspects « santé publique » et « sécurité / qualité » en rapport avec l'utilisation de l'aluminium et de l'acier recyclés, que nous avons développés dans la partie scientifique de notre étude. Ils sont ensuite mis en relation avec l'éducation et la diffusion des connaissances par l'intermédiaire des Sciences Humaines et Sociales grâce à notre action d'éducation scientifique citoyenne à l'école élémentaire sénégalaise.

II Les déchets

Qu'est-ce qu'un déchet ? A partir de quand un objet entre-t-il dans la catégorie des déchets ? A qui appartiennent les déchets ? Un déchet a-t-il de la valeur ? Que fait-on des déchets ? Voilà les questions auxquelles nous allons apporter une réponse en préambule à notre étude.

Les enfants à qui l'on demande ce que sont les déchets répondent la plupart du temps : « ce sont des choses dont nous n'avons plus besoin ».

Le petit Robert donne la définition suivante : « partie d'une matière rejetée car inutilisable ou inconsommable ».

Comme on le voit, le statut de déchet pour un objet est associé à celui de son abandon mais l'impossibilité de rendre le service attendu est le motif le plus souvent évoqué, qu'il soit justifié ou non.

Une autre question vient immédiatement à l'esprit : « que fait-on des déchets ? ». Car le problème se situe bien à ce niveau et se pose de façon d'autant plus aiguë que la quantité des déchets augmente continuellement.

Les pays à fort niveau de consommation ou de production ont été les premiers à se trouver confrontés au problème, car l'accumulation des déchets occasionnait des nuisances insupportables :

pollutions diverses, problèmes de santé publique, etc. La métallurgie de l'aluminium, que nous citons à titre d'exemple, illustre clairement ce propos. Le traitement d'une tonne de bauxite (minerai d'aluminium) entraîne la production de 4 tonnes de boues rouges rendues toxiques par la soude utilisée lors du traitement du minerai. L'émission de produits fluorés lors de l'électrolyse de l'alumine occasionne des dommages importants sur la flore, la faune environnante et sur les populations⁵. Les pays émergents ou en voie de développement se trouvent maintenant confrontés aux mêmes difficultés.

Les problèmes environnementaux relevant du domaine public, les gouvernements des états concernés ont élaboré des lois destinées à protéger l'environnement. Quatre sujets importants sont alors abordés :

- la définition de la notion de déchet ;
- le propriétaire des déchets ;
- le devenir des déchets ;
- le traitement des déchets.

En France et en Europe, les déchets sont définis de la façon suivante :

- « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon »⁶ ;
- « toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire »⁷.

Au Sénégal, le code de l'environnement dans son article L2 du chapitre I donne la définition suivante des déchets : « toute substance solide, liquide, gazeuse, ou résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation de toutes autres substances éliminées en vertu des lois et règlements en vigueur »⁸.

Les déchets ont-ils tous le même impact sur l'environnement ? Non, bien évidemment. La boîte de conserve vide n'a pas du tout le même impact que le déchet nucléaire sur notre environnement. Les déchets ont donc été regroupés dans plusieurs catégories, respectant des critères propres à leur mode de traitement :

- l'origine (déchets agricoles, industriels, urbains) ;
- la dangerosité (déchets inertes, banals, dangereux) ;
- la nature (déchets organiques etc.).

⁵ www.econso.be/IMG/pdf/fc54_aluminium.pdf.

⁶ *Code de l'environnement français, livre V: les déchets, titre IV, chap 1, section 1, Article L541-1 (II) décret n° 2005-935 du 2 août 2005.*

⁷ *Directive cadre européenne 91/156/CEE du 18/03/91, Article 1, (1-a).*

⁸ *Code de l'environnement du Sénégal, titre I, chapitre 1, article L2 (6) décret 2001-282 du 12 avril 2001.*

La réglementation européenne établit une classification sous forme de liste unique contenant 20 catégories, qui s'appuie sur la dangerosité des produits⁹, alors que la législation sénégalaise est fondée sur le caractère nocif des déchets vis à vis de l'environnement.

Pour terminer cette classification, le code de l'environnement en vigueur en France définit une classe de déchets ultimes composée de « l'ensemble des déchets résultant ou non du traitement d'un déchet qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux »¹⁰.

Qui est propriétaire du déchet ? Que fait-on des déchets ? Comment peut-on produire moins de déchets ? Nous rentrons ici dans la problématique de la gestion des déchets avec son corollaire financier. Car la question indirectement posée est celle de savoir qui va financer le devenir des déchets.

Cette problématique repose sur un constat : dans nos sociétés de consommation, chacun reste propriétaire des produits en sa possession jusqu'au moment où il décide de les abandonner. A partir du moment où ces objets sont considérés comme des déchets, leurs propriétaires ne se sentent plus concernés par leurs devenir, à tel point qu'ils peuvent être abandonnés sur les trottoirs, les bords des routes ou des rivières.

Face à l'accumulation des déchets de toutes natures, consécutive à cette réaction « naturelle » mais irresponsable, les pouvoirs publics ont pris position. Quels que soient les gouvernements préoccupés par le problème, la réaction est unanime : l'environnement doit être protégé tout en laissant à la société civile la possibilité de se développer. Il en résulte que le propriétaire du déchet doit assurer son traitement et son élimination par des filières reconnues et agréées par les pouvoirs publics. Ainsi, les notions de protection de l'environnement et de développement sont étroitement liées.

Mais comment concilier ces deux aspects à première vue contradictoires ? La solution proposée et encouragée par les gouvernements consiste à réintroduire les déchets dans le circuit de production des matériaux. C'est la voie du recyclage, préconisée notamment dans les codes de l'environnement français et sénégalais.

A coté de celle-ci, d'autres voies d'élimination des déchets sont proposées, mais constituent des solutions ultimes :

- la mise en décharge dans des lieux aménagés et surveillés ;
- l'incinération, dont on peut extraire de l'énergie.

Le recyclage présente aussi un autre avantage, et non des moindres : il permet d'économiser les ressources naturelles (matière première et énergie) dans lesquelles on puise pour fabriquer les matériaux neufs, et dont on prend conscience de la raréfaction. Ainsi, en appliquant ce principe, plusieurs objectifs fondamentaux sont atteints : la préservation des ressources naturelles, la protection de l'environnement,

⁹ Annexe II du décret n° 2002 – 540 du 18/04/2002 France.

¹⁰ Code de l'environnement français, livre V prévention des pollutions, des risques et des nuisances, titre IV les déchets, chap. 1- section 1, Article L541-1 (III) (2000).

la diminution de la quantité de déchets tout en préservant les activités de production et de consommation, piliers des économies modernes. Le respect de ces grands principes est à l'origine d'une nouvelle politique de développement : le « développement durable » (satisfaction des besoins de développement et de santé des générations présentes qui ne nuit pas à celle des générations futures)¹¹.

Dans les pays les plus avancés dans le domaine, les principes de recyclage et de valorisation deviennent une préoccupation majeure, à tel point que dès la conception d'un produit, sont intégrées les perspectives de son traitement lorsqu'il arrivera en fin de vie, c'est le principe de « l'éco-conception ». L'agrément du produit par les pouvoirs publics est conditionné par une étude d'impact environnementale. Ce dernier aspect du problème ne figure pas en tant que tel dans le code de l'environnement du Sénégal, mais la fabrication ou l'importation de tout nouveau produit sur le territoire doit quand même avoir l'agrément de l'Etat. Néanmoins le recyclage est présent dans ce pays, et est motivé principalement, comme dans la plupart des pays en voie de développement, par un besoin de survie. Les déchets métalliques en acier et en aluminium sont récoltés et transformés sur place ou exportés. Les déchets d'aluminium sont presque entièrement recyclés localement par des fondeurs artisanaux en ustensiles de cuisine tandis qu'une partie des déchets d'acier est traitée industriellement par la SOSETRA pour produire des armatures pour béton armé.

Concernant les alliages d'aluminium produits par les fondeurs sénégalais, destinés à rentrer en contact avec l'alimentation, nous n'avons pas trouvé trace dans les archives, de documents traitant de la dangerosité ou de l'innocuité des matériaux et des produits fabriqués et commercialisés localement. Par conséquent, le travail réalisé dans cette thèse peut apporter une contribution dans ce domaine en proposant des éléments de réponse aux interrogations des utilisateurs sur la sécurité alimentaire des ustensiles de cuisine produits et vendus localement. Nous signalerons à ce propos qu'un récent reportage télévisé sur la chaîne nationale sénégalaise RTS 1 (radiodiffusion télévision sénégalaise), a fait état publiquement de ce problème (émission « NAY LEER » littéralement « que ce soit clair » de l'association des consommateurs sénégalais du 18 janvier 2006).

Les armatures pour béton armé produites par la SOSETRA à partir des déchets d'acier entrent dans une problématique similaire. A part les réserves émises par certains utilisateurs quant à la qualité des ouvrages du génie civil qu'elles serviraient à fabriquer, à notre connaissance, aucune étude n'a vérifié ni proposé des voies d'amélioration de leur qualité métallurgique.

Sur un autre plan, la lecture de l'article L7 – chapitre II du code de l'environnement du Sénégal nous apprend que le gouvernement, soucieux de protéger l'environnement, garantit le droit à une « éducation sur l'environnement » pour chaque citoyen. Il incite les institutions de formation, de recherche publiques ou privées à sensibiliser les populations aux problèmes liés à la connaissance de l'environnement et à sa gestion.

Ainsi, notre travail scientifique d'étude de la qualité des produits issus du recyclage et le prolongement en direction de l'éducation citoyenne des jeunes enfants que nous avons choisi de lui

¹¹ G. H. BRUNDTLAND, rapport de la commission mondiale sur l'environnement et le développement, " Notre avenir à tous " Assemblée générale des Nations Unies 4 Août 1987.

donner, trouvent pleinement leur justification dans les directives du code de l'environnement du Sénégal.

Il est un dernier élément à prendre en considération au niveau de la gestion des déchets : celui de la valeur des déchets.

Cette notion de valeur obéit à la loi de l'offre et de la demande. Le matériau constitutif du déchet possède une valeur marchande indexée sur le cours mondial des matières premières, sujette aux fluctuations du marché et aux tensions géopolitiques du moment. De plus, le déchet constitue une réserve de matière qu'il ne sera plus utile de puiser dans les réserves naturelles mais représente aussi une réserve d'énergie.

En effet, les alliages métalliques contiennent une partie de l'énergie nécessaire à leur élaboration à partir de la matière première, c'est-à-dire le minerai. Recycler, c'est économiser voire disposer de cette énergie tout en préservant les ressources naturelles. Ainsi, une tonne d'acier recyclé économise 75% de l'énergie qu'il faudrait dépenser pour élaborer du métal neuf¹². Une tonne d'aluminium économise 95% de cette énergie¹³.

D'un autre côté, les déchets peuvent servir à produire de l'énergie telle que du méthane biologique, de la chaleur ou de l'électricité. Le méthane est produit par les déchets organiques, entre 6 et 12 mois après leur mise en décharge¹⁴. Celles-ci sont aménagées spécialement pour recueillir cet hydrocarbure d'origine non fossile. De telles décharges se développent de plus en plus en Europe, et en 1993, l'équivalent d'environ 500 000 tonnes de pétrole fut récupéré sur 200 sites principalement en Allemagne et au Royaume-Uni¹⁵.

La chaleur et l'électricité sont souvent produites ensemble par des cogénérateurs lors de l'incinération des déchets. L'utilisation de la chaleur dans un proche voisinage du lieu de production oblige l'implantation des usines de production dans des endroits à fortes densités humaines, ce qui n'est pas toujours possible. C'est pour s'affranchir de cette obligation que les nouvelles usines génèrent exclusivement de l'électricité qui est autoconsommée ou vendue aux sociétés commerciales. Par exemple, au début des années 80 à Milan, le quart de l'énergie nécessaire au métro et au tramway était fourni par cette électricité produite à partir des déchets.

Dans un système de gestion collectif des ressources énergétiques et des matières premières, le recyclage apparaît maintenant comme une solution d'avenir.

¹² Sénat français, *Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques Rapport 415, troisième partie (C-1-c)* (98-99).

¹³ Sénat français, *Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques Rapport 415, troisième partie (E-1-c)* (98-99).

¹⁴ DTI (Grande Bretagne), *energy from landfill gas* (1995).

¹⁵ A. MATUTES "The declaration of Madrid" d'après la conférence de Madrid "An action plan for renewable energies in Europe", (mars 1994).

III La transformation des déchets

III-1 Un point de vocabulaire

L'habitude est de désigner par « recyclage » toute opération visant à réintroduire des déchets dans un circuit de transformation. Toutefois, la grande diversité des situations de recyclage fait qu'un vocabulaire adapté a vu le jour.

Le « recyclage », selon l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), est la réintroduction directe d'un déchet dans le cycle de production dont il est issu, en remplacement total ou partiel d'une matière neuve.

La « valorisation », apparue pour la première fois dans les textes en 1989¹⁶, est définie par la loi française du 13 juillet 1992 comme le réemploi, le recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir de déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie¹⁷.

La « valorisation énergétique » est l'exploitation du gisement énergétique que contiennent les déchets.

Ces définitions nous permettent de conclure que la valorisation englobe ainsi plusieurs opérations, dont le recyclage, qui visent à donner de la valeur à un déchet.

Sur un plan technologique, on distingue deux situations de recyclage :

- dans la première, on réintroduit le déchet dans la chaîne de transformation pour donner un produit identique, c'est le recyclage en « boucle fermée »¹⁸ ;
- dans la seconde, la transformation conduit à la fabrication de produits différents, on parle alors de recyclage en « boucle ouverte ».

Les anglo-saxons qualifient les opérations de recyclage en intégrant la notion de valeur ou de fonctionnalité du produit élaboré par rapport à celle de l'objet initial. Par « recycling », ils désignent le procédé par lequel le déchet est transformé en un produit de même valeur. Le « downcycling » (décyclage, ou dévalorisation) est le mode de traitement suivant lequel le déchet est transformé en un produit de moindre valeur (transformation des moquettes en résine par exemple) et le « upcycling », le mode de traitement qui confère au produit une valeur supérieure au déchet (par exemple transformation des bouteilles d'eau minérale en tissu)¹⁹.

Ainsi, la réintroduction des objets arrivés en fin de vie dans un nouveau circuit de production et de distribution peut être envisagée sous différents aspects.

Nous venons de définir plusieurs termes liés à la transformation des déchets. Dans notre travail,

¹⁶ Communication de la commission européenne au conseil et au parlement européen du 18 septembre 1989 sur la stratégie communautaire en matière de gestion des déchets.

¹⁷ Loi n°92-646 du 13 juillet 1992, titre premier, Article 1, (I-3°).

¹⁸ F. HERBULOT dans *Techniques de l'Ingénieur Traité de Matériaux métalliques récupération et recyclage de l'aluminium, stratégie, dossier M 2 345* (2001).

¹⁹ W. McDONOUGH et M. BRAUNGART dans, *Remaking the way we make things*, North Point Press, (2002).

nous nous intéressons au recyclage en boucle ouverte de l'acier et de l'aluminium que nous appellerons recyclage pour faire court.

III-2 Les enjeux du recyclage

Comme nous l'avons vu précédemment, les enjeux recouvrent plusieurs aspects abordés ci-dessous.

i) Enjeux environnementaux

La protection de l'environnement constitue le fondement des politiques adoptées par les gouvernements pour gérer le contrôle de la production des biens, le devenir des déchets et la consommation des ressources naturelles et énergétiques. En effet, la préservation des ressources naturelles et la diminution de la quantité de déchets, entraînée par le recyclage, sont les principaux enjeux liés à l'environnement. Bien entendu, si l'objectif est le même au Sénégal et en Europe, les moyens disponibles pour l'atteindre diffèrent d'un pays à un autre. Par conséquent, les niveaux d'exigence contenus dans les politiques environnementales ne peuvent pas être identiques de même que les résultats enregistrés sur le terrain. Au Sénégal, l'enjeu environnemental posé par les déchets, qui intéresse peu les pouvoirs publics, n'est en général pris en compte que dans les grandes villes et leur voisinage immédiat où la prolifération des décharges sauvages, souvent accompagnée de maladies et d'une pollution de la nappe phréatique, met la population en danger. En Europe en revanche, de nombreux moyens sont mis en œuvre pour convaincre, séduire et responsabiliser les citoyens afin qu'ils s'investissent contre l'invasion des déchets pour le respect et la sauvegarde de l'environnement parce que l'expérience a prouvé l'inefficacité de la répression (lois et sanctions).

ii) Enjeux économiques

Les enjeux économiques liés au recyclage et à la valorisation des déchets découlent, comme nous l'avons vu précédemment, de l'interaction des déchets avec les ressources naturelles et énergétiques. En effet, le déchet, en tant que matériau issu de la transformation de ressources naturelles ou objet transformable en énergie, présente des intérêts économiques certains. Par exemple, recycler 1 kg d'aluminium permet d'économiser 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité²⁰. Cette énergie économisée ou produite par les déchets représente le principal enjeu économique de leur recyclage. Cet enjeu est très important pour les pays disposant de peu d'énergie et de ressources naturelles, où accroître la durée de vie du capital énergétique (valorisation énergétique) des déchets, à travers la production locale artisanale ou industrielle, permet de faire des économies sur les budgets et de développer des activités de production et de transformation génératrices d'emplois et de flux financiers. De plus, la transformation des déchets en énergie leur permet de réduire l'importation des hydrocarbures fossiles dont les prix sont en perpétuelle augmentation. Par exemple, 20% de l'énergie électrique produite au Sénégal provient de la combustion des déchets de canne à sucre et de coques d'arachide²¹.

²⁰ A. PROFILI, "The european emission trading and the aluminium sector", I.E.A. workshop Paris (sept 2005).

²¹ Ministère de l'environnement et de la protection de la nature du Sénégal, programme des nation unies pour l'environnement, projet GF/4102-92-33, inventaire des émissions de gaz à effet de serre, (juin 1994).

iii) Enjeux sociaux

Socialement le recyclage peut s'avérer intéressant avec la création d'emplois pour la collecte, le tri, la transformation des déchets ainsi que pour l'amélioration du cadre de vie des habitants. D'un autre côté, la politique environnementale qui accompagne le recyclage pose le problème de l'organisation de la société humaine en elle-même. Quel modèle de société adopter pour que chaque individu puisse vivre tout en respectant le milieu dans lequel il se trouve ? Si le respect de l'environnement se traduit par un impact financier sur la consommation des ménages, ne va-t-on pas accroître les inégalités dans la société ? Comment amener les fabricants à produire autrement, les consommateurs à acheter différemment et à avoir un comportement citoyen sans pour cela produire des inégalités et créer des frustrations ? Faut-il donner plus d'importance à l'éducation, accroître la pression sur les entreprises ?

Nous voyons que les enjeux environnementaux, économiques, sociaux sont étroitement liés aux enjeux politiques que l'on peut évaluer par la capacité des gouvernements à proposer aux citoyens des alternatives de vie respectueuses de l'environnement mais aussi par des intérêts économiques. C'est un problème difficile à résoudre car interviennent des préoccupations aux effets antagonistes nécessitant des choix et des compromis. Mais toute politique a ses limites ; il est en effet illusoire d'imposer des mesures incompatibles avec la réalité vécue sur le terrain. L'enjeu est aussi à ce niveau.

III-3 Le recyclage des métaux d'origine industrielle

Produire des objets neufs avec des objets arrivés en fin de vie, voici le défi, voire le paradoxe du recyclage.

Dans le cas des métaux auquel nous nous intéressons, le défi peut être relevé à condition que la chaîne de transformation des déchets conduise à la production d'alliages titrés. En effet, l'industrie de transformation des métaux est calibrée par l'approvisionnement en matériaux aux propriétés connues et constantes dans le temps. On sait par ailleurs que ces propriétés sont étroitement liées à la structure des matériaux et à leur composition chimique. Le niveau de qualité obtenu pour le produit fini dépend des moyens techniques mis en œuvre lors de l'élaboration, mais est aussi conditionné par l'ensemble des opérations préalables à la fusion qui est le stade ultime dans la production des nouveaux alliages. Or, l'approvisionnement en matériaux n'est pas constant en qualité dans les filières du recyclage. C'est la raison pour laquelle les produits des recyclages artisanal et industriel ont des créneaux d'utilisation très spécifiques par rapport aux matériaux neufs.

Notre étude illustrant ces deux aspects du recyclage, nous avons jugé intéressant de présenter les principes de base du recyclage des métaux dans les pays à gros moyens techniques et financiers qui constituent en quelque sorte une référence au niveau qualité de la production, avant de décrire ce qui fait la spécificité du recyclage des métaux au Sénégal.

III-3-1 Le recyclage des métaux dans les pays à fort potentiel technologique

Le recyclage des ferrailles, comme celui des déchets d'aluminium, comporte cinq phases principales (voir l'exemple de l'acier sur la figure 1-2) :

1. le tri à domicile des déchets et leur collecte ;

2. la séparation à l'usine des différents métaux ;
3. la production de métal liquide par fusion ;
4. la coulée du métal en fusion et sa solidification en produits semis finis ;
5. la transformation de ces produits semis finis en biens de consommation.

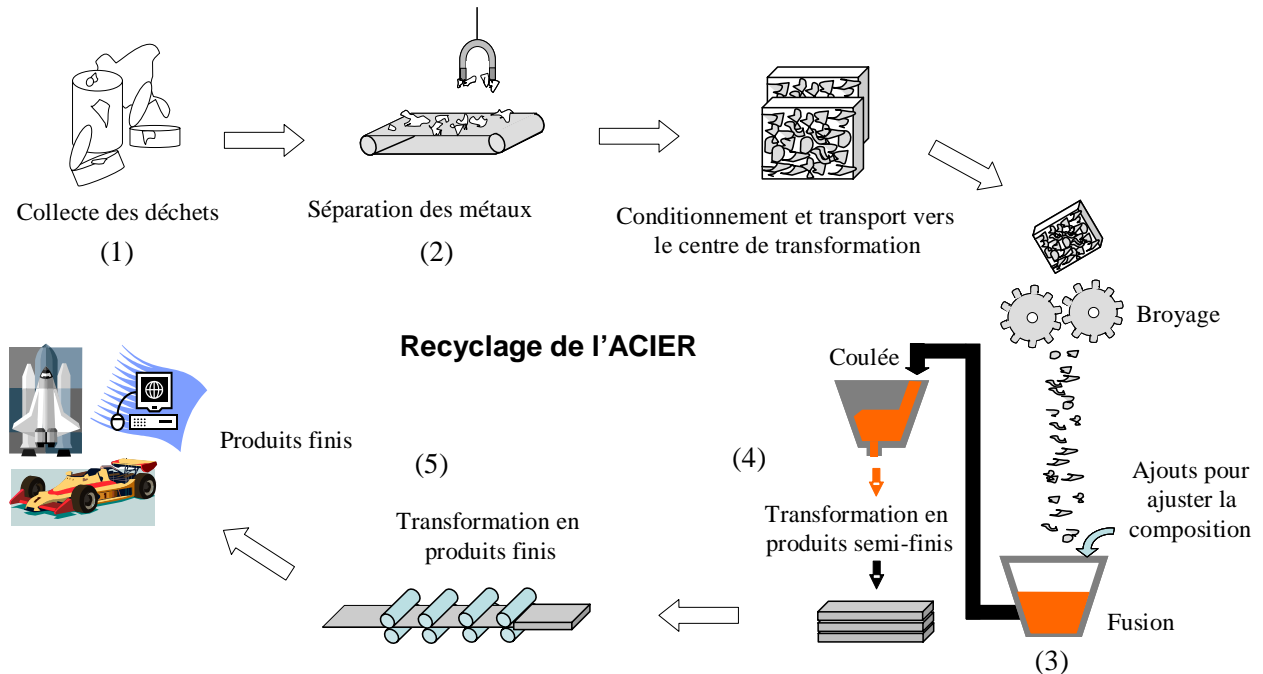


Figure 1-2 : Schéma général des différentes étapes du recyclage de l'acier.

La phase de collecte des déchets métalliques **(1)** est précédée par un tri volontaire de la population qui vise à séparer la partie métallique de l'ensemble des déchets. Ainsi dès la collecte, les déchets métalliques peuvent être entreposés dans des containers appropriés. Lorsqu'ils sont mélangés à des matières organiques ou minérales (cas des déchets urbains ou ménagers), ils sont triés manuellement et/ou par des méthodes s'appuyant sur la masse volumique ou le magnétisme. Une fois séparés des autres déchets non métalliques, ils peuvent intégrer la deuxième phase de leur traitement, la séparation des métaux.

Lors de la phase de séparation **(2)**, on cherche à différencier les alliages métalliques suivant leur composition chimique. Cet objectif n'est jamais atteint suite aux pollutions engendrées par la complexité grandissante des matériaux et des structures produites industriellement (multi-matériaux, traitements de surface, inclusions, etc.), par l'utilisation de l'objet (présence de graisses, huiles et fluides divers), et par l'extrême diversité des alliages utilisés en fabrication. On a alors recours à des méthodes de séparation de plus en plus poussées reposant sur les propriétés physiques des divers matériaux : magnétisme, masse volumique, couleur ... Le broyage et le traitement de ces déchets constituent les deux opérations clé dans cette phase de séparation.

Vient ensuite la fusion **(3)** pendant laquelle les petites particules vont se mélanger à l'état

liquide pour donner un alliage. Dans ce processus, les déchets d'acier et de fonte repartent vers l'aciérie dans laquelle le four électrique occupe une place prépondérante, voire vers le haut fourneau pour la fabrication de métal primaire. La fusion des métaux non ferreux et des alliages d'aluminium en particulier est appelée affinage. Le produit de cette transformation est le métal de deuxième fusion. L'électricité, le gaz et les hydrocarbures sont les principales sources d'énergie utilisées dans cette opération.

Pendant la fusion, la chimie de l'élaboration permet de prendre le relais sur les opérations de tri mécanique. Les conditions de marche des appareils de fusion ainsi que les additions réalisées permettent en effet « d'éliminer » certains éléments résiduels difficiles à séparer, ou de modifier la teneur des composants de l'alliage.

Les alliages finaux mis à la composition (ajouts d'éléments chimiques en rapport avec les propriétés finales visées), sont ensuite coulés sous forme de lingots **(4)**, de plaques, de barres ou encore dans des moules pour la production de pièces mécaniques (produits semis finis). L'éventail des techniques utilisées en fonderie peut être mis en œuvre ainsi que la technique de la coulée continue pour la fabrication de demi-produits en acier.

Les produits semis finis sont ensuite transformés **(5)** au moyen de techniques de mise en forme classiques (emboutissage, extrusion, laminage, etc.) pour donner des produits de consommation courants que l'on retrouve dans les moyens de transport, les appareils électroménagers, etc.

Parmi les activités de recyclage développées dans les sociétés modernes industrielles, le traitement des véhicules hors d'usage (V.H.U.) est l'une des plus importantes et performantes qui soit. Nous l'avons choisie pour illustrer nos précédents propos.

Cette activité est encadrée en France et en Europe par des lois visant à organiser la structure du traitement industriel depuis la collecte jusqu'à la mise en décharge des résidus de broyage. Ces lois fixent par ailleurs des objectifs en terme de « réemploi utile » des matières :

- la loi du 13 juillet 1992 interdit la mise en décharge des déchets industriels sans autorisation préalable (depuis 2002, les décharges ne reçoivent plus que des déchets ultimes²²) ;
- l'accord cadre signé le 10 mars 1993 entre une douzaine de constructeurs européens a fixé un objectif de 15% maximum de rejet de déchets ultimes par véhicule pour 2002²³. Cet objectif a été atteint et ce taux devrait être revu à la baisse dans un avenir proche ;
- la directive européenne 2000/53/CE a fixé pour 2006 un objectif de 80% de recyclage et de réutilisation dans le secteur de l'automobile, 85% de réutilisation et valorisation, dont 5% de valorisation énergétique. En 2015 le taux de réutilisation devrait atteindre 95%²⁴.

²² Loi française n°92-646 du 13 juillet 1992, titre premier, Article 2.

²³ ADEME, Direction de l'industrie, département de prévention et de valorisation des déchets, bilan 2000 de l'accord-cadre de 1993 sur le traitement des VHU.

²⁴ Directive 2000/53/CE du parlement européen et du conseil du 18 Septembre 2000, article 7.

En conséquence, le recyclage des V.H.U. suit plusieurs phases bien identifiées :

- stockage des véhicules sur des aires aménagées ;
- dépollution (extraction des lubrifiants, carburants, liquides de refroidissement et autres) ;
- démontage des parties utiles du véhicule pouvant être introduites dans le circuit de la consommation (pièces de rechange) ;
- broyage des véhicules ;
- séparation et tri des matériaux ;
- réintroduction des matériaux triés dans les circuits de transformation/valorisation et mise en décharge des résidus de broyage.

Les statistiques faites par Febelauto, une association belge regroupant 12 fédérations professionnelles travaillant dans le recyclage et chargée de la surveillance de l'application de la directive européenne, font apparaître les faits suivants pour l'année 2005²⁵ :

- 81% de la masse des matières provenant des V.H.U. a été réutilisée et valorisée avec récupération d'énergie dans les postes suivants : 18% a été réutilisée (pièces de rechange d'occasion), 62% a été recyclée, et 1% a été valorisée énergétiquement ;
- 19% de la masse a été incinérée ou mis en décharge.

Même si le taux de recyclage des matériaux augmente d'année en année, ce dernier présente quelques limites.

Le recyclage industriel nécessite des moyens importants et coûteux. Le taux de valorisation des déchets métalliques est donc étroitement lié aux moyens consacrés à cette opération. Il est donc naturel que les meilleures performances du recyclage soient obtenues dans les pays à plus fort niveau de technologie. Mais ceci n'interdit pas pour autant la pratique du recyclage dans les pays à moindres moyens comme le Sénégal où la quantité des produits recyclés est plus faible et leur qualité différente. Dans tous les cas, il faut veiller à ce que les nuisances occasionnées par le recyclage (pollutions, etc.) ne soient pas plus sévères que l'abandon du déchet ou son stockage dans les décharges.

Les éléments résiduels constituent un obstacle à la réutilisation des métaux dans la chaîne de valorisation. C'est par exemple le cas du cuivre que l'on sépare difficilement des ferrailles lors du tri, ou du fer, souvent associé aux objets en aluminium. Ces éléments, difficiles à éliminer, doivent être admis en quantité limitée dans les aciers et les alliages d'aluminium pour leur assurer une réponse reproductible et contrôlée sous l'action des traitements thermiques ou des sollicitations mécaniques. Il apparaît donc, compte tenu de ces éléments résiduels, que l'on ne peut pas recycler « raisonnablement » sans dégrader le matériau. L'opération de recyclage n'est donc pas indéfiniment renouvelable.

Cette étude préliminaire nous a montré l'intérêt, les limites et la complexité du recyclage des métaux. La qualité est liée à l'organisation de la chaîne de traitement des déchets métalliques, mais

²⁵ *Rapport annuel 2005 Febelauto p 25.*

aussi aux moyens techniques. Ainsi, pour comprendre et identifier les problèmes étudiés dans ce travail sur le recyclage de l'acier et de l'aluminium au Sénégal et apporter des solutions adaptées lorsque cela est possible, nous devons connaître l'ensemble des opérations conduites dans le cycle de valorisation de ces déchets métalliques dans ce pays.

C'est l'objet du paragraphe suivant qui fait la synthèse des enquêtes de terrain que nous avons réalisées nous-mêmes ou effectuées par des organismes mandatés (ECOPOLE et C.T.I.F.).

III-3-2 Le recyclage des métaux au Sénégal

Pour situer le contexte dans lequel s'inscrivent les opérations de recyclage au Sénégal, il est utile d'avoir quelques points de repères économiques sur ce pays.

Le Sénégal, pays situé à la pointe de l'Afrique de l'Ouest, compte 10 millions d'habitants (chiffres de 2001), dont près de la moitié vit en milieu urbain dans les 5 plus grandes villes du pays. La région de Dakar, où se situe géographiquement notre étude, concentre à elle seule près du quart de la population avec une densité moyenne de 4000 hab./km²²⁶. Le PIB par habitant est de 499 euros. A titre de comparaison, il était en 2002 de 24 837 euros pour la France²⁷. Le taux de croissance du Sénégal est aux alentours de 6% depuis quelques années. Les principales ressources du pays sont la pêche et le tourisme. D'importants gisements de pétrole ont été découverts récemment au large de la frontière sénégal-bissau-guinéenne. De médiocre qualité, les perspectives de leur exploitation ne sont pas d'actualité. En revanche, les ressources minières sont limitées à quelques gisements aurifères et de phosphates. Le Sénégal, un des pays d'Afrique de l'Ouest les plus industrialisés, accueille de nombreuses entreprises multinationales.

Nous avons vu précédemment que le traitement des déchets constitue une des préoccupations du gouvernement du Sénégal, inscrite dans un code de l'environnement. La loi 2001 – 01 du 15/01/2001 applique le principe du « pollueur-payeur » adopté dans de nombreux pays désignant les producteurs de déchets comme responsable de leur traitement.

Deux études importantes ont été conduites dans les secteurs auxquels nous nous intéressons :

i) « Le secteur du recyclage au Sénégal pour les filières métal et plastique »

Il s'agit d'un document réalisé par l'ONG ENDA Sénégal en 1998. Les enquêtes sur le terrain font un état des ressources en matières recyclables (métaux et plastiques) et des structures de collecte et de transformation de ces matériaux. Cette étude a pour but d'argumenter et de justifier le transfert, vers le Sénégal, de techniques de recyclage développées au Vietnam.

ii) « Faisabilité d'une opération pilote au Sénégal visant à développer durablement le secteur artisanal de la transformation des matériaux »

Il s'agit d'une étude engagée par l'Agence Intergouvernementale de la Francophonie (AIF) en 2003, en collaboration avec la Direction de l'Artisanat et avec le soutien du Centre Technique des Industries de la Fonderie (C.T.I.F.) en France, dans le cadre d'un projet de restructuration de l'activité

²⁶ www.gouv.sn/senegal/index.html.

²⁷ www.bfs.admin.ch/bfs.

de la fonderie artisanale au Sénégal en vue de la production d'alliages d'aluminium contrôlés à partir de la récupération de déchets.

Les informations tirées de ces deux études, auxquelles s'ajoutent celles que nous avons obtenues à partir de nos propres investigations permettent de dresser un tableau assez complet de l'activité et de la structure des entreprises liées au recyclage, dont les éléments significatifs sont exposés ci-après.

a) Les ressources en déchets métalliques

Les ressources potentielles de déchets de métaux sont estimées à :

- 120 t/an d'aluminium dont la moitié est exportée vers l'Europe et l'autre moitié est traitée sur place dans des unités artisanales en vue de la fabrication d'ustensiles de cuisine, de pièces mécaniques, etc. ;
- 9600 t/an de fonte réservées presque exclusivement à l'exportation ;
- 8400 t/an d'acier traitées sur place dans une fonderie industrielle privée, la Société Sénégalaise de Transformation (SOSETRA) spécialisée dans la fabrication des armatures pour le béton armé ;
- 720 t/an d'autres métaux (cuivre, laiton, bronze, zinc, etc.) exportées ou traitées localement.

b) Collecte, tri et provenance des déchets

La collecte et le tri de ces matériaux impliquent de nombreux acteurs travaillant pour leur compte personnel (voir figure 1-3), mobilisés à temps complet pour cette activité et parfois organisés en filières.

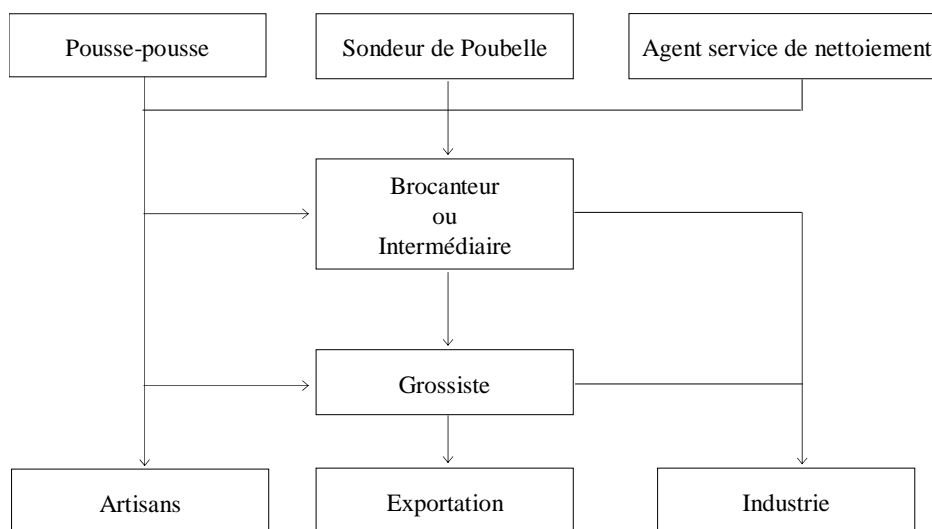


Figure 1-3 : Filière de la collecte et de la commercialisation des déchets au Sénégal²⁸.

La plus grande quantité des déchets est ramassée et acheminée dans les décharges par le service de nettoyage où des "sondeurs de poubelles" ou récupérateurs retirent la majeure partie des objets valorisables qu'ils contiennent. La partie restante des déchets, généralement très prisée, car ayant le

²⁸ENDA/PRAXIS rapport final octobre 2002 – déchets D06 (2002).

rapport poids/valeur marchande le plus élevé, est récupérée directement dans les poubelles des quartiers par certains sondeurs de poubelles ou par des « pousse-pousses » (petits commerçants munis de petits chariots sillonnant la ville à pied à la recherche de déchets valorisables à acheter). Ces acteurs du recyclage fournissent directement les artisans ou les usines qui transforment ces déchets ou des intermédiaires qui gagnent leur vie grâce à la plus value réalisée lors de leur revente locale ou à l'étranger.

Une enquête réalisée en 1998 par l'ONG ENDA Tiers Monde dans les deux plus grandes villes du Sénégal (Dakar et Thiès), et englobant la principale décharge du pays : « mbeubeuss » située à environ 20 km de Dakar, montre que les récupérateurs, dont on ne connaît pas exactement le nombre, appartiennent aux couches les plus défavorisées de la population. Ils s'associent dans les décharges pour trier les métaux, le verre et le plastique et ne disposent d'aucun équipement particulier pour identifier et trier les matériaux. Ils ont cependant une bonne expérience de leur métier, car l'enquête a révélé que leur ancienneté moyenne était d'une dizaine d'années. Cette compétence professionnelle est souvent mise en valeur dans cette activité exercée de manière permanente (89,5 %) et autonome (94 %) et qualifiée d'informelle. Les populations impliquées dans ce travail ingrat ont des revenus extrêmement modestes, malgré le fait qu'elles aient individuellement en charge en moyenne 7,2 personnes dont 3,2 enfants et bénéficient quelquefois du soutien d'organismes humanitaires.

Les déchets ont des provenances variées :

- ordures ménagères ou municipales collectées auprès des habitants, restaurateurs, etc., ou encore sur les décharges publiques ;
- automobile, principale source de déchets en ce qui concerne les alliages d'aluminium et d'acier ;
- bâtiment et menuiserie métallique ;
- chutes industrielles provenant de la fabrication de récipients emboutis ;
- rails de chemin de fer hors d'usage etc.

Après la collecte, les déchets sont dirigés vers les transformateurs artisanaux ou encore vers les grossistes en vue de l'approvisionnement des fonderies et des usines de transformation locales ou de l'exportation. Trois sociétés, situées sur le boulevard du centenaire de la commune de Dakar, se partagent le marché du rachat des déchets métalliques au Sénégal : Tremex, Recuver Sénégal et Métal Afrique.

c) Transformation des déchets

La transformation des déchets est réalisée dans deux secteurs :

Le secteur industriel

Il est doté d'unités de production de grandes capacités. Deux entreprises occupent ce créneau :

i) FOMSEN (FOnderie et Manufacture du SENégal)

C'est une fonderie de fonte privée créée en 2003. Elle est installée dans la zone industrielle de Dakar et utilise la ferraille locale pour fabriquer des plaques d'égout et d'autres objets en fonte. La production est assurée par un four rotatif d'une capacité de 1 tonne chauffé à l'huile de vidange.

ii) SOSETRA (SOciété SEnégalaise de TRAnsformation)

C'est une autre société privée créée en 1995 et installée à une vingtaine de kilomètres de Dakar. Elle est spécialisée dans le recyclage des ferrailles pour la fabrication d'armatures à béton destinées au marché local. La capacité de ses installations lui permettrait de dépasser facilement 10 000 t/an mais sa production réelle oscille entre 3000 et 4000 t/an faute d'une matière première suffisante à traiter. Elle est approvisionnée en ferrailles par des commerçants indépendants, mais surtout par les sociétés spécialisées dans le rachat des déchets métalliques au Sénégal et citées plus haut. Cet approvisionnement est très inégal en quantité, au point d'interrompre la fabrication des armatures en cas de rupture de stock, mais aussi en qualité car le tri réalisé en amont est insuffisant. La fusion des ferrailles est réalisée avec un four à arc électrique. La coulée continue de l'alliage obtenu donne des produits semi-finis, les billettes qui, une fois laminées à chaud donnent la forme et le diamètre final de l'armature. Compte tenu des approvisionnements en ferrailles irréguliers, les caractéristiques mécaniques des armatures sont assez variables et les propriétés mécaniques attendues de ces produits ne sont pas toujours tenues. Les utilisateurs se plaignent principalement de problèmes de ruptures fragiles lors du pliage. Une partie de ce travail de thèse s'intéressera à ce problème.

Le secteur artisanal

Il dispose de moyens très limités, mais d'une grande expérience (annexe III-1). La valorisation des déchets débouche sur deux types d'activité.

Le premier consiste en un façonnage par découpe, martelage, pliage, assemblage, destiné à la fabrication d'outils à main ou d'objets d'art. L'exemple le plus connu de cette activité artistique est celui des attachés-cases fabriqués au Sénégal (voir figure 1-4) : les malles « COT-COT », du nom de J. P. COT, ancien ministre français délégué, chargé de la coopération et du développement de 1981 à 1983, qui en a fait la publicité en allant à un conseil des ministres avec l'une d'elles.



Figure 1-4 : Mallette « COT-COT »²⁹.

Le deuxième type est la fonderie de métaux tels que le zinc, le laiton, le bronze, le plomb et surtout l'aluminium. Pour ce dernier, qui nous intéresse dans cette thèse, le débouché essentiel est la fabrication d'ustensiles de cuisine (marmites, louches, etc.) et de quelques pièces mécaniques simples. C'est une activité traditionnelle en Afrique qui occupe une main d'œuvre qualifiée et regroupée dans le

²⁹ www.afrika-erleben.de.

quartier des fondeurs de chaque ville de moyenne à grande importance. Ainsi à Dakar, dans le quartier de Colobane on recense près de 300 fondeurs sur une surface d'environ 3 ha, travaillant la plupart du temps de façon indépendante. Ils sont professionnellement regroupés, avec les autres fondeurs du Sénégal, au sein de l'association nationale des fondeurs du Sénégal dont monsieur Youssoupha THIOMBANE est le président.

La technique de fabrication utilisée est la fonderie en moule de sable silico-argileux (que nous présentons dans l'annexe III-1). Les outillages et matériels sont simples, voire rudimentaires et la plupart du temps issus de la récupération. La source d'énergie reste exclusivement le charbon de bois. Les fondeurs ont reçu la formation donnée par leurs aînés lorsqu'ils étaient apprentis. Leur savoir faire repose sur l'expérience, limitée à la fabrication de quelques objets. Si la capacité à fabriquer des pièces aussi délicates que les marmites constitue une véritable prouesse technique compte tenu des moyens déployés (en raison de la faible épaisseur des parois), l'absence de contrôle de la compatibilité alimentaire des alliages produits reste un problème. La « récupération sauvage » des déchets laisse planer un doute permanent sur cette qualité, notamment vis-à-vis du plomb, métal à bas point de fusion, dont les effets nocifs ne sont pas toujours connus des populations. Le projet A.I.F./A.C.T.I.F. cité précédemment doit contribuer à l'amélioration de la qualité des alliages. La méthode proposée consiste à restructurer le secteur de la fonderie artisanale autour de la production organisée de lingots titrés produits par une unité pilote. Les artisans travailleraient alors ces matériaux contrôlés et n'assureraient plus l'élaboration des alliages métalliques à partir des déchets d'aluminium.

Notre étude de la qualité alimentaire des marmites (chapitre 3), complémentaire à celle entreprise par l'A.I.F., trouve dans ce contexte une totale justification.

Conclusion

L'étude préliminaire conduite dans ce chapitre montre que notre recherche se place dans un contexte environnemental. Le Sénégal s'est engagé sur la voie du développement durable en éditant un code de l'environnement incitant les producteurs de déchets à les traiter en respectant la nature. Le recyclage est largement encouragé ainsi que les actions éducatives se rapportant à l'amélioration du cadre de vie. Les enjeux liés à cette politique environnementale sont importants pour le Sénégal : diminution du chômage, valorisation d'un capital énergétique et en matières premières constitué au fil du temps, lutte contre les décharges sauvages et leur corollaire en terme de pollutions, maladies, etc.

Étant données les conditions dans lesquelles les déchets métalliques sont récupérés et triés, l'approvisionnement en matière première recyclable est très inégal en quantité et en qualité. Cette situation ajoute une variable supplémentaire dans la chaîne de maîtrise de la qualité des objets produits.

Notre travail scientifique concernant l'étude de la fabrication et l'évaluation de la qualité des produits industriels (armatures à béton armé) et artisanaux (ustensiles de cuisine) trouve naturellement sa place dans ce contexte où le contrôle de la qualité est soit insuffisant soit inexistant. Il s'agit plus particulièrement de suivre les propriétés mécaniques des armatures à béton produites par la SOSETRA qui dispose de moyens industriels de fabrication d'une part et d'évaluer la compatibilité alimentaire des

alliages d'aluminium produits artisanalement par les artisans fondeurs d'autre part.

Pour mener à bien ce travail, nous avons décidé de présenter les technologies mises en œuvre pour le recyclage des déchets métalliques en acier et en aluminium au Sénégal, qui s'écartent assez largement de celles utilisées en Europe notamment, avant de nous intéresser aux caractéristiques de ces produits. Ceci fera l'objet des chapitres 2 et 3 à venir, consacrés respectivement au recyclage de l'acier et de l'aluminium.

Chapitre 2

VALORISATION DES DECHETS D'ACIER AU SENEGAL

SOMMAIRE

Introduction.....	26
I Cahier des charges des armatures à haute adhérence pour béton armé.....	27
I-1 Définitions	27
I-2 Armatures sénégalaises.....	28
I-3 Armatures européennes.....	28
I-4 Discussion.....	29
II Fabrication des armatures pour béton armé au Sénégal.....	31
II-1 Élaboration et mise en forme du métal	31
II-2 Suivi de la qualité	32
III Méthodes expérimentales	33
III-1 Echantillonnage.....	33
III-2 Caractérisation des armatures.....	34
III-2-1 Caractérisations chimiques.....	34
III-2-2 Caractérisations géométriques et physiques.....	34
III-2-3 Caractérisations mécaniques	34
III-2-4 Caractérisations micro structurales	35
IV Résultats expérimentaux	35
IV-1 Evaluation de la qualité des armatures au regard du cahier des charges.....	35
IV-1-1 Analyses chimiques	35
IV-1-2 Caractéristiques géométriques et physiques.....	36
IV-1-3 Limite d'élasticité	36
IV-2 Contrôle de la qualité métallurgique des armatures.....	40
IV-2-1 Mesure de la limite d'élasticité des aciers étudiés	40
IV-2-2 Etude de la dureté des armatures.....	42
IV-2-3 Etude microstructurale des armatures	44
IV-2-4 Etude des propriétés des aciers sous l'action de cycles thermiques contrôlés	45
IV-2-5 Défauts dans les armatures.....	51
IV-2-6 Le test de pliage	53
V Discussion et synthèse des résultats	55
V-1 Maîtrise de la composition chimique	55
V-2 Maîtrise de la microstructure.....	57
V-3 Méthode pratique de prévision de la limite d'élasticité nominale	58
Conclusion	62

Introduction

La Société Sénégalaise de Transformation (SOSETRA), comme nous l'avons vu au chapitre précédent, est une société industrielle de transformation des déchets d'aciers issus de la collecte locale. Sa production est uniquement centrée sur des armatures pour béton armé vendues localement. Celles-ci sont largement utilisées dans les constructions du génie civil et dans les constructions immobilières, secteur très actif dans la région dakaroise, ces armatures viennent renforcer les structures de béton.

Les propriétés généralement demandées aux armatures répondent à des exigences particulières précisées dans des normes :

- une limite d'élasticité suffisante pour exercer un renforcement efficace sur le béton, matériau fragile ;
- une bonne résistance à la corrosion dans un milieu basique, le béton ;
- une plasticité suffisante pour subir sans dommages le pliage auquel elles sont soumises lors de leur mise en œuvre ;
- une bonne soudabilité ;
- une surface nervurée pour améliorer le transfert de charge (à l'origine du mécanisme de renforcement) entre le béton, matériau fragile, et l'armature. Ce relief crée un effet de « verrou », empêchant tout déplacement des matériaux en contact au niveau de l'interface. On parle alors d'armatures à « haute adhérence ».

Compte tenu de l'ensemble de ces contraintes, les caractéristiques mécaniques des aciers de construction doivent satisfaire des exigences contradictoires : bonne résistance mécanique et bonne plasticité.

Il est observé que les armatures sénégalaises présentent une fragilité excessive. Des ruptures se produisent fréquemment, notamment lors du pliage. Ce défaut compromettant la sécurité des constructions du génie civil, nous avons décidé d'évaluer la qualité des armatures pour identifier les origines de ce problème afin de pouvoir apporter des éléments de réponse.

La gamme de fabrication de la société étant assez large (diamètre de 5 à 20 mm), nous nous sommes limités à l'étude des armatures de diamètre nominal égal à 10 mm, qui constituent la majeure partie de la production de cette entreprise.

Comme dans toute expertise, nous avons cherché à réunir un maximum d'informations sur le produit analysé. Dans ce but, nous retracerons tout d'abord l'histoire de la fabrication des armatures, avant de déterminer et d'analyser les propriétés d'échantillons représentatifs. Les caractéristiques de ces produits seront comparées à celles de produits semblables de fabrication européenne.

Mais avant d'aborder cette partie de l'étude, nous présentons des informations sur les caractéristiques mécaniques et structurales attendues des armatures à béton.

I Cahier des charges des armatures à haute adhérence pour béton armé

I-1 Définitions

En génie civil, la caractérisation géométrique et mécanique des armatures pour béton armé fait appel à des grandeurs spécifiques au domaine, dont la mesure et la signification diffèrent notablement de celles définies en mécanique, d'où la nécessité de préciser les notions que nous utiliserons dans la suite de cette étude, extraites des normes française (NF EN 10080) et européenne (NF A35 – 016) que nous avons choisies comme points de référence.

Les armatures, outre leur aspect extérieur (lisse ou nervuré) sont qualifiées et désignées par leur diamètre nominal d_n , grandeur que l'on peut considérer comme une caractéristique de fabrication et à laquelle on associe souvent la section nominale S_n , calculée comme étant la section d'un barreau cylindrique de diamètre nominal d_n .

Toutefois, le diamètre nominal ne doit pas être confondu avec le « diamètre » des armatures, caractéristique destinée à donner une information sur la section réelle S_r de l'armature. Il n'est pas mesuré mais calculé à partir de sa définition (équation 2-1). En effet, le diamètre d_r d'une armature est par définition le diamètre d'un cylindre de révolution de même masse linéique, X que l'armature considérée (qu'elle soit lisse ou à haute adhérence). Pour effectuer cette transformation, la masse volumique ρ de l'acier est fixée par la norme égale à 7,85 kg/dm³.

$$d_r = \sqrt{4X / \rho\pi} \quad \text{Équation 2-1}$$

Les armatures sont caractérisées par leur limite d'élasticité garantie, encore appelée limite d'élasticité nominale, R_{en} . Cette caractéristique, très importante car prise en considération dans les calculs de dimensionnement du génie civil, est définie par un essai de traction. Elle est égale au rapport entre la force à la limite d'élasticité (apparente ou à la limite de proportionnalité à 0,2% de déformation plastique, voir normes citées plus haut) de l'armature et sa section nominale. Cette grandeur diffère notablement de la limite d'élasticité des matériaux de construction, notée R_e ou $R_{p0,2}$, définie classiquement par le rapport entre la force à la limite d'élasticité (apparente ou à la limite de proportionnalité à 0,2% de déformation plastique) et la section initiale sur laquelle s'appliquent les efforts, S_r .

Pour éviter toute confusion, nous parlerons de limite d'élasticité garantie ou de limite d'élasticité nominale (R_{en}) pour désigner la propriété du produit « armature » et de limite d'élasticité (R_e ou $R_{p0,2}$) pour qualifier la propriété du matériau de construction.

Ces deux grandeurs, sont reliées par la relation suivante (équation 2-2) :

$$R_{en} = R_e \cdot d_r^2 / d_n^2 \quad \text{Équation 2-2}$$

Enfin, la ductilité des armatures est évaluée à partir de leur allongement à la rupture garanti, noté $A\%$.

I-2 Armatures sénégalaises

Le cahier des charges des armatures produites par la SOSETRA est très sommaire. Pour les produits auxquels nous nous intéressons dans cette étude, plusieurs caractéristiques sont prises en considération :

- les armatures sont nervurées pour accroître l'adhérence au béton, mais aucune spécification n'existe sur la forme et les dimensions de ces reliefs de surface ;
- la limite d'élasticité nominale des armatures de diamètre nominal $d_n = 10$ mm doit être de 400 MPa ;
- les armatures doivent être soudables ;
- la composition chimique des aciers de construction doit rentrer dans une plage de valeurs établie de façon empirique par la société compte tenu du procédé de fabrication et du niveau d'exigence fixé (voir tableau 2-1).

Elément	C	Mn	Si	P	S	Cr
% masse mini.	0,30	0,50	0,10	/	/	/
% masse maxi.	0,60	0,70	0,25	0,055	0,055	0,5

Tableau 2-1 : Fourchette de composition visée par la SOSETRA dans la fabrication des armatures pour béton armé.

Afin d'établir un point de comparaison avec des produits semblables dont les critères d'évaluation de la qualité sont plus élaborés, nous allons présenter maintenant quelques éléments pertinents du cahier des charges d'armatures de fabrication européenne.

I-3 Armatures européennes

Outre les caractéristiques de forme et de soudabilité requises pour ces produits, auxquelles nous ne nous intéresserons pas dans ce travail, la norme NF A35-016 impose notamment les caractéristiques suivantes :

- une limite d'élasticité garantie, $R_{en} = 410$ MPa pour les armatures Fe E 40, qui s'approchent le plus de la fabrication sénégalaise ;
- un allongement à rupture minimum, $A\% = 14\%$;
- une tolérance sur la masse linéique des armatures, $\Delta X_n/X_n$ (équation 2-3), de $\pm 10\%$.

$$\Delta X_n/X_n = (X - \rho S_n) / \rho S_n \quad \text{Équation 2-3}$$

ρ est la masse volumique de l'acier, fixée par la norme égale à $7,85 \text{ kg/dm}^3$

X est la masse linéique mesurée de l'armature ;

- l'armature ne doit pas présenter de fissure, à plus forte raison se rompre après un essai de pliage simple à 180° sur un mandrin de diamètre $2,5 \times d_n$.

La récente norme européenne NF EN 10080 impose même pour des armatures plus résistantes, Fe E 50 ayant une limite d'élasticité garantie $R_{en} = 500$ MPa, une tolérance sur la masse linéique de $\pm 4,5 \%$ et impose une fourchette de composition chimique pour les éléments les plus influents (C, P, S, N). Elle aussi fait mention de la teneur en carbone équivalent C_{eq} , paramètre utilisé classiquement pour évaluer l'aptitude au soudage des aciers de construction, et pour les situer dans le diagramme d'équilibre Fe-C des aciers ayant un faible pourcentage d'éléments d'addition. La relation proposée pour l'équivalence est la suivante (équation 2-4) :

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad \text{Équation 2-4}$$

où C, Mn, Cr, Mo, V, Ni et Cu sont respectivement les pourcentages massiques en carbone, manganèse, chrome, molybdène, vanadium, nickel et cuivre de l'acier.

I-4 Discussion

En comparaison des normes européennes, l'analyse du seul critère mécanique d'évaluation de la qualité, $R_{en} = 400$ MPa, que la SOSETRA est tenue de respecter, appelle quelques commentaires.

Compte tenu de différences possibles entre la surface réelle et la surface nominale des armatures, la limite d'élasticité du matériau de construction et la limite d'élasticité nominale des armatures ne sont plus égales (équation 2-2).

Lorsqu'un écart existe entre la surface réelle et nominale, une armature peut encore répondre au critère de qualité imposé ($R_{en} = 400$ MPa) par un effet de « compensation ». Cet effet est obtenu en modifiant le diamètre, donc la surface réelle de l'armature, ce qui influe sur la force mesurée lors de l'essai de traction. En pratique, $R_{en} < 400$ MPa peut être compensé en augmentant le diamètre réel des armatures (équation 2-2). Ce cas de figure n'est pas très avantageux pour le fabricant qui obtient une longueur moins importante d'armatures pour une quantité donnée de métal, ni pour les utilisateurs qui exercent une force plus importante pour plier ces dernières. A l'opposé, une valeur de R_{en} trop élevée sera corrigée par une diminution du diamètre de l'armature. Cette possibilité d'adaptation, intéressante pour le fabricant et les utilisateurs pour les raisons précédentes, peut conduire à des excès, notamment lorsqu'on cherche à ramener dans la norme des armatures réalisées à partir d'aciers trop résistants (R_e trop élevée), pour lesquels les capacités de déformation plastique sont limitées. Une question se pose alors : jusqu'où peut-on aller dans ce sens sans compromettre l'aptitude de l'armature au pliage, sans craindre la rupture brutale ?

La plage des valeurs de composition chimique fixée par la SOSETRA (tableau 2-1) pour élaborer ses aciers de construction vise la soudabilité, mais peut aussi encadrer les possibilités de déformation plastique des matériaux. En effet, limiter la teneur en éléments d'addition, et en carbone tout particulièrement, est une mesure efficace comme le montre la figure (2-1). Mais les valeurs choisies par la société sont-elles adaptées ?

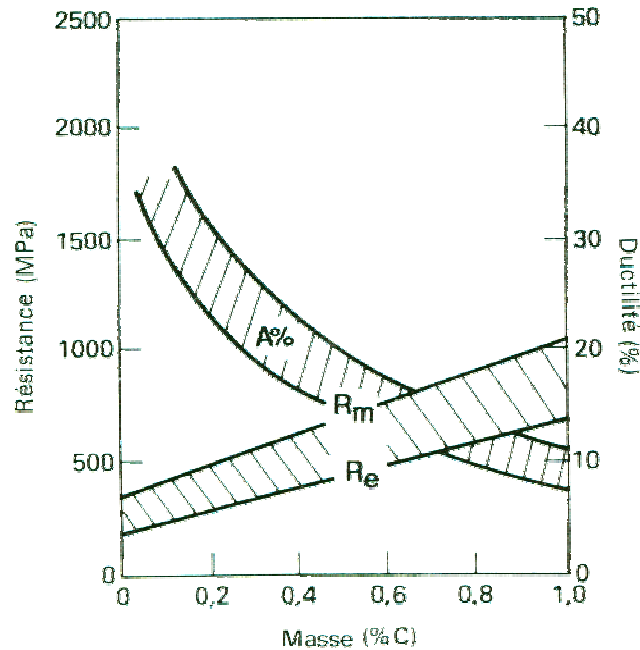


Figure 2-1 : Propriétés mécaniques des aciers au carbone normalisés³⁰.

Re = limite d'élasticité, Rm = résistance à la traction, A%=allongement à la rupture.

A l'issue de cette première analyse du cahier des charges des armatures sénégalaises et à la lumière de l'approche européenne de leur qualité, il apparaît que la seule caractéristique mécanique imposée par le fabricant, la limite d'élasticité nominale, n'est pas suffisante pour garantir la qualité du produit, compte tenu de ses conditions de mise en œuvre. Nous constatons en effet que dans l'approche « européenne » ou « française » d'évaluation de la qualité des armatures, le principe de compensation par la surface peut être appliqué, mais la marge de manœuvre sur ce facteur est limitée, notamment par l'allongement minimal à rupture imposé, et par la tolérance sur la masse linéique.

En conclusion, nous retiendrons que la limite d'élasticité nominale de 400 MPa sera le critère principal d'évaluation de la qualité des armatures sénégalaises de 10 mm de diamètre nominal que nous nous proposons d'étudier. Cependant, dans notre étude de cette qualité, nous élargirons ces critères d'évaluation en intégrant les critères d'allongement à rupture de 14 % minimum et de tolérance sur la masse linéique de $\pm 4,5$ % empruntés aux normes françaises (NF A35-016) et européenne (NF EN 10080).

Avant de faire l'expertise de nos produits, nous présentons maintenant le procédé de transformation des déchets mis en œuvre par la société sénégalaise dans la fabrication des armatures pour béton armé.

³⁰ M. F. ASHBY, D. R. H. JONES dans *Matériaux*, Tome 2 Microstructure et Mise en forme, DUNOD, Paris (1991).

II Fabrication des armatures pour béton armé au Sénégal

II-1 Élaboration et mise en forme du métal

La fabrication des armatures pour béton armé réalisée au Sénégal à partir des déchets ferreux suit différentes étapes illustrées par la figure 2-2.

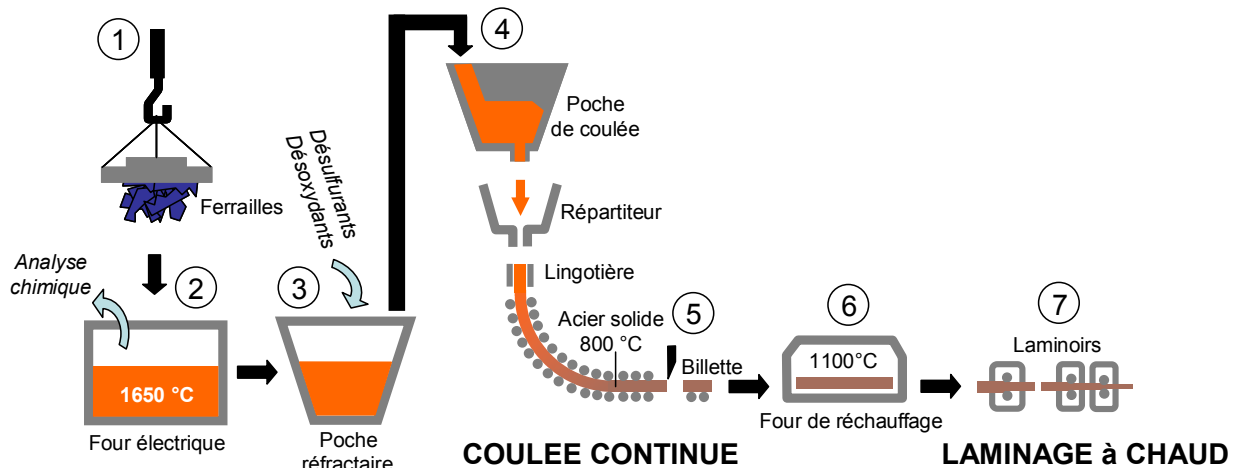


Figure 2-2 : Différentes étapes de l'élaboration des armatures pour béton armé au Sénégal.

L'étape préliminaire de la fabrication consiste à réunir, en quantité suffisante, des ferrailles de qualité adaptée à l'élaboration de l'acier pour armatures dont les propriétés devront satisfaire au cahier des charges de l'entreprise. Elle est importante dans la mesure où il n'y a pas de contrôle de qualité à ce niveau. Le fournisseur met à la vente des lots de ferrailles dont la composition n'est pas maîtrisée suite à l'absence de tri efficace. L'acheteur ne peut compter que sur son expérience pour acheter de « bonnes » ferrailles.

Vient ensuite l'étape de la constitution de la charge qui sera introduite dans les fours de fusion. La ferraille est mise à la dimension du four (1). Les objets trop volumineux sont découpés de façon à rentrer dans les fours électriques de fusion. Les autres objets, tels les tôles ou les matériaux encombrants sont densifiés par compactage. Cette étape permet d'optimiser l'utilisation de la capacité des deux fours électriques de fusion à électrodes plongeantes, d'une puissance de 5 mégawatts chacun pour une contenance individuelle de 14 tonnes.

La matière première solide est ensuite portée à la fusion (2) dans l'un des deux fours fonctionnant en alternance, à raison de 12 à 13 tonnes par cycle. Durant cette opération d'une durée de trois heures environ, la température atteint 1650°C. La composition chimique de la coulée est alors analysée par spectrométrie et des corrections sont apportées à la composition de l'acier en fonction des caractéristiques finales visées (tableau 2-1). Ainsi, pour augmenter la concentration en carbone de l'alliage, de la fonte est ajoutée et pour la diminuer, on ajoute du fer provenant de chutes d'usines de fabrication de boîtes de conserves. Malheureusement, le fer des boîtes de conserves est souvent « pollué » par l'étain utilisé pour souder et sceller ses ouvertures. L'étain, composant nocif pour l'acier, ségrège au niveau des joints de grains et occasionne des ruptures des billettes au cours du laminage.

Ceci entraîne un arrêt de toute la chaîne de laminage pendant plusieurs heures et constitue par conséquent un manque à gagner pour la société.

Après la fusion, l'acier liquide est transvasé dans une poche réfractaire et mélangé à des désoxydants et des « désulfurants » introduits sous forme d'alliages de silicium et de manganèse (3) ; c'est l'affinage. Ces éléments réagissent avec l'oxygène ou le soufre pour donner des oxydes ou des sulfures dont une partie sera éliminée par décantation dans le laitier. Ils aident ainsi à éliminer ces composants nocifs (oxygène et soufre) pour l'acier. Par ailleurs, l'excès de manganèse en solution solide dans la ferrite exerce un effet durcissant et abaisse la température de transition ductile/fragile de l'acier³¹.

La poche contenant l'acier liquide est acheminée vers une machine de coulée continue (4) à lingotière courbe³² de laquelle il sort des billettes parallélépipédiques de 100 mm x 100 mm. Celles-ci sont découpées, au chalumeau oxyacétylénique, en tronçons de 2,6 m de longueur (5) qui refroidissent à l'air jusqu'à la température ambiante et sont marquées en fonction de leur teneur en carbone et entreposées.

Les billettes sont ensuite réchauffées dans un four (6) à une température de 1100 °C pendant une heure avant d'être laminées à chaud par passages successifs entre les galets des laminoirs jusqu'à atteindre le diamètre final (7). Cette opération donne les dimensions et l'aspect de surface cranté de l'armature.

A la fin du train de laminage deux sorties sont possibles pour les armatures :

- elles sont enroulées en couronnes de 3 m de diamètre environ et refroidissent alors jusqu'à la température ambiante avant d'être redressées et coupées en longueurs de 12 m ;
- elles sont coupées sous forme de barres rectilignes de 12 m de long puis rangées sur une table où elles refroidissent à l'air ambiant.

Un échantillon d'armature est alors prélevé pour vérifier, par un essai de traction, la compatibilité de la production avec le cahier des charges ($R_{en} = 400$ MPa). Lorsque le test est concluant, les armatures sont entreposées dans l'usine en attendant leur commanditaire ou leur sont livrées directement. Dans le cas contraire, elles sont recyclées comme les déchets d'acier.

II-2 Suivi de la qualité

Le suivi de la qualité est, comme nous venons de le voir, composé de plusieurs contrôles positionnés en cours de fabrication :

- à la réception des ferrailles dans l'usine, par un contrôle visuel qui est parfois étayé d'une analyse chimique spectrographique sur quelques pièces seulement ;

³¹ G. MURRY et J.P. PESCATORE, dans *Techniques de l'Ingénieur, Traité Construction, Aciers de construction métallique, dossier C 2 501* (2003).

³² J. FARHI, dans *Techniques de l'Ingénieur, Traité de Matériaux métalliques, Coulée continue de l'acier, Equipement, Exploitation, dossier M 7812* (1989).

- pendant la fusion de l'acier grâce à une analyse au spectromètre de la composition du métal fondu qui sera ajustée si nécessaire ;
- à l'issue de la fabrication, par un essai de traction sur un échantillon d'armature pour contrôler la valeur de la limite d'élasticité nominale définie dans le cahier des charges.

L'entreprise veille ainsi, avec les moyens dont elle dispose, sur la qualité de ses produits. Cependant malgré ces contrôles et analyses, des problèmes subsistent, justifiant notre étude.

III Méthodes expérimentales

III-1 Echantillonnage

Dans cette étude de la qualité des armatures pour béton armé de 10 mm de diamètre nominal, les tests ont été réalisés sur une quinzaine de tronçons de 170 mm de long chacun, prélevés dans cinq couronnes issues de différentes coulées choisies par le fabricant. Celles-ci sont appelées coulées A, B, C, D et E.

Trois échantillons ont été extraits de chaque couronne dans les zones repérées 1, 2 et 3 sur la figure (2-3).

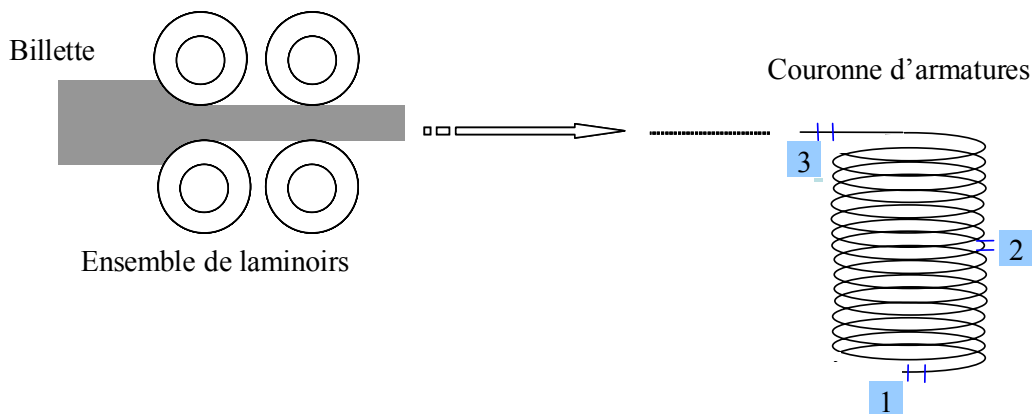


Figure 2-3 : Position des échantillons prélevés sur une couronne d'armature obtenue après laminage d'une billette.

L'échantillon repéré 1 est situé au début de l'armature sortant du laminoir.

L'échantillon repéré 2 est placé au milieu.

L'échantillon repéré 3 est situé à la fin de la couronne sortant du laminoir.

Dans la suite de ce travail, les échantillons seront donc repérés par la lettre indiquant leur coulée et le chiffre indiquant leur position sur la couronne (par exemple B-2 pour coulée B position 2).

Un échantillon prélevé sur une armature commercialisée en France et dénommé « témoin » sera aussi caractérisé à titre de comparaison.

III-2 Caractérisation des armatures

III-2-1 Caractérisations chimiques

Chaque coulée a été analysée par spectrométrie à étincelle (annexe II-1) pour évaluer les teneurs en silicium, magnésium phosphore et soufre présentes dans les alliages. La teneur en carbone a été évaluée par la mesure de la quantité de dioxyde de carbone formé par oxydation à haute température de copeaux d'acier (ces analyses ont été réalisées dans l'entreprise). Nous avons ainsi calculé une valeur minimum de la teneur en carbone équivalent à partir des deux premiers termes de l'équation 2-4.

Pour des analyses locales, nous avons eu recours à la spectrométrie en dispersion d'énergie couplée au microscope électronique à balayage (MEB) (annexe II-2).

III-2-2 Caractérisations géométriques et physiques

Des mesures de masse linéique (X) ont été réalisées sur chaque armature pour évaluer leur diamètre (d_r) et leur section (S_r) conformément à la norme NF A35 – 016 et pour estimer les écarts par rapport à la masse linéique nominale, $\Delta X_n/X_n$ admise par la norme (équation 2-3).

III-2-3 Caractérisations mécaniques

Des essais de traction ont été réalisés à l'aide d'une machine de marque INSTRON sur des tronçons d'armatures présentant une longueur utile de 50 mm, conformément à la norme NF A 03-151 pour mesurer les caractéristiques définies au paragraphe 1-1 : R_{en} , limite d'élasticité nominale des armatures ; R_e , limite d'élasticité de l'acier de construction ; A %, allongement à la rupture des armatures.

Des essais de dureté VICKERS ont été réalisés sous une charge de 1 kg (HV_1) conformément à la norme NF A 03-154 pour établir des profils de dureté respectant une distance entre empreintes de 2,5 fois leur diagonale, sur des sections d'armature préalablement polies à la pâte diamantée de 3 μm (figure 2-4).

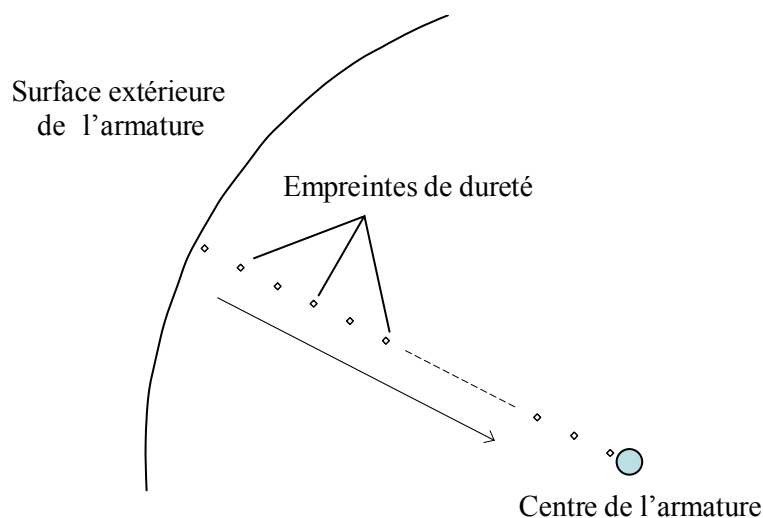


Figure 2-4 : *Filiation de dureté.*

III-2-4 Caractérisations micro structurales

De façon classique, l'observation et l'identification des différentes phases des microstructures ont été réalisées à l'aide de la microscopie optique sur des coupes préalablement polies puis attaquées au Nital (réactif contenant 4 % d'acide nitrique dans de l'alcool). Afin de retracer le passé métallurgique de nos échantillons, nous avons procédé à deux traitements thermiques : une trempe dans l'eau et un refroidissement lent à température ambiante après une austénitisation à 850°C pendant 30 mn.

IV Résultats expérimentaux

Nous nous attacherons dans un premier temps à vérifier la qualité des échantillons d'armatures prélevés en termes de respect du cahier des charges du fabricant. Nous avons vu précédemment que ce cahier des charges n'est pas suffisant pour garantir la qualité des armatures, c'est pourquoi nous confronterons les résultats obtenus aux normes européennes ou françaises en vigueur.

Dans un deuxième temps, nous nous intéresserons à la qualité métallurgique des aciers qui composent les armatures étudiées.

IV-1 Evaluation de la qualité des armatures au regard du cahier des charges

Dans cette partie, nous nous intéressons à la composition élémentaire des échantillons prélevés, à leurs caractéristiques géométriques et physiques et au critère de limite d'élasticité nominale défini par le cahier des charges.

IV-1-1 Analyses chimiques

Le tableau (2-2) regroupe les résultats d'analyse des échantillons étudiés et rappelle la composition préconisée par la norme NF EN 10080. Figurent aussi les compositions chimiques visées par le fabricant et faisant partie du cahier des charges ainsi que la teneur en carbone équivalent. Pour cette dernière, seuls les pourcentages massiques du carbone et du manganèse ont été pris en compte. Le calcul donne donc une valeur minimum, d'où la notation avec le symbole « > ».

Teneurs (% masse)		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Ceq
Critère SOSETRA	Min.	0,30	0,10	0,50	/	/	/	/	/	/
	Max.	0,60	0,25	0,70	0,055	0,055	/	/	0,50	/
Mesure coulée A		0,42	0,14	0,76	0,016	0,012	/	/	/	>0,546
Mesure coulée B		0,38	0,24	0,67	0,020	0,011	/	/	/	>0,491
Mesure coulée C		0,44	0,13	0,57	0,019	0,011	/	/	/	>0,535
Mesure coulée D		0,30	0,11	0,56	0,23	0,014	/	/	/	>0,393
Mesure coulée E		0,35	0,12	0,53	0,019	0,015	/	/	/	>0,438
NF EN 10080		<0,24	/	/	<0,055	<0,055	<0,085	<0,013	/	<0,520

Tableau 2-2 : Composition chimique des échantillons, comparaison avec la norme européenne NF EN 10080 et avec les critères définis par la SOSETRA.

L'examen du tableau de valeurs montre que les coulées étudiées sont dans la plage des valeurs de composition admises par le cahier des charges de l'entreprise, à l'exception de la coulée A dans laquelle la teneur en magnésium dépasse de peu la limite admise.

Les teneurs en carbone, comprises entre 0,3 et 0,44 %, se situent pratiquement au milieu de la fourchette de composition admise mais sont toutes nettement supérieures à celles autorisées par la norme européenne.

Les teneurs en carbone équivalent sont échelonnées entre 0,39 et 0,54 %, valeurs pour lesquelles les alliages étudiés doivent présenter une structure ferrito-perlitique à l'état d'équilibre. Ce point sera vérifié par l'analyse microstructurale.

Nous remarquerons enfin que les aciers étudiés sont, d'après leur composition chimique, considérés comme des aciers non alliés selon la norme NF EN 10020.

IV-1-2 Caractéristiques géométriques et physiques

Le tableau 2-3 présente les écarts relatifs de la masse linéique ($\Delta X_n/X_n$) mesurée des armatures étudiées par rapport à celle d'une armature de 10 mm de diamètre nominal, et des diamètres réels (d_r) qui en résultent.

Échantillon	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	D-3	E-1	E-2	E-3	Témoin
$\Delta X_n/X_n$ (%)	-18	-19	-12	-24	-24	-15	-24	-25	-14	-26	-25	-13	-23	-23	-12	-1,1
d_r (mm)	9	9	9,4	8,9	8,9	9,3	8,9	8,9	9,3	8,9	8,9	9,2	9	9	9,4	9,9

Tableau 2-3 : Ecart relatif de masse linéique et de diamètre réel des échantillons d'armatures étudiés et de l'échantillon témoin.

D'après le tableau 2-3, nous remarquons que les sections des armatures sénégalaises sont toutes inférieures à la section nominale.

Les écarts relatifs de masse linéique sont par conséquent négatifs et peuvent aller jusqu'à -25 %, ce qui paraît énorme. Nous sommes loin de la tolérance de - 10% admise par la norme française NF A35-016 et de - 4,5 % de la récente norme européenne NF EN 10080. Au regard des normes actuellement en vigueur en France et en Europe, ces produits ne pourraient pas être commercialisés.

L'armature témoin respecte la norme NF EN 10080, puisque l'écart relatif de sa masse linéique est inférieur à celui toléré par la norme.

IV-1-3 Limite d'élasticité

Les courbes de traction des échantillons testés présentent une allure classique pour des aciers au carbone^{33,34}. Elles peuvent être classées en deux familles (voir figure 2-5).

³³ H. BIAUSSER, P. CHOQUET, P. DELANEAU, dans *Techniques de l'Ingénieur, Traité de Matériaux métalliques, métallurgie des tôles laminées sur train continu, dossier M 3 060 (2000)*.

³⁴ G. MURRY dans *Techniques de l'Ingénieur, Traité de Matériaux métalliques, aciers généralités, dossier M 300 (1993)*.

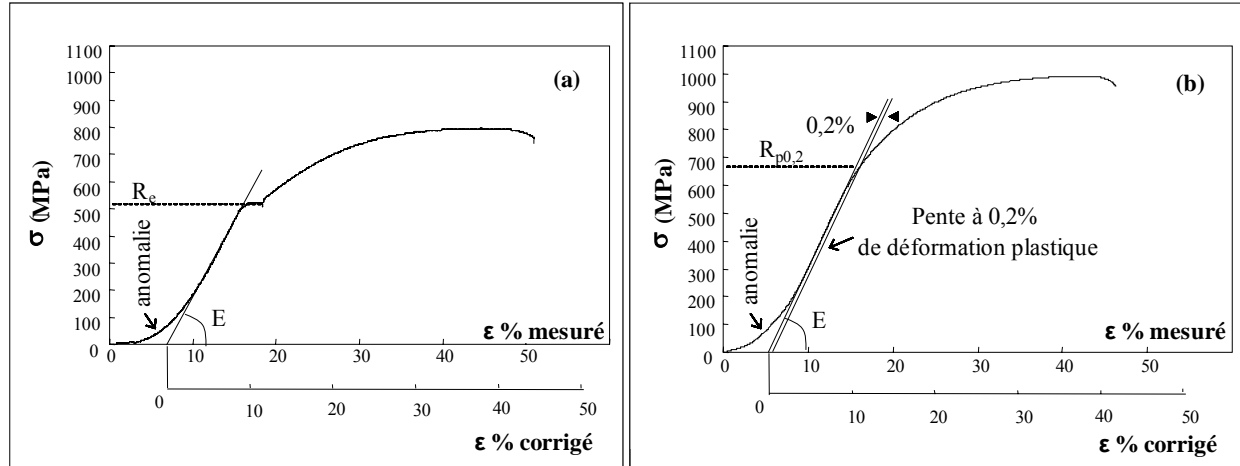


Figure 2-5 : Types de courbes de traction obtenues : (a) avec et (b) sans palier marquant le début de la déformation plastique. R_e = limite apparente d'élasticité, $R_{p0.2}$ = limite d'élasticité à 0,2% de déformation plastique, σ est la contrainte égale au rapport de la force appliquée lors de l'essai de traction sur la surface initiale de la section de l'armature, E représente le module d'Young du matériau.

L'analyse des courbes de tractions amène plusieurs commentaires.

Nous constatons que le pied de courbe n'est pas linéaire. Cette anomalie, retrouvée systématiquement sur chaque diagramme de traction, vient du glissement de l'armature entre les mors de la machine. Il s'établit en début d'essai jusqu'à ce que l'on retrouve la linéarité caractéristique du comportement élastique. Ce déplacement parasite introduit une erreur systématique sur la mesure des déformations que l'on corrige en déplaçant l'origine des déformations au point d'intersection de la droite portée par la partie linéaire de la courbe avec l'axe des déformations. C'est ce qui justifie le deuxième axe des déformations appelé déformation corrigée.

Nous ne retrouverons pas la valeur du module d'élasticité ($E \cong 200 \text{ GPa}$) des aciers étudiés en mesurant la pente de la courbe de traction dans la partie linéaire. Cette méthode d'essai est inappropriée pour la mesure de cette propriété caractéristique.

Les courbes de type (a) présentent un palier marquant le début du domaine des déformations plastiques. La limite d'élasticité est donnée par la projection sur l'axe des contraintes (axe des ordonnées) de la limite inférieure de ce palier. Ce dernier est la conséquence d'une instabilité liée à la formation des bandes de Piobert^{35,30}. Ce comportement, que nous retrouvons sur les coulées A, B, C et D, est caractéristique des aciers au carbone, majoritairement constitués de ferrite, dans leur état d'équilibre.

Les courbes de type (b) ne présentent pas ce palier. Elles sont caractéristiques du comportement de l'alliage de la coulée E. La différence observée laisse supposer que la coulée E se trouve dans un état structural différent de celui des coulées A, B, C et D. Cette hypothèse sera vérifiée par la suite.

³⁵ M. GRUMBACH dans *Techniques de l'Ingénieur. Traité de Matériaux métalliques, Vieillessement des aciers dossier M 235* (1993).

Les limites d'élasticité nominales (R_{en}) de nos échantillons mesurées à partir des courbes de traction ainsi que les allongements à la rupture ($A\%$) ont été reportés dans le tableau 2-4. Figurent aussi dans ce tableau les valeurs de l'écart relatif de masse linéique $\Delta X_n/X_n$ déjà défini.

Un problème technique est survenu lors de l'essai de traction de l'échantillon E-2, raison pour laquelle nous n'avons pas de résultat pour cet échantillon.

Échantillons	R_{en} (MPa)	$A\%$	$\Delta X_n/X_n \%$
A-1	445 \pm 10	20	-18
A-2	445 \pm 10	19	-19
A-3	470 \pm 10	17	-12
B-1	380 \pm10	23	-24
B-2	380 \pm10	24	-24
B-3	420 \pm 10	26	-15
C-1	435 \pm 10	24	-24
C-2	420 \pm 10	23	-25
C-3	465 \pm 10	21	-14
D-1	365 \pm10	26	-26
D-2	360 \pm10	27	-25
D-3	410 \pm 10	28	-13
E-1	490 \pm 10	14	-23
E-3	530 \pm 10	17	-12
Témoin	575 \pm 10	22	-1,15

Tableau 2-4 : *Caractéristiques mécaniques (limite d'élasticité nominale, allongement à la rupture et écart par rapport à la masse linéique nominale) des échantillons testés.*

Nous tirons de l'examen du tableau 2-4 les conclusions suivantes :

- sur l'ensemble des échantillons testés, quatre d'entre eux, B-1, B-2, D-1 et D-2, n'atteignent pas la limite d'élasticité nominale de 400 MPa fixée par le cahier des charges du fabricant ;
- aucun des échantillons ne respecte la tolérance sur la masse linéique de $\pm 10 \%$ fixée par la norme NF A35-016 ;
- le seuil minimal de 14 % d'allongement à la rupture préconisé par la norme NF A35-016 est atteint par l'ensemble des échantillons testés. Nous pouvons noter que l'échantillon E-1 est juste à hauteur de cette limite inférieure ;
- la coulée E se singularise par une limite d'élasticité nominale élevée (supérieure à 490 MPa) ;
- pour chacune des coulées, nous remarquons que l'échantillon repéré 3, c'est à dire situé à la fin de la barre sortie du laminoir, a une limite d'élasticité nominale systématiquement supérieure à celle de l'échantillon repéré 1 situé à l'autre extrémité ;
- le témoin respecte les 500 MPa de limite d'élasticité nominale imposée par la norme européenne qui régit ses caractéristiques mécaniques (NF EN 10080).

Le croisement entre les résultats des tableaux (2-3) et (2-4) permet de construire la figure (2-6) dont l'analyse apporte quelques éléments d'explications aux remarques précédentes.

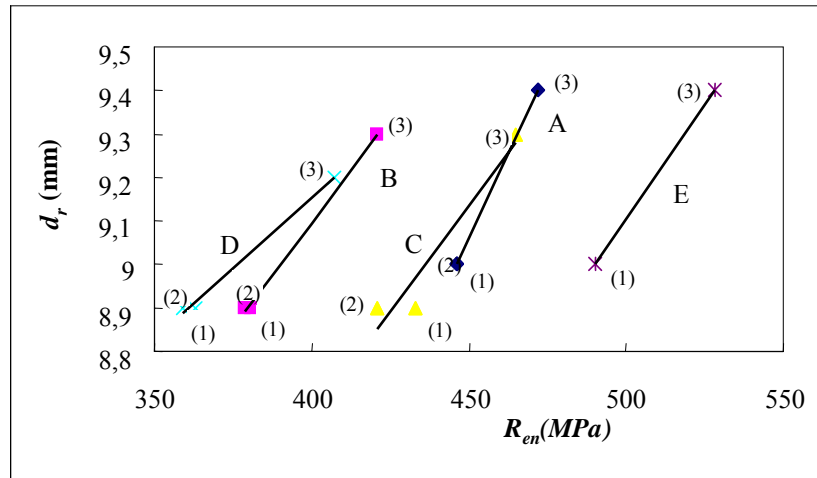


Figure 2-6 : Représentation du diamètre des armatures en fonction de leur limite d'élasticité nominale, les chiffres entre parenthèses associés aux différents points correspondent à la position de prélèvement de l'échantillon sur la couronne

L'accroissement de la limite d'élasticité nominale entre les armatures des premières (zone 1) et des dernières zones (zone 3) est clairement lié à une augmentation du diamètre des échantillons comme le montre la figure 2-6. L'entraxe des galets du laminage n'étant pas réglable en temps réel pendant le laminage, la différence de diamètre des armatures observée peut être attribuée à l'accroissement de la résistance mécanique de l'acier en cours de laminage consécutive à la baisse de température entre le début et la fin de cette opération. Les galets du laminage et leur système de maintien étant soumis à des efforts croissants, la déformation résultante se traduit par une augmentation de l'entraxe des galets et par une augmentation du diamètre de l'armature en fin d'étirage.

Le non respect de la limite de 400 MPa observé sur les échantillons B1, B2, D1, D2 peut être lié à l'action de deux facteurs indépendants :

- la section de la pièce qui, lorsqu'elle est plus petite que la section nominale, entraîne une diminution de la limite d'élasticité nominale, comme nous l'avons montré plus haut ;
- les caractéristiques du matériau de construction.

Comme nous l'avons montré précédemment, pour une armature de diamètre nominal 10 mm, il suffit que la limite d'élasticité du matériau de construction soit différente de la limite d'élasticité nominale de l'armature pour que le produit ne respecte plus le cahier des charges. On sait par ailleurs que les propriétés mécaniques des aciers, et des matériaux métalliques en général, sont gouvernées par leur structure, dépendante de leur constitution chimique et de leur histoire thermomécanique^{36, 37, 38}.

³⁶ J. BARRALIS, G. MADER dans *Précis de Métallurgie*, édit. AFNORD / DUNOD (1995).

³⁷ J.P. BAÏLON, J.M. DORLOT dans *Des Matériaux*, Presses Internationales Polytechniques (2000).

Les propriétés de l'acier et le diamètre réel de l'armature peuvent se combiner pour donner naissance à un mécanisme de compensation. Ainsi, pour ramener dans la norme la limite d'élasticité nominale d'une armature de section trop faible, il faut augmenter la limite d'élasticité de l'acier de construction.

Il est certain que les informations dont nous disposons maintenant sur nos échantillons ne nous permettent pas de conclure sur ce point particulier. Nous remarquons toutefois que l'augmentation de la section de ces dernières permettrait, toutes choses égales par ailleurs, de remonter leur limite d'élasticité nominale dans les mêmes proportions.

Pour examiner ce point particulier, une étude des propriétés des aciers des différentes coulées est réalisée.

IV-2 Contrôle de la qualité métallurgique des armatures

Cette partie de l'étude porte sur :

- la limite d'élasticité des aciers utilisés pour la fabrication des différentes armatures, définie suivant la norme NF A 03-151 ;
- les mesures de dureté et leur évolution suivant le diamètre des armatures ;
- la microstructure des armatures.

IV-2-1 Mesure de la limite d'élasticité des aciers étudiés

Les valeurs des limites d'élasticité des aciers étudiés, tirées de l'exploitation des courbes de traction, figurent dans le tableau 2-5.

Échantillons	R_e ou $R_{p0.2}$ (MPa)	$A\%$
A-1	525 ± 10	20
A-2	530 ± 10	19
A-3	525 ± 10	17
B-1	475 ± 10	23
B-2	475 ± 10	24
B-3	480 ± 10	26
C-1	535 ± 10	24
C-2	520 ± 10	23
C-3	535 ± 10	21
D-1	455 ± 10	26
D-2	450 ± 10	27
D-3	460 ± 10	28
E-1	$600 \pm 10 (R_{p0.2})$	14
E-3	$595 \pm 10 (R_{p0.2})$	17
Témoin	580 ± 10	22

Tableau 2-5 : Limite d'élasticité et allongement à rupture des aciers testés.

³⁸ A. CONSTANT, G. HENRY, J.C. CHARBONNIER dans *Principes de base des traitements thermiques thermomécaniques et thermochimiques des aciers*, PYC. Editions (1992).

L'analyse du tableau 2-5 fait apparaître plusieurs propriétés intéressantes :

- la limite d'élasticité du témoin dépasse de 80 MPa sa limite d'élasticité nominale (500 MPa) ;
- les limites d'élasticité mesurées (comprises entre 450 et 600 MPa) sont toutes largement supérieures aux 400 MPa de limite d'élasticité garantie par le cahier des charges de la SOSETRA. Ceci confirme la compensation évoquée précédemment ;
- les différents échantillons prélevés dans la même coulée ont des limites d'élasticité très voisines. Les écarts mesurés sont au maximum de 2% pour des valeurs de R_e d'environ 500 MPa. Ceci montre que la qualité de l'acier de construction est homogène dans l'armature provenant d'une même billette. Cette homogénéité est aussi la conséquence de la similitude des histoires thermomécaniques des différentes parties d'une même armature ;
- les limites d'élasticité diffèrent d'une coulée à l'autre, mais suivent l'évolution attendue par rapport à la teneur en carbone des aciers (voir figure 2-1 et tableau 2-6) à l'exception de la coulée E.

	Coulée D	Coulée E	Coulée B	Coulée A	Coulée C
C % masse (valeurs croissantes)	0,30	0,35	0,38	0,42	0,44
R_e moyenne (MPa)	455 ± 10	600 ± 10	475 ± 10	525 ± 10	530 ± 10

Tableau 2-6 : Limite d'élasticité et teneur en carbone des coulées étudiées.

En effet, pour les aciers ayant une même structure d'équilibre et la même histoire thermomécanique (figure 2-1), on constate que la limite d'élasticité, la dureté et la charge à rupture augmentent avec la teneur en carbone, ce que confirme l'analyse de nos échantillons. Le cas singulier de la coulée E, dont la limite d'élasticité est la plus élevée alors que sa teneur en carbone est parmi les plus faibles, est la seule exception. Néanmoins, nous constatons que tous nos échantillons sont dans la fourchette de valeurs de R_e donnée par la figure 2-1. La figure 2-7, construite à partir de la figure 2-1 dans laquelle nous avons intégré les teneurs en carbone et les limites d'élasticité de nos échantillons, illustre cette remarque.

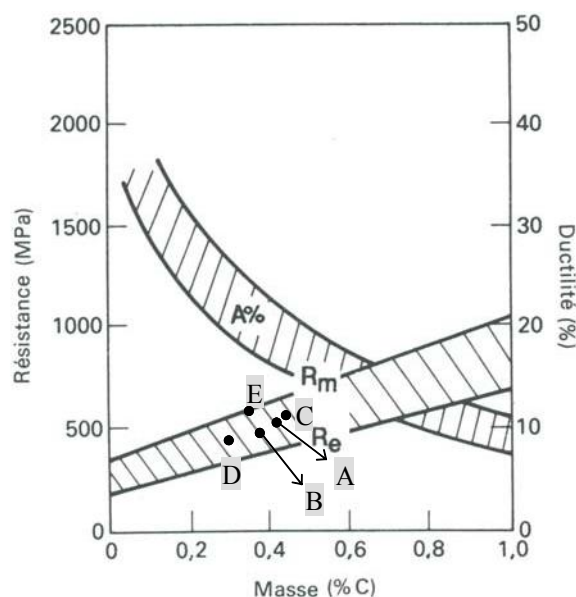


Figure 2-7 : Evolution de la limite d'élasticité en fonction de la teneur en carbone des échantillons.

Compte tenu des résultats présentés, nous pouvons conclure à l'influence d'un facteur lié à l'histoire des aciers pour expliquer l'anomalie constatée sur la coulée E.

Mais avant d'entreprendre l'étude microstructurale des coulées, méthode d'analyse capable de nous renseigner sur l'histoire thermomécanique de nos matériaux, nous allons compléter l'étude des caractéristiques mécaniques par des mesures de dureté.

IV-2-2 Etude de la dureté des armatures

Comme nous l'avons vu plus haut, les mesures ont été réalisées suivant la méthode Vickers sous une charge de 1kg (HV_1) sur des coupes transversales d'armatures polies. L'erreur sur les mesures a été évaluée à $\pm 5 HV_1$.

a) Etude des armatures sénégalaises

Les différents profils enregistrés sur les échantillons testés présentent tous la même allure générale comme le présente la figure 2-8 :

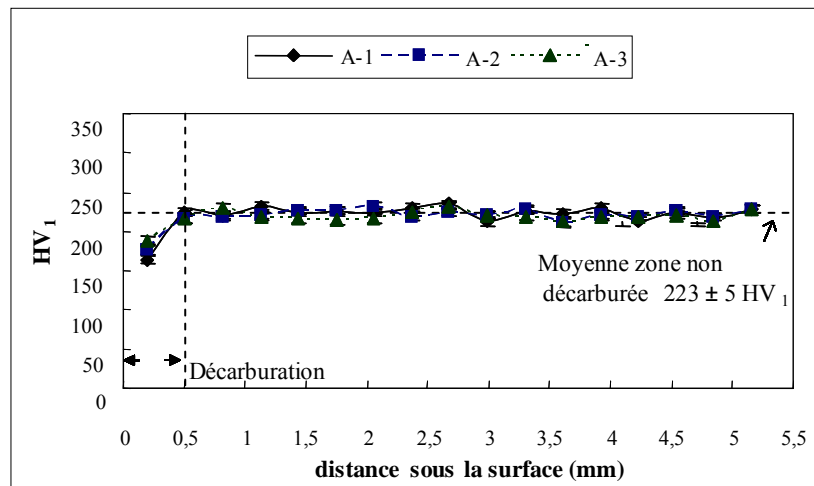


Figure 2-8 : Dureté des trois échantillons de la coulée A.

La dureté, uniforme depuis le centre de l'armature, diminue de façon importante près de la surface (au moins de 15 %), signe d'une décarburation qui sera confirmée par analyse micrographique.

La taille de la zone décarburée est comprise entre 0,5 et 0,8 mm, suivant les échantillons, traduisant un phénomène d'oxydation à chaud important. Rappelons à ce propos que les billettes sont chauffées à 1100 °C avant le laminage à chaud sans protection particulière.

Les profils d'évolution de la dureté des trois échantillons issus d'une même coulée sont, en dehors de la zone décarburée, situés dans une bande moyenne de dispersion assez étroite d'une dizaine de Vickers, ce qui traduit une bonne homogénéité générale du produit. Par exemple pour la coulée A, nous avons pour les trois échantillons 1, 2 et 3 respectivement une moyenne de dureté de $225 \pm 5 HV_1$, $223 \pm 5 HV_1$ et $220 \pm 5 HV_1$. A noter toutefois la présence de quelques zones localement plus dures.

L'analyse des valeurs moyennes des duretés mesurées en dehors des zones décarburées, représentatives des duretés « moyennes » de chaque coulée, rassemblées dans le tableau (2-7) confirme

la bonne cohérence des propriétés mécaniques mesurées suivant les différentes méthodes mises en œuvre. Nous remarquons de plus que la dureté et la limite d'élasticité suivent une même évolution à l'exception de la coulée E

	D-1	D-2	D-3	E-1	E-3	B-1	B-2	B-3	A-1	A-2	A-3	C-1	C-2	C-3
R_e (MPa) ± 10 MPa	455	450	460	600	595	475	475	480	525	530	525	535	520	535
HV ₁ moy. ± 5 HV ₁	200	189	188	292	292	195	201	203	225	223	220	245	241	249
C % masse	0,30			0,35		0,38			0,42			0,44		

Tableau 2-7 : Limite d'élasticité et dureté moyenne des aciers testés.

Cette évolution est bien illustrée par la figure 2-9 qui représente les variations de la limite d'élasticité des matériaux testés en fonction de leur dureté moyenne.

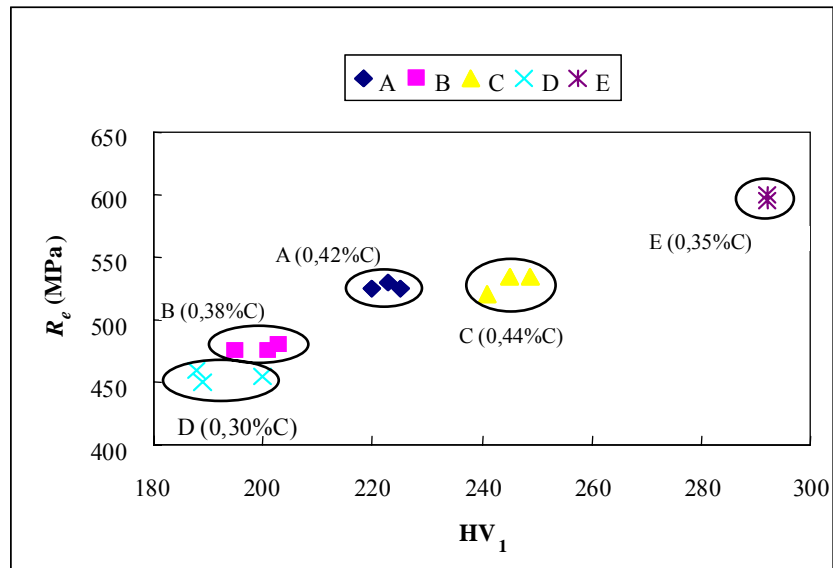


Figure 2-9 : Evolution de la limite d'élasticité de l'ensemble des aciers testés en fonction de leur dureté moyenne.

b) Etude du témoin

Comme nous l'avons vu plus haut, une armature commercialisée en France a été utilisée pour faire la comparaison avec les armatures sénégalaises étudiées. La filiation de dureté sur une coupe transversale de cet échantillon (figure 2-10) se distingue notablement de celles obtenues sur les armatures sénégalaises (figure 2-8).

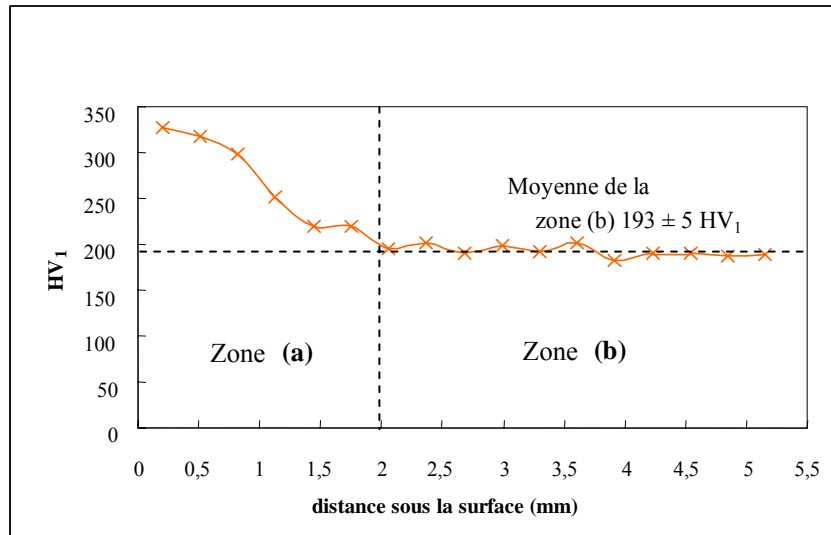


Figure 2-10 : Evolution de la dureté de l'échantillon témoin en fonction de la distance sous la surface.

En partant d'une profondeur d'environ 2 mm sous la surface, la dureté augmente de façon progressive lorsqu'on s'approche de l'extérieur de l'armature (zone a), alors qu'elle est presque constante avec une moyenne de $193 \pm 5 \text{ HV}_1$ au-delà de cette profondeur (zone b). Nous avons ainsi plus de 50% d'augmentation de dureté entre 2 mm ($193 \pm 5 \text{ HV}_1$) et 0,2 mm ($325 \pm 5 \text{ HV}_1$) sous la surface de cet échantillon.

Cette évolution témoigne d'un procédé de fabrication totalement différent de celui utilisé par la SOSETRA, comportant notamment un traitement de durcissement superficiel que nous identifierons au cours de l'examen micrographique.

IV-2-3 Etude microstructurale des armatures

Après polissage et attaque, les échantillons des coulées A, B, C, D et E ont été observés au microscope optique. La figure 2-11 présente les micrographies représentatives des coulées étudiées.

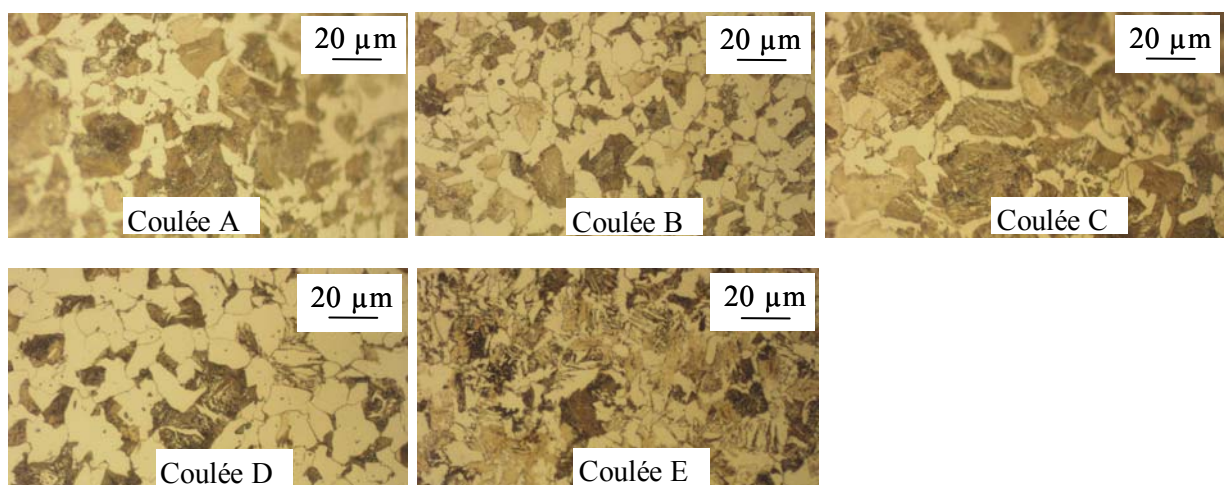


Figure 2-11 : Micrographies optiques des échantillons sénégalais.

La microstructure des différents échantillons est uniforme du cœur à la périphérie. Elle est formée de ferrite (grains clairs) et de perlite (grains sombres) plus ou moins lamellaire, constituants caractéristiques de l'état « recuit » dans les aciers hypoeutectoïdes. La proportion de perlite est maximale dans la coulée C riche en carbone, 0,44 % en masse, et minimale dans la coulée D où la teneur en carbone n'est que de 0,30 % en masse.

On remarquera cependant que la structure micrographique de la coulée E est très différente de celles observées sur les coulées de A à D. Les grains de ferrite sont très petits et évoluent même vers une forme aciculaire caractéristique des refroidissements rapides. La perlite se trouve en quantité anormalement importante, compte tenu de la teneur en carbone de l'alliage (0,35 % en masse) et en comparaison avec la coulée D où le taux de carbone est de 0,30 % en masse.

Ainsi, l'hypothèse d'une histoire thermique ou thermomécanique différente des autres coulées peut être avancée pour expliquer les propriétés particulières de la coulée E.

Le témoin quant à lui présente une structure hétérogène visible à l'œil nu sur la coupe attaquée, matérialisée par la présence d'un anneau sombre situé à la périphérie de l'armature. A fort grossissement, on identifie une structure ferrito perlitique au centre, très riche en ferrite, caractéristique d'un acier à bas carbone, et une structure martensitique à la périphérie comme le montre la figure 2-12. L'identification de ces structures vient confirmer l'évolution de la dureté observée sur une filiation radiale (figure 2-10).

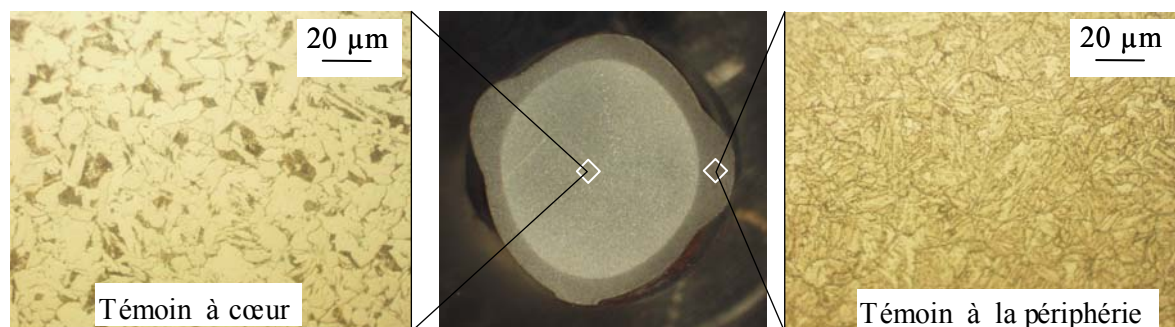


Figure 2-12 : Microstructure de l'échantillon témoin à cœur et à la périphérie.

Nous pouvons conclure que l'observation des microstructures confirme la singularité de la coulée E observée lors de l'évaluation des propriétés mécaniques de l'ensemble des échantillons testés, ainsi que la présence d'un traitement de surface sur l'échantillon témoin, traitement que nous chercherons à identifier.

Pour aller plus loin dans l'investigation et pour vérifier nos hypothèses sur le mode de refroidissement des armatures, une étude des propriétés et de la microstructure des aciers soumis à des cycles thermiques contrôlés a été menée.

IV-2-4 Etude des propriétés des aciers sous l'action de cycles thermiques contrôlés

Pour suivre les effets du cycle thermique et plus particulièrement de la loi de refroidissement sur les propriétés mécaniques et la microstructure des aciers sénégalais, nous avons sélectionné deux échantillons :

- un échantillon de la coulée A (échantillon A-1) car cette dernière a probablement la plus grande teneur en carbone équivalent et un taux de carbone élevé ;
- un échantillon de la coulée E (échantillon E-1) car nous cherchons à identifier la cause de sa singularité.

En parallèle, nous étudierons aussi l'échantillon témoin dont nous savons déjà qu'il a subi un traitement de surface.

Pour conduire cette partie de l'étude, nous avons retenu deux traitements thermiques classiques :

- un traitement de trempe noté T1 (austénitisation 30 mn à 850°C suivie d'un refroidissement à l'eau) conduisant à un état hors équilibre avec transformation de l'austénite en martensite ;
- un traitement de recuit de normalisation noté T2 (austénitisation 30 mn à 850°C suivie d'un refroidissement à l'air) conduisant à une mise à l'équilibre des aciers non alliés, classe à laquelle appartiennent les aciers étudiés.

a) Coulée A

La figure 2-13 montre les micrographies d'un échantillon de la coulée A avant et après les traitements thermiques.

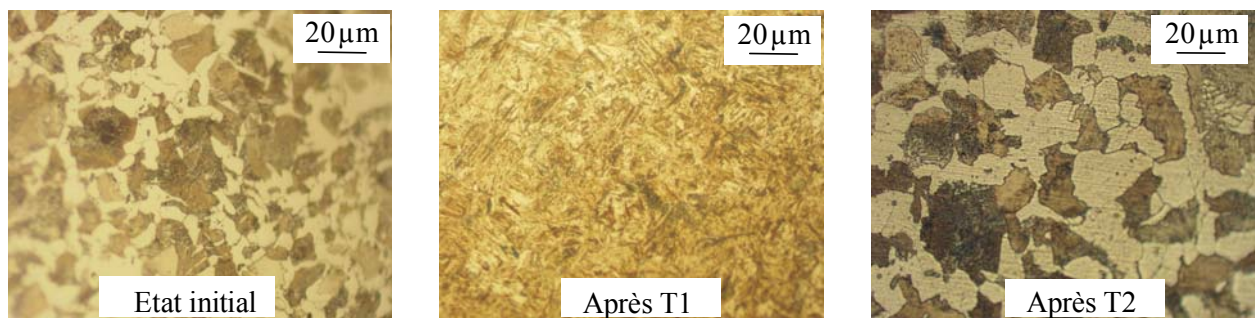


Figure 2-13 : Micrographies de la coulée A avant et après les cycles thermiques.

Après trempe, la structure est complètement martensitique et les aiguilles sont visibles sur la figure 2-13.

Après recuit, la structure ferrito perlitique est conservée. Les grains de ferrite sont cependant mieux formés que dans l'état initial (structure cellulaire) témoignant d'une recristallisation pendant la phase d'austénitisation.

L'évolution de la dureté de la coulée A avant et après les traitements thermiques est représentée par la figure 2-14. On peut observer que les duretés moyennes de l'état recuit (T2) mesurées sur coupe (zone b) montrent un léger adoucissement de la structure par rapport à l'état initial : $200 \pm 5 \text{ HV}_1$ après recuit contre $225 \pm 5 \text{ HV}_1$ l'état initial. La zone de décarburation initiale a disparu.

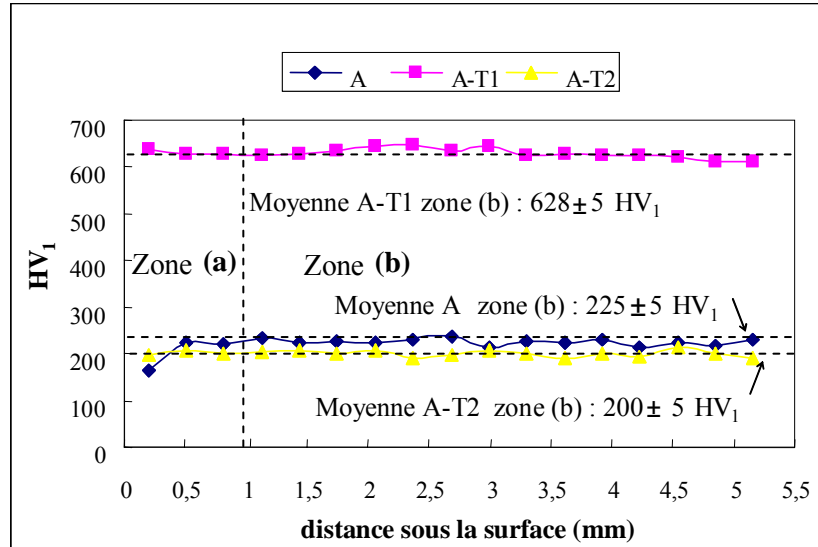


Figure 2-14 : Evolution de la dureté de la coulée A avant et après les cycles thermiques.

A l'état trempé, la structure de la coulée est martensitique comme le laisse entendre la courbe de Transformation en Refroidissement Continu (TRC) de l'acier C45 de composition chimique voisine. La dureté mesurée (628 HV_1), n'atteint cependant pas la valeur que laisse prévoir la littérature (figure 2-15)³⁹, pour un acier à même teneur en carbone (valeur attendue 680 HV_1 pour 0,42 % de C en masse).

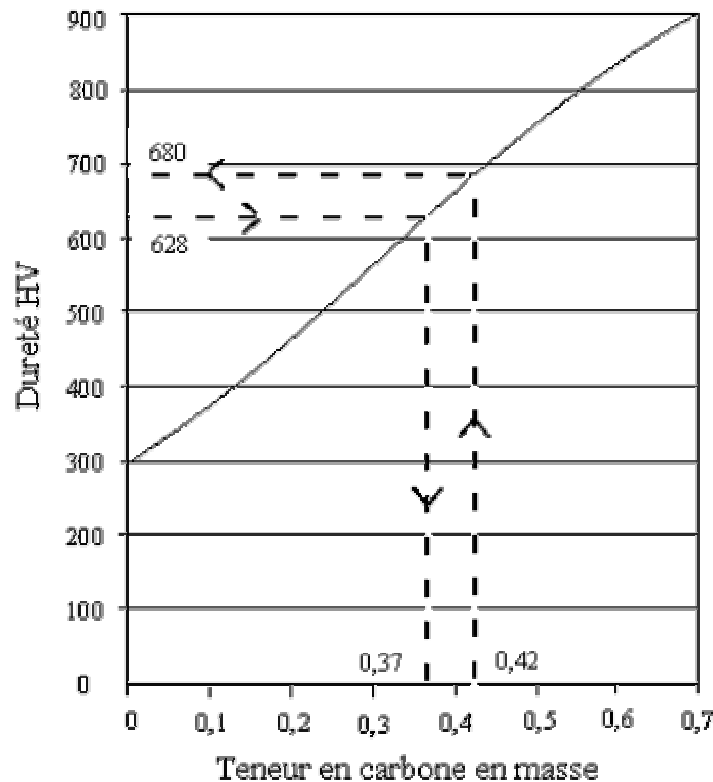


Figure 2-15 : Dureté de la martensite d'aciers à teneur en carbone variable.

³⁹ G. MURRY dans *Techniques de l'Ingénieur, Traité de Matériaux métalliques, Acier pour traitement thermique propriétés et guide de choix*, dossier M 4 530 (2002).

Le faible niveau de dureté atteint sur l'état trempé laisse planer un doute sur le taux de carbone mesuré dans cet alliage. En utilisant la figure 2-15 nous arrivons à une teneur en carbone de 0,37 % au lieu des 0,42 annoncés par le fabriquant.

L'analyse de ces résultats montre que l'état initial de l'armature A n'est pas très éloigné de celui de l'état normalisé.

Nous pouvons supposer qu'il en est de même pour les coulées B, C et D qui présentent le même type de microstructure à l'état initial.

b) Coulée E

Après recuit, la microstructure de la coulée E est constituée de grains de ferrite et de perlite et se présente sous la forme classique de petites cellules (figure 2-16) caractéristiques de l'état recuit. La structure en petits grains, voire aciculaire, observée à l'état initial pour la ferrite a totalement disparu. Ceci démontre que les différences observées sont liées à l'histoire du matériau.

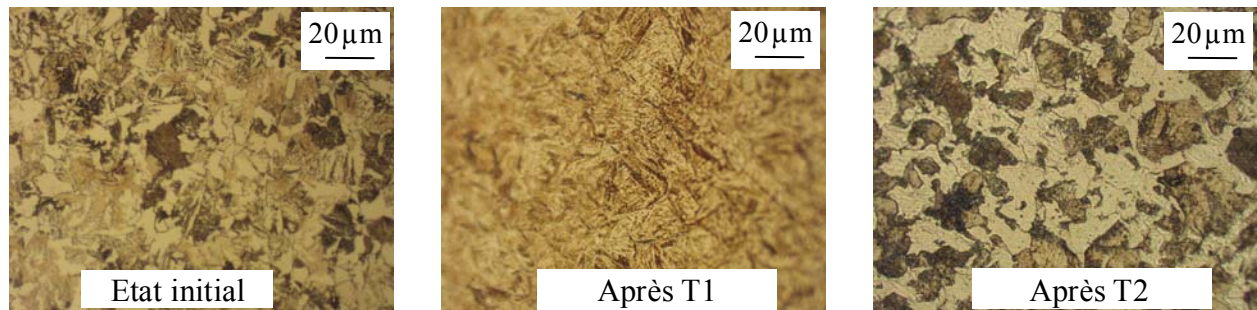


Figure 2-16 : *Microstructure d'un échantillon de la coulée E avant et après traitement thermique.*

Après trempe, la microstructure est formée de martensite (figure 2-16) comme le laissent prévoir les courbes TRC de transformation d'un alliage semblable.

Les duretés mesurées (voir figure 2-17) font apparaître une diminution de l'ordre de 77 HV₁ entre l'état initial et l'état recuit. De plus, la valeur de la dureté à l'état recuit est proche de celle obtenue pour la coulée A.

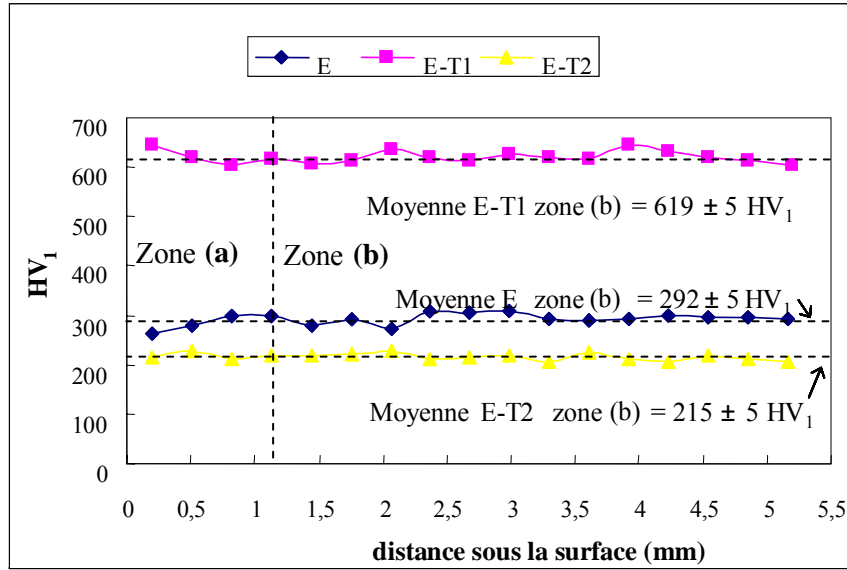


Figure 2-17 : Evolution de la dureté d'un échantillon de la coulée E avant et après traitement thermique.

D'après la figure 2-15, la dureté moyenne atteinte après trempe, $619 \pm 5 \text{ HV}_1$ est caractéristique d'un acier contenant 0,35 % de carbone, une valeur qui est en bon accord avec celle annoncée par le fabricant.

Les valeurs des duretés de l'échantillon E dans les états T1 et T2, proches de celles obtenues sur l'échantillon A confirment le doute que nous avons évoqué quant à la teneur en carbone de la coulée A annoncée par le fabricant. La teneur en carbone réelle de la coulée A devrait donc être voisine de 0,35 % en masse contrairement aux 0,42 % annoncés par le fabricant.

c) Echantillon témoin

Après les traitements de recuit et de trempe, cet échantillon présente des microstructures homogènes sur toute l'étendue de la section de l'armature (figure 2-18). Ceci confirme la présence d'un traitement de surface, que l'étude de l'évolution de la dureté nous avait laissé prévoir.

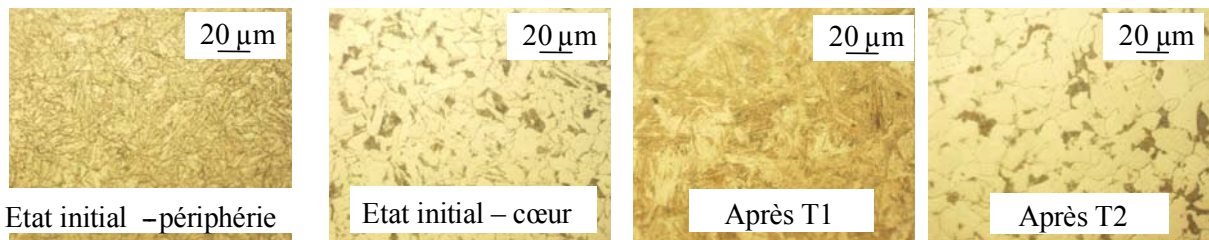


Figure 2-18 : Micrographies de l'échantillon témoin avant et après traitement thermique.

Les mesures de dureté après les traitements T1 et T2 ne font pas apparaître d'augmentation de la dureté près de la surface, ce qui montre qu'il n'y a pas eu modification de la composition chimique de l'acier au voisinage de sa surface (figure 2-19). La dureté moyenne après recuit est inférieure à celle de l'état initial ($193 \pm 5 \text{ HV}_1$ pour l'état initial, $170 \pm 5 \text{ HV}_1$ après T2). La taille des grains de la structure

après recuit, supérieure à celle de l'état initial, peut expliquer la différence par effet « Hall et Petch^{37 40} »

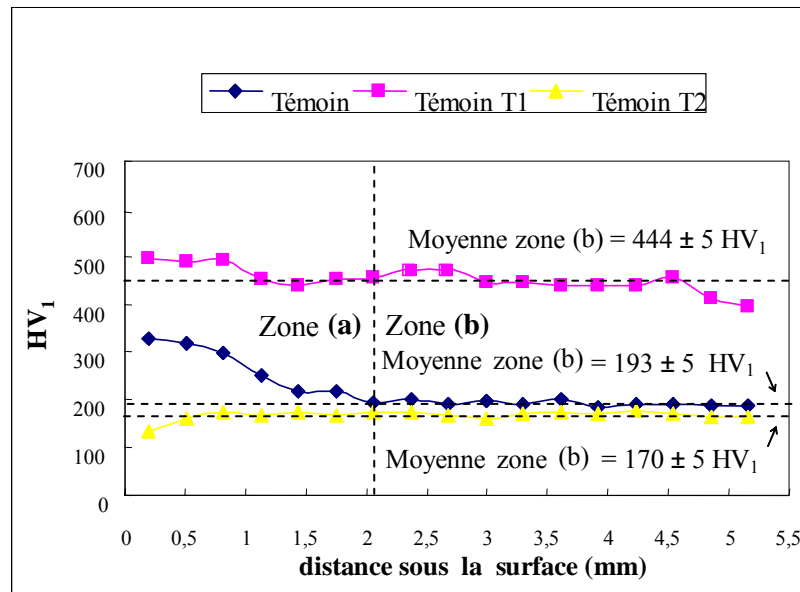


Figure 2-19 : Evolution de la dureté de l'échantillon témoin avant et après traitement thermique.

La dureté de l'armature dans l'état T1 ($444 \pm 5 \text{ HV}_1$) est cependant supérieure à celle obtenue à 0,2 mm sous la surface dans l'état initial ($325 \pm 5 \text{ HV}_1$), ce qui tendrait à prouver que l'acier n'a pas reçu le traitement permettant d'atteindre les valeurs maximales de son durcissement.

De cette analyse, nous pouvons conclure que le traitement de surface pratiqué sur l'armature témoin appartient à la catégorie des traitements avec « transformation de structure cristalline » suivant le classement généralement admis par la communauté des scientifiques et des industriels⁴¹. On peut ici faire l'hypothèse d'un durcissement de trempe superficielle par induction ou d'un traitement de trempe à la sortie du laminoir, alors que l'armature est encore à haute température, réglé de telle façon que le refroidissement, compte tenu de la vitesse de diffusion de la chaleur dans le métal, entraîne la trempe d'une couche superficielle de la barre. Les calories restantes localisées au centre de la barre, en allant vers la surface, provoqueraient alors un revenu de la martensite formée au cours du refroidissement initial. Ceci expliquerait aussi pourquoi les couches de surface de l'armature européenne n'ont pas atteint leur capacité maximum de durcissement.

A l'issue de cette étude des caractéristiques mécaniques et structurales des aciers étudiés, nous pouvons affirmer que la singularité observée sur la coulée E a pour origine l'histoire thermomécanique de l'acier. D'après la bibliographie^{42, 43}, cette histoire intégrerait deux aspects :

⁴⁰ G. BERANGER, G. HENRY, G. SANZ dans *Le livre de l'acier* – Tec et Doc, Paris (1994).

⁴¹ S. AUDISIO, M. CAILLET, A. GALERIE, H. MAZILLE dans *Revêtements et Traitements de surface – fonctionnalités durabilités, procédés*, Collection Sciences Appliquées de l'INSA de Lyon, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, (1999).

⁴² P. FABREGUE dans *Techniques de l'Ingénieur. Traité de Matériaux métalliques, Métallurgie du laminage à chaud*, dossier M 7860 (2000).

i) L'écrouissage à chaud du métal à haute température, réalisé en phase austénitique pour bénéficier de la grande plasticité de ce constituant, et durant lequel un phénomène de recristallisation dynamique intervient. De nouveaux grains prennent naissance à partir de germes créés dans l'austénite écrouie. La cinétique de recristallisation dépend de la température et de la vitesse de déformation du matériau.

ii) Le refroidissement après laminage qui est modifié par les conditions locales, c'est à dire la nature du milieu de refroidissement, l'agitation de ce milieu etc.

La combinaison de ces deux facteurs peut conduire à la formation d'une structure à grains fins présentant une dureté et une limite d'élasticité accrue (loi de Hall et Petch) : lorsque la déformation plastique du métal (liée à la vitesse de laminage et au taux de réduction de section) est associée à un refroidissement rapide à la fin du laminage, les nombreux grains issus de la recristallisation dynamique n'ont pas le temps de se développer au cours du refroidissement final, créant ainsi une structure à grains fins. C'est le scénario que nous pouvons imaginer pour expliquer les modifications microstructurales observées dans la coulée E.

IV-2-5 Défauts dans les armatures

Pour aller plus loin, nous avons expertisé les principaux défauts présents sur les armatures sénégalaises. Ces défauts sont de plusieurs types : replis, décarburation et inclusions. Leur dangerosité a été étudiée par des tests de pliage.

a) Les replis

Les replis de métal (figure 2-20) sont des défauts assez courants dans les armatures de fabrication sénégalaise.

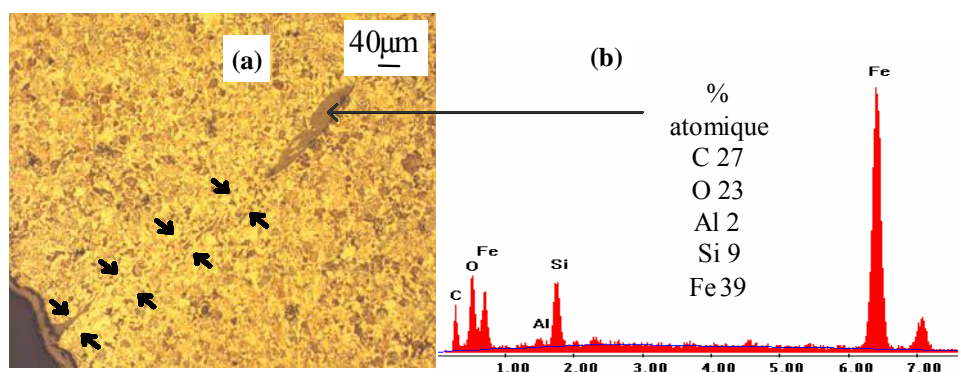


Figure 2-20 : Repli de métal dans un échantillon de la SOSETRA : (a) observation microscope optique et (b) analyse chimique au MEB par EDX.

La taille des replis varie de quelques dixièmes de millimètre pour les plus petits jusqu'à quelques millimètres pour les plus importants (2 mm sur les observations que nous avons réalisées).

⁴³ F. MONTHEILLET dans *Techniques de l'Ingénieur, Traité de Matériaux métalliques, Métallurgie en mise en forme, dossier M 600* (1996).

Leur origine peut être liée à un mauvais étagement des passes de laminage⁴⁴. Ils constituent de véritables entailles dans l'acier portant en elles la trace de l'oxydation durant le réchauffage des billettes précédant le laminage à chaud, car marquées par des oxydes de fer, de silicium ou d'aluminium comme le montre une analyse EDX réalisée dans une entaille (figure 2-20 b).

b) La décarburation

La décarburation est un défaut naturel des aciers résultant d'une réaction chimique entre le carbone de l'acier et l'oxygène de l'air à haute température qui donne naissance à de l'oxyde de carbone gazeux. Les couches superficielles de l'acier exposées à l'air perdent ainsi une partie de leurs atomes de carbone ce qui produit une microstructure ferritique caractéristique (figure 2-21 a).

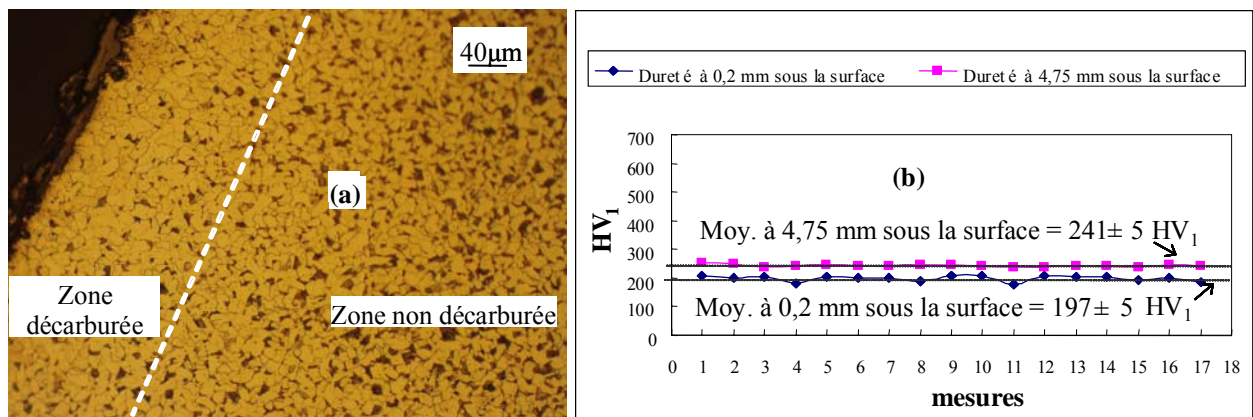


Figure 2-21 : (a) Observation de la décarburation, (b) évolution de la dureté à proximité de la surface (0,2 mm sous la surface) et à cœur (4,75 mm sous la surface).

La décarburation de surface mise en évidence par les mesures de dureté et présente sur tous les échantillons, est observée au microscope optique (figure 2-21). Elle se manifeste par une couche de surface d'une épaisseur de quelques centaines de microns dans laquelle la proportion de ferrite augmente en se rapprochant de la surface, lieu où elle atteint un taux élevé avoisinant 100 %.

Cette décarburation n'est cependant pas uniforme à la périphérie des sections observées. Elle occasionne une dispersion des valeurs de dureté comme le montrent les valeurs obtenues sur des coupes longitudinales d'armatures parallèlement à la surface (figure 2-21 b).

La décarburation peut aussi prendre d'autres formes telles que des langues étroites pénétrant à l'intérieur de l'armature comme le montre la figure (2-22).

⁴⁴ C. BATAILLE dans *Techniques de l'Ingénieur, Traité de Matériaux métalliques, Laminage de produits longs cylindres calibrages défauts, dossier M 7 903* (2003).

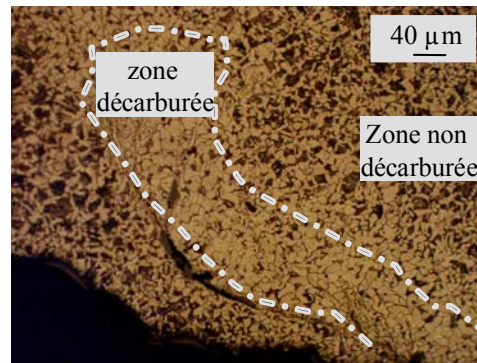


Figure 2-22 : Autre forme de décarburation observée par microscopie optique.

L'origine de cette décarburation peut être clairement établie dans les régions où l'on retrouve des traces d'oxyde restées prisonnières à l'intérieur de ces zones. En effet, une décarburation/oxydation de surface associée à un repli pendant le laminage à chaud conduit à la formation de ce type de défaut. Il est aussi possible que les parois de ces replis se ressoudent pendant le travail du métal faisant alors apparaître une « cicatrice » dans le matériau (voir figure 2-20 entre les flèches).

c) Les inclusions

De grosses inclusions sont visibles dans les armatures sénégalaises, que l'analyse chimique par spectroscopie en dispersion d'énergie nous permet d'identifier : oxydes, sulfures de fer et de manganèse (voir figure 2-23).

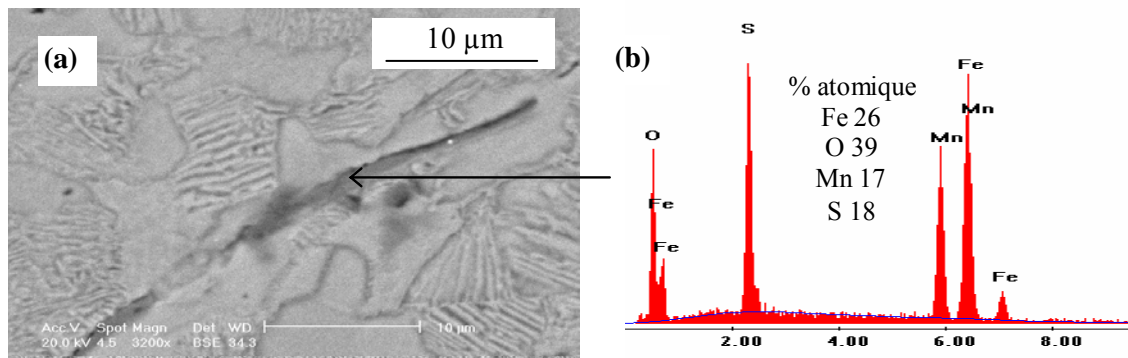


Figure 2-23 : Inclusion dans une armature de la SOSETRA:

(a) observation au MEB et (b) analyse EDX de cette inclusion.

IV-2-6 Le test de pliage

La présence de défauts dans les matériaux est toujours préjudiciable à la fiabilité des structures. Les armatures pour béton armé sont concernées par le problème dans la mesure où elles sont pliées au cours de leur mise en œuvre et soumises par la suite, lorsqu'elles sont intégrées dans les constructions du génie civil, à des sollicitations mécaniques.

Les défauts géométriques à l'origine de ruptures induites par effet d'entaille sont très nocifs et peuvent compromettre la sécurité des constructions. Cependant, les progrès réalisés en mécanique de la

rupture depuis A. Griffith⁴⁵ ont permis de quantifier la dangerosité de « défauts modèles » dans les matériaux en vue de leur utilisation en toute sécurité dans les constructions mécaniques. Il s'agit ici du concept de défaut admissible grâce auquel il est possible de prévoir si un défaut de taille donnée présent dans un matériau conduit ou non à la rupture sous une sollicitation donnée.

Le test de pliage des armatures à béton (conformément aux normes NF EN10080 et NF A35-016) est un moyen d'évaluer cette sécurité d'utilisation. En effet, lors de la flexion imposée au cours du test (l'armature est enroulée autour d'un mandrin de diamètre égal à $2,5 \times d_n$), les défauts présents dans l'armature et plus particulièrement ceux situés en surface, les plus sollicités, vont devenir nocifs à partir d'un certain niveau de contrainte lié au rayon de courbure de l'armature. Le test normalisé impose un rayon de 12,5 mm pour une armature de 10 mm de diamètre nominal. S'il ne conduit pas à la rupture, cela signifie que l'armature ne contient pas de défaut de taille critique.

Pour vérifier la dangerosité des défauts présents dans le matériau (replis, inclusions), un test de pliage a été réalisé sur l'armature issue de la coulée E dont l'allongement à rupture est de 14 %, c'est à dire le plus faible de l'ensemble des échantillons en notre possession.

Dans les conditions du test, la déformation sur la fibre la plus sollicitée est de 23 %, d'après le calcul de résistance des matériaux appliqué à une poutre circulaire de 9 mm de diamètre correspondant à celui de l'armature testée.

Contre toute attente, l'armature ne s'est pas rompue.

Nous concluons qu'aucun des défauts présents dans cette partie de l'armature la plus sollicitée (tronçon de 46 mm correspondant à la longueur d'armature enroulée autour du mandrin), n'avait la taille critique.

L'observation de la partie externe de l'armature a toutefois montré l'existence d'une fissure longitudinale (figure 2-24). Vue au microscope optique sur une coupe transversale, la fissure pénétrant sur près d'un millimètre de profondeur sous la surface se révèle être bordée d'une zone décarburée et ponctuée d'amas d'oxydes comme le montre l'analyse (figure 2-24).

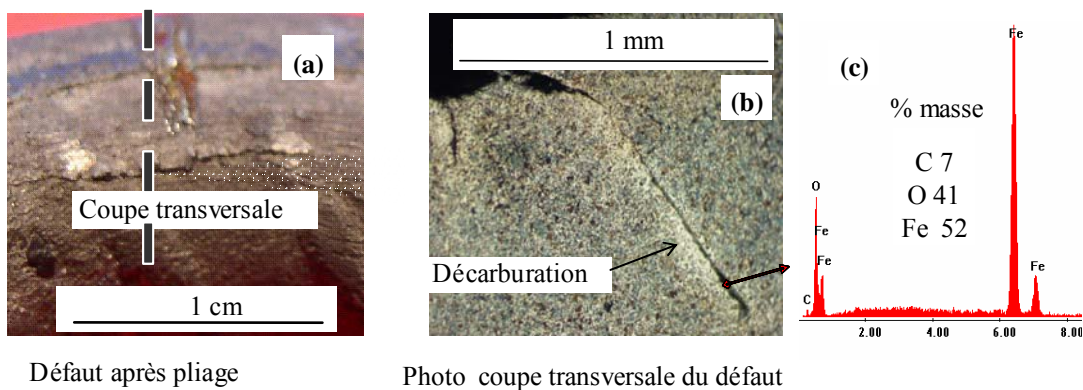


Figure 2-24 : (a) Photographie du défaut à la surface de l'échantillon juste après le pliage, (b) micrographie optique de la coupe transversale du défaut, (c) analyse à EDX du défaut.

⁴⁵ A. GRIFFITH, "The phenomena of rupture and flow in solids", *Phil. Trans. Roy. Soc. London. CCXXI-A* (1920) pages 163-198.

Cette fissure ne présentait donc pas un niveau de nocivité suffisant pour occasionner la rupture. En effet, les contraintes de tension qui s'exercent sur l'armature lors du pliage sont parallèles à la fissure ce qui fait que sa propagation n'est pas favorisée. De plus, la décarburation en surface, en accroissant les capacités de déformation plastique, abaisse le niveau de contrainte atteint dans la zone la plus sollicitée de l'armature et retarde ainsi la propagation du défaut.

V Discussion et synthèse des résultats

Dans cette étude de caractérisation des propriétés mécaniques et structurales des armatures de fabrication sénégalaise, où nous montrons que les propriétés intrinsèques des aciers dont elles sont faites parviennent à compenser leurs variations de section pour respecter les 400 MPa de limite d'élasticité nominale, il apparaît que la maîtrise de la composition chimique des alliages et la gamme de fabrication des armatures sont des paramètres essentiels. Ces deux points sont à notre avis les points faibles de la chaîne de fabrication.

V-1 Maîtrise de la composition chimique

Nous constatons que les aciers étudiés dont la teneur en carbone est comprise entre 0,3 et 0,44 %, ont tous des limites d'élasticité supérieures aux 400 MPa minimales fixées par le fabricant ($450 \text{ MPa} < R_e < 601 \text{ MPa}$). Cette limite d'élasticité est celle que devraient avoir les échantillons si leur diamètre était égal au diamètre nominal de 10 mm. Or, plus on s'écarte de cet objectif par valeurs supérieures, plus l'acier devient fragile. Comme le montre la figure (2-1), se rapportant à l'évolution des propriétés mécaniques des alliages Fe/C de structure ferrito perlitique, un acier ayant une limite d'élasticité de 400 MPa présente un allongement à la rupture compris entre 15 et 20 %. Ce dernier tombe à moins de 12 % lorsque $R_e = 600 \text{ MPa}$. Cet abaissement de la plasticité du matériau peut être dangereuse lors de la mise en forme par pliage des armatures, opération pendant laquelle les fibres externes risquent de se retrouver sollicitées au-delà de leur capacité de résistance maximale, laquelle comme nous l'avons vue, peut être affaiblie par la présence de défauts tels que les replis ou les défauts géométriques de surface.

Partant de la valeur de 23% d'allongement sur la fibre externe d'une armature de 9 mm de diamètre lors d'un test de pliage normalisé, nous constatons, toujours d'après la figure (2-1), qu'un acier pour lequel $R_e = 400 \text{ MPa}$, devrait casser au cours de l'essai. La limite acceptable en se référant à l'allongement à rupture, toujours d'après cette même figure, est comprise entre 350 et 300 MPa. L'acier ferrito perlitique ayant ces propriétés contient alors moins de 0,22% de carbone, valeur proche de celle admise pour la fabrication des armatures européennes. Dans ces conditions, le problème est maintenant reporté du côté de la limite d'élasticité insuffisante. Un compromis doit être établi et fera l'objet d'une discussion dans le paragraphe suivant.

Abaisser la teneur en carbone des aciers issus du recyclage paraît indispensable pour réaliser la combinaison 400 MPa de limite d'élasticité nominale / 10 mm de section pour les armatures, sans avoir à exagérer les caractéristiques intrinsèques des aciers de construction. Plusieurs possibilités peuvent être envisagées pour atteindre cet objectif :

i) Tri des déchets

Faire une sélection rigoureuse des ferrailles recyclées en choisissant des objets en acier à bas carbone (éléments de carrosserie automobile, emballages en acier, matériaux de construction métalliques du génie civil ...) est la seule solution envisageable sans modification du procédé de fabrication. Cette pratique est cependant difficilement applicable compte tenu du faible gisement de matière recyclable dont dispose le Sénégal et du manque de moyens pour faire un tri rigoureux. Par ailleurs, la quantité de ferrailles recyclables à l'issue de ce tri serait limitée, accroissant ainsi le coût de fabrication et les risques de rupture de stock de matière première, d'où des problèmes de compétitivité des produits fabriqués localement par rapport à leurs concurrents issus de l'importation.

ii) Décarburation

La décarburation de l'acier réalisée en phase solide par diffusion dans un milieu oxydant à haute température est une solution techniquement possible, utilisée par ailleurs pour « malléabiliser » les fontes blanches. Nous avons montré ses effets dans l'expertise des armatures sénégalaises et, poussée suffisamment, elle permet d'abaisser la teneur en carbone à des niveaux très bas (moins de 0,02 %) sur des distances qui dépendent du temps de traitement et de la température (la distance de déplacement d'une espèce chimique dans un solide est fonction de \sqrt{Dt} où D est le coefficient de diffusion lié à la température, et t est le temps de diffusion). Dans le traitement de malléabilisation des fontes blanches signalé plus haut, les températures sont de l'ordre de 1000 °C et les temps de traitement de plusieurs dizaines d'heures. Toutefois, une partie du métal de surface s'oxyde aussi, occasionnant une perte de matière par formation d'une couche d'oxyde qu'il faut éliminer par un « écroûtage » avant la transformation du matériau. Cette opération, bien que techniquement possible est difficilement envisageable dans le contexte sénégalais où le coût de l'énergie est très élevé.

iii) Action au niveau de l'élaboration de l'acier

Dans les aciéries, la régulation et le contrôle de la teneur en carbone se fait pendant une phase d'affinage oxydante. Le carbone en solution dans le métal liquide s'oxyde au contact de milieux susceptibles de libérer de l'oxygène. Depuis de nombreuses années, les procédés d'affinage par soufflage d'air ou d'oxygène (convertissage Bessemer, Thomas, à l'oxygène)⁴⁶ sont des méthodes classiquement utilisées dans les industries métallurgiques. Cette opération doit se faire à température élevée car le carbone a une affinité limitée pour l'oxygène comparée à celle des éléments tels le silicium, le manganèse, le fer, le phosphore qui s'oxydent aussi. Ainsi, le carbone passe à l'état de CO ou de CO₂ et s'échappe dans l'atmosphère, abaissant du même coup la teneur en carbone du métal. Les autres éléments cités s'oxydent mais restent dans le bain de métal liquide où ils constituent une scorie ou un laitier dont on peut éliminer la plus grande partie par décantation. L'affinage, lorsqu'il est bien conduit, permet de réguler et de contrôler la composition chimique des aciers.

Envisager une telle modification dans le processus de fabrication est possible sans bouleverser profondément le cycle de fabrication de l'entreprise. Il faut pour cela introduire un poste supplémentaire de traitement après la fusion. Le métal liquide venant du four électrique est versé dans le convertisseur

⁴⁶ D. MEYER dans *Techniques de l'Ingénieur. Traité de Matériaux métalliques, Aciéries de conversion*, dossier M 7 650 (1999).

équipé de son système d'injection d'air ou d'oxygène pour être traité avant d'être transvasé dans la machine de coulée continue.

Des investissements sont nécessaires augmentant le coût de fabrication des armatures produites, mais mettant aussi à la portée de la SOSETRA des possibilités de fabrication d'autres produits (rails de chemin de fer, poutrelles pour les constructions du génie civil, etc.). La société en a-t-elle les moyens ? Les gisements de 8400 tonnes/an d'acier auxquels on peut ajouter les 9600 tonnes/an de fonte, actuellement exportées, qui deviennent exploitables avec cette technique sont-ils suffisants pour alimenter une production économiquement rentable face aux productions marocaines qui approvisionnent toute une partie de l'Afrique de l'Ouest ?

V-2 Maîtrise de la microstructure

Comment atteindre 400 MPa de limite d'élasticité sur un acier contenant 0,22% de carbone ? La solution à ce problème passe par la maîtrise de la microstructure.

Diminuer la taille des grains permet en effet d'augmenter la limite d'élasticité des matériaux (loi de Hall et Petch) sans que l'allongement à la rupture ne soit profondément modifié⁴⁷. Cette maîtrise dépend des conditions de laminage, c'est-à-dire de l'histoire thermomécanique de l'acier constituant l'armature. En effet, lors de la déformation plastique à chaud des aciers (et d'autres matériaux métalliques) apparaît le phénomène de recristallisation dynamique que nous avons évoqué plus haut, phénomène gouverné par :

- l'écrouissage et la vitesse de déformation qui agissent sur la germination de nouveaux grains ;
- la température qui conditionne la cinétique de croissance des cristaux ;
- le temps de maintien de l'acier à cette température, qui agit sur la taille finale des cristaux.

Pour obtenir des grains de petite taille, il faut donc ajuster les paramètres cités de façon à accroître le taux de germination des nouveaux cristaux et limiter le temps de maintien à haute température pour empêcher la croissance des grains. Ceci impose un refroidissement assez rapide en fin de laminage.

Une autre solution consiste à durcir superficiellement l'acier, comme cela a été réalisé sur l'armature européenne que nous avons testée. Il faut ici faire une concession sur l'allongement à la rupture de l'armature car celle-ci sera plus faible après le traitement.

Enfin, l'écrouissage est une solution possible pour augmenter la limite d'élasticité. C'est une méthode utilisée classiquement par les aciéristes européens pour fabriquer les armatures pour béton armé.

⁴⁷ T. SLEBODA, K. MUSZKA, J. MAJTA, P. HALE, R. N. WRIGHT, "The possibilities of mechanical property control in fine grained structure", *Journal of Materials Processing Technology* **177** (1-3), (2006) pages 461-464.

V-3 Méthode pratique de prévision de la limite d'élasticité nominale

Dans le but de contrôler et d'améliorer la qualité des aciers fabriqués au Sénégal suivant le procédé actuel, nous avons élaboré à partir de l'ensemble des résultats fournis par l'expertise des armatures sénégalaises, une méthode pratique qui repose sur une mesure de dureté Vickers. Dans ce but, nous avons établi un diagramme qui met en relation, la limite d'élasticité garantie et la dureté Vickers et qui permet d'anticiper les conditions d'élaboration des armatures (composition chimique et diamètre), de telle sorte que les critères de qualité suivants soient respectés :

- limite d'élasticité garantie $R_{en} = 400\text{MPa}$;
- allongement à rupture minimal $A\% = 14\%$;
- écart relatif de masse linéique $\Delta X_n/X_n = \pm 4,5\%$.

Nous rappelons en effet que pour atteindre la limite d'élasticité nominale de 400 MPa, il est possible d'augmenter le diamètre d_r de l'armature si la limite réelle d'élasticité est trop faible, et en la diminuant dans le cas contraire. Cependant, cette compensation a des limites car les écarts relatifs de masse linéique, en relation directe avec les variations du diamètre réel des armatures, ne doivent pas dépasser la valeur de $\pm 4,5\%$ (suivant le critère que nous avons retenu). Le matériau de construction doit de plus être suffisamment plastique pour que l'armature soit mise en forme par pliage sans risque de rupture brutale, contrainte supplémentaire respectée si son allongement à la rupture est supérieur à 14%.

La méthode s'appuie sur une relation linéaire entre la limite d'élasticité des aciers étudiés et leur dureté Vickers, mesurée sur l'ensemble des échantillons testés et illustrée par le graphe de la figure 2-25.

Pour accorder cette représentation avec l'usage que nous lui réservons dans la suite de ce travail, nous avons converti les valeurs de dureté HV_1 des échantillons en MPa. Afin d'éviter toute confusion dans les notations et leur signification, nous désignerons cette grandeur par H. Les valeurs de dureté HV_1 figurent sur le deuxième axe des abscisses du graphe.

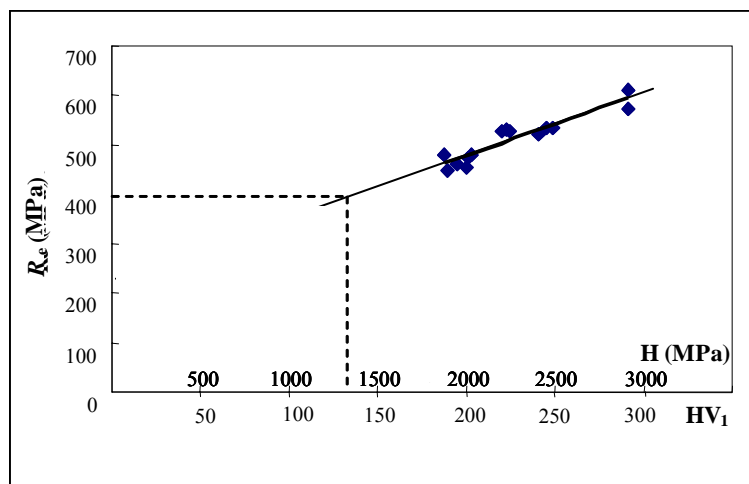


Figure 2-25 : Evolution de la limite d'élasticité des aciers testés en fonction de leur dureté.

La dépendance linéaire entre H et R_e s'exprime par la relation empirique (2-5) spécifique à la qualité des produits fabriqués par l'entreprise, sur l'intervalle des mesures effectuées, soit :

$$R_e = 0,13 H + 220 \quad \text{Équation 2-5}$$

où R_e et H sont exprimées en MPa

Elle prend donc en compte l'ensemble du procédé de fabrication et intègre par conséquent les facteurs métallurgiques liés à l'élaboration et à la mise en forme des armatures. Elle n'a donc pas de valeur universelle, mais peut toutefois être comparée à la relation proposée par Tabor¹⁸ liant ces deux grandeurs, ce que nous nous proposons de faire à la suite de cet exposé.

La limite d'élasticité garantie R_{en} des armatures et la limite d'élasticité R_e de l'acier de construction sont liées par l'équation (2-2) ($R_{en} = R_e d_r^2 / d_n^2$). L'équation (2-5) devient alors :

$$R_{en} = (0,13 H + 220) \cdot d_r^2 / d_n^2 \quad \text{Équation 2-6}$$

Il est donc possible de prévoir le diamètre d_r à ne pas dépasser dans la fabrication d'une armature de limite d'élasticité nominale et de diamètre nominal fixés en utilisant un acier de dureté donnée. Il en résulte que, pour respecter un écart de masse linéique $\Delta X_n / X_n$ de $\pm 4,5\%$, il faut que le diamètre d_r des armatures de 10 mm de diamètre nominal soit compris entre 9,78 et 10,22 mm.

Si l'on veut d'autre part un allongement à la rupture garanti de 14% pour le matériau de construction, sa dureté ne doit pas excéder 300 HV₁, valeur fournie par l'expérimentation.

En admettant par ailleurs que la relation (2-5) est toujours vérifiée jusqu'à $R_e = 375$ MPa, c'est-à-dire pour un acier de dureté 120 HV₁, on peut délimiter sur le graphe une zone dans laquelle l'ensemble des conditions précédemment énoncées est respecté (voir figure 2-26).

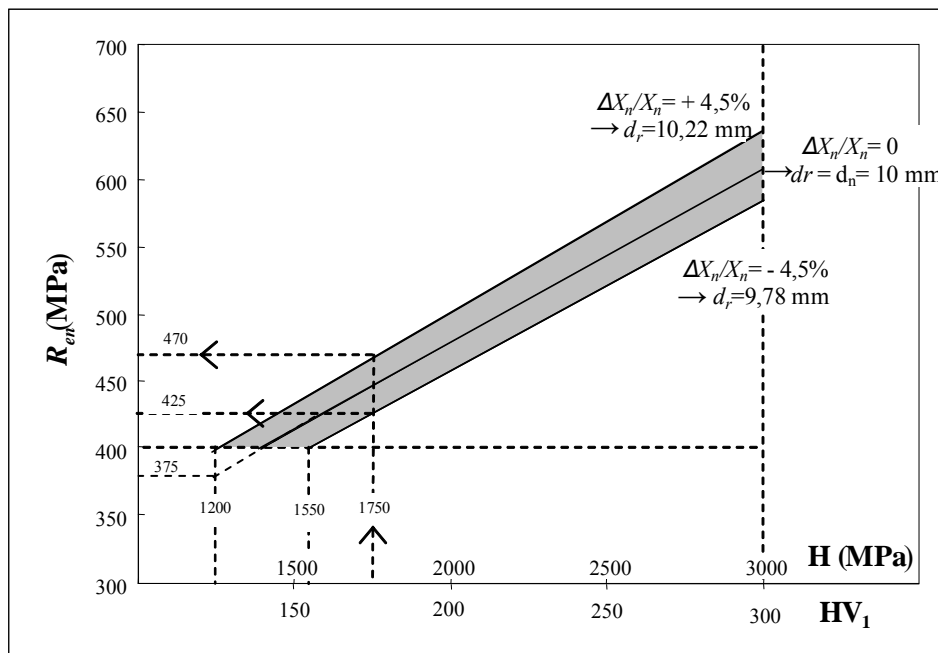


Figure 2-26 : Abaque permettant d'ajuster le diamètre réel d'armatures de 10 mm de diamètre nominal fabriquées dans un acier de dureté H donnée, pour une limite d'élasticité garantie de 400 MPa et un allongement à rupture garanti de 14%.

Ainsi, au plan pratique, la mesure de la dureté d'un échantillon d'acier prélevé dans le four d'élaboration (à condition que celui-ci ait une microstructure comparable à celle des armatures) permet d'envisager plusieurs cas :

- lorsque la dureté est comprise dans l'intervalle 1200 MPa – 3000 MPa, la coulée peut être utilisée en l'état car toutes les armatures de 10 mm de diamètre nominal seront en mesure de respecter la limite d'élasticité garantie de 400 MPa moyennant le choix d'un diamètre convenable ;
- dès l'instant où la dureté sort de cette zone admissible par valeurs supérieures, il faut ajuster la composition chimique de l'alliage de façon à abaisser sa teneur en carbone (ajout de déchets d'acier à faible teneur en carbone) pour le rendre moins résistant. Dans le cas où cette dureté est inférieure aux valeurs admissibles, il est nécessaire d'ajouter de la fonte riche en carbone au métal en fusion pour rehausser le niveau de résistance.

Si l'entreprise décide de produire une armature du même type ayant une limite d'élasticité de 500 MPa, ce graphique pourra encore l'aider. Par exemple, une coulée qui donne une dureté de 1750 MPa (175 HV₁) ne pourra pas servir à la production de cette armature car le graphe donne $R_{en\ min.} = 425\ MPa$ et $R_{en\ max.} = 470\ MPa$. La SOSETRA devra donc élever la teneur en carbone de cette coulée

Le graphe que nous proposons devient donc un outil de conduite du procédé de fabrication des armatures de 10 mm de diamètre nominal dans les conditions mises en œuvre par la SOSETRA.

Nous pouvons cependant nous poser une question : nos résultats s'appliquent-ils à des armatures de diamètres nominaux différents ?

Assurément puisque les résultats reposent sur une propriété caractéristique du matériau à savoir sa limite d'élasticité. Donc, pour toutes les coulées de microstructure voisine de celle de nos échantillons, nos résultats sont applicables.

Nous allons donc essayer de généraliser nos résultats à d'autres diamètres nominaux. Pour cela considérons une armature de diamètre d_r différent du diamètre nominal, situation que l'on peut lier aux conditions de fabrication. On peut écrire :

$$d_r = d_n + (d_r - d_n)$$

$$d_r/d_n = [d_n + (d_r - d_n)]/d_n = 1 + \Delta d_n / d_n = 1 + \frac{1}{2} \Delta X_n / X_n \quad \text{Équation 2-7}$$

Ainsi l'équation 2-6 devient :

$$R_{en} = (0,13\ H + 220) \cdot (1 + \frac{1}{2} \Delta X_n / X_n)^2 \quad \text{Équation 2-8}$$

Cette relation, indépendante du diamètre nominal, montre que le graphe de la figure 2-26 peut être utilisé pour toutes les armatures, de microstructure semblable à celle de nos échantillons, produites par le fabricant.

Dans l'étude du comportement mécanique des matériaux métalliques, les auteurs font souvent référence à la relation $H \approx 3 Y$ proposée par Tabor⁴⁸ relative à des matériaux écrouissables, dans laquelle Y est la limite d'élasticité du matériau et H la dureté Vickers exprimée en MPa.

La relation empirique que nous avons établie précédemment, $R_{en} = 0,13 H + 220$, s'en écarte notablement. Pourquoi ?

La caractéristique Y prise en compte dans cette relation est, pour des matériaux ductiles qui nous intéressent, la contrainte amenant une déformation plastique résiduelle de 8% au cours d'un essai de traction. Ce taux de 8% correspond à la déformation plastique (déformation « vraie ») autour de l'indent engendrée par un essai de dureté Vickers sur un matériau écrouissable tel que les aciers du Sénégal.

Le graphe des couples de valeurs de la caractéristique Y (mesurée à $\varepsilon = 8\%$) et de la dureté H (figure 2-27) fait maintenant apparaître une relation linéaire de la forme :

$$H = 2,83 Y$$

Équation 2-9

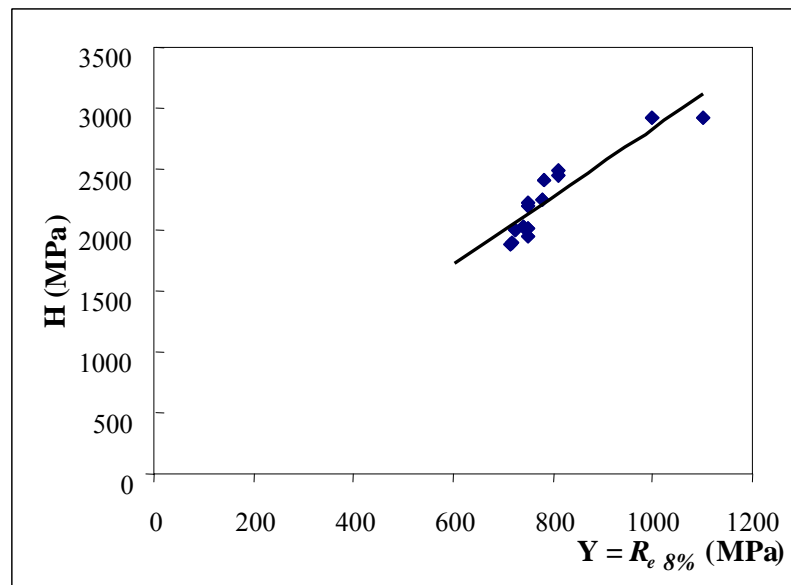


Figure 2-27 : Evolution de la dureté H (MPa) des armatures testées en fonction de leur limite d'élasticité à 8 %.

Cette relation vérifie à 6% près celle établie par Tabor. La variation observée peut être consécutive à une mauvaise isotropie des armatures (paramètre fondamental dans la relation de Tabor), une grande hétérogénéité de la composition de nos aciers (perlite, ferrite, inclusion, décarburation ...), à la présence de défauts localisés, ou bien encore à un effet de surface lié à l'utilisation d'une charge trop petite lors de l'essai de dureté (nous avons utilisé 1 kg de charge alors que l'essai normalisé de dureté préconise 30 kg).

⁴⁸ D. TABOR, "The hardness of solids", *Review of Physics in Technology* **1** (1970).pages 145-179.

Conclusion

Au Sénégal, les déchets d'acier sont transformés en armatures pour béton armé par la SOSETRA. Dans l'étude des armatures à haute adhérence de 10 mm de diamètre nominal que cette société fabrique, nous montrons que la production est de qualité inégale car la limite d'élasticité nominale de 400 MPa garantie par le fabricant n'est pas toujours respectée.

Nous avons observé que ces armatures présentent plusieurs défauts (décarburation, replis d'oxydes etc.) et ont une section systématiquement plus faible que le diamètre nominal annoncé (de 6 % à 11 % inférieur). Si cette pratique est intéressante pour l'entreprise sur le plan commercial, car elle économise de la matière, cela l'oblige en contrepartie à élaborer des aciers avec une teneur en carbone élevée et présentant par conséquent une capacité de déformation plastique plus faible. Nous montrons qu'une teneur en carbone de 0,22 % en masse permettrait d'atteindre l'objectif en maîtrisant la microstructure des aciers qui devraient être à grains fins.

Pour parvenir à ce but, nous suggérons l'introduction d'une étape d'affinage oxydante dans le processus d'élaboration de l'acier, seule capable de répondre efficacement au problème. Ce nouveau dispositif permettrait, du même coup, de traiter une plus grande quantité de ferrailles, incluant notamment des fontes actuellement exportées en presque totalité. La rentabilité d'un tel investissement reste toutefois à démontrer compte tenu des conditions d'exploitation de l'entreprise et du coût très important de l'énergie.

En attendant cet éventuel investissement, un graphe reliant la limite d'élasticité nominale des armatures et leur dureté est proposé. Il tient compte aussi des normes européennes concernant deux paramètres actuellement non contrôlés au Sénégal : l'écart à la masse linéique nominale et l'allongement à rupture. Ce graphe devrait aider l'entreprise à améliorer la qualité de ces armatures, qualité qui peut être estimée à l'avance grâce à une simple mesure de dureté.

Notre étude nous a aussi permis de discuter de la conformité de nos résultats avec la relation de Tabor $H \approx 3 Y$, largement utilisée dans le domaine de la mécanique.

Chapitre 3

TRANSFORMATION DES DECHETS D'ALUMINIUM AU SENEGAL

SOMMAIRE

Introduction	64
I Pratique artisanale de la fonderie au Sénégal.....	65
I-1 Technique utilisée	65
I-2 Analyse critique du procédé de fabrication.....	66
I-2-1 Analyse des paramètres techniques	67
I-2-2 Analyse du milieu socio professionnel	74
II Étude bibliographique.....	76
II-1 Le contexte réglementaire européen.....	76
II-2 Le transfert de matière des ustensiles en aluminium	77
III Étude de la qualité métallurgique des alliages artisanaux	78
III-1 Protocole expérimental.....	78
III-1-1 Les échantillons.....	78
III-1-2 Tests et analyses.....	79
III-2 Résultats expérimentaux	79
III-2-1 Analyse chimique des échantillons	79
III-2-2 Étude de la microstructure des alliages	82
III-2-3 Caractérisation mécanique des alliages.....	91
IV Résistance à la corrosion en milieu culinaire	91
IV-1 Procédure expérimentale.....	91
IV-2 Résultats qualitatifs : étude de la microstructure des échantillons	94
IV-3 Résultats quantitatifs : profilométrie 3D et pertes de masse	96
IV-4 Analyse chimique des substrats de corrosion.....	100
IV-5 Analyse des résultats.....	101
IV-5-1 Etude du mécanisme de la corrosion de nos échantillons	101
IV-5-2 Perte de masse des échantillons	105
IV-5-3 Le transfert de matière aux aliments	108
V Discussion des résultats.....	109
V-1 L'alimentarité des alliages artisanaux	109
V-1-1 Qu'en est-il de l'alimentarité des matériaux testés ?	109
V-1-2 Transfert des autres éléments contenus dans l'alliage.....	110
V-2 Contribution au projet A.I.F./C.T.I.F./Direction de l'Artisanat	112
Conclusion	113

Introduction

La fonderie artisanale est une activité traditionnelle dans les pays africains. C'est aussi une des méthodes permettant de mettre en forme la matière de façon économique car le travail des métaux massifs nécessite des moyens matériels dont seules les entreprises industrielles disposent en Afrique. Cette activité reste l'apanage du secteur artisanal qui, en dépit de moyens très limités, arrive à produire des objets assez complexes. Les seuls matériaux à sa portée sont le plomb, l'étain, l'aluminium et ses alliages et les bronzes qui, grâce à leur point de fusion assez bas (inférieur à 900°C)⁴⁹, peuvent être fondus à l'aide de techniques rudimentaires reposant sur la combustion du charbon de bois, omniprésent, même dans les régions d'Afrique les plus arides.

Les débouchés de ce type de transformation sont limités :

- statuettes à vocation décorative, récipients de faibles contenances, éléments d'instruments de musique, etc. pour ce qui concerne l'utilisation du bronze ;
- ustensiles de cuisine à la base de l'équipement des ménages au Sénégal, pièces mécaniques simples, éléments décoratifs pour ce qui concerne l'aluminium et ses alliages.

Les artisans sont souvent issus de milieux défavorisés et ont un faible niveau scolaire car, au Sénégal, l'artisanat est généralement réservé aux enfants en échec scolaire. Leur travail leur permet à peine de subvenir à leurs besoins. Ce secteur ne peut donc pas être considéré comme un ascenseur social, malgré le fait qu'il tienne un rôle important dans l'économie sénégalaise⁵⁰. C'est pour remédier à cette situation que l'état compte en faire un outil de promotion économique et sociale dans les années à venir avec l'édification de villages artisanaux régionaux inscrits dans le projet d'aménagement de la plateforme de Diamniadio (2 500 hectares de terrain à 35 km de Dakar), dont 80% seront destinés à accueillir des activités industrielles, artisanales, commerciales et touristiques⁵¹.

Actuellement, les artisans fondeurs sont regroupés en une association (Association des Fondeurs Artisanaux du Sénégal) afin de faciliter les contacts avec les partenaires du développement (nationaux et internationaux) et renforcer leur solidarité en cas de maladie ou d'accident de travail, car ils n'ont pas de couverture sociale. Les artisans fondeurs sont présents dans toutes les villes du Sénégal où ils se regroupent en général pour occuper, le plus souvent illégalement, des terrains de l'espace public. Ces quartiers, qui n'ont pas d'existence légitime, sont dénommés « quartiers des fondeurs ». Ceux avec qui nous avons collaboré dans le cadre de notre étude occupent un terrain d'environ 3 hectares dans le quartier de Colobane dans la banlieue de Dakar, qu'ils partagent avec des mécaniciens, des menuisiers métalliques et des commerçants de déchets métalliques.

La fabrication des ustensiles de cuisine n'est soumise à aucun cahier des charges précis. Toutefois, les produits fabriqués doivent résister au feu et aux sollicitations mécaniques engendrées par

⁴⁹ J. BARRALIS, G. MADER dans *Précis de métallurgie : Elaboration structures - propriétés et normalisation*, AFNOR NATHAN (1995).

⁵⁰ Ministère de l'Artisanat et de l'Industrie du Sénégal, Agence pour la Promotion et le Développement de l'Artisanat (APDA), "Plan d'opération stratégiques de l'APDA" 2004-2008.

⁵¹ M. Macky SALL, premier ministre du Sénégal, "Discours de politique générale devant l'Assemblée Nationale" le 20 octobre 2004.

leur manipulation, tout en ayant une durée de vie moyenne d'une dizaine d'années. Le produit fabriqué doit aussi être bon marché compte tenu des faibles revenus de la clientèle. C'est ainsi qu'à l'exception de quelques commandes, le prix de vente du kilogramme d'aluminium travaillé ne dépasse guère 1000 francs CFA (1,5 euros).

La matière première est, comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, constituée exclusivement de métaux de récupération. Compte tenu de l'absence de réglementation concernant la collecte, la transformation et l'utilisation des produits issus du recyclage des déchets, des risques existent quant à la dangerosité des alliages produits lorsqu'ils sont utilisés à des fins alimentaires. En effet, la plupart sont réalisés à partir de matériaux d'origine mécanique et les contacts répétés et prolongés avec l'alimentation peuvent engendrer des phénomènes de corrosion à l'origine d'un transfert de matière de l'alliage vers l'aliment.

Dans ce contexte, les objectifs de cette partie de l'étude sont donc :

- évaluer la qualité de fabrication des ustensiles de cuisine et leur résistance à la corrosion en milieu alimentaire et la comparer avec celle de produits industriels soumis à des normes de fabrication et d'utilisation ;
- apporter dans la mesure du possible des améliorations ou identifier des voies permettant d'accroître cette qualité.

Pour ce faire, il est nécessaire de :

- connaître et identifier les pratiques artisanales dans le domaine de la fonderie au Sénégal ;
- identifier et étudier les matériaux élaborés tant sur le plan de la composition que de la microstructure afin d'évaluer leur qualité ;
- conduire des tests de corrosion en milieu alimentaire pour simuler l'utilisation des ustensiles et des matériaux qui la composent ;
- juger de l'importance des transferts de matières au cours de ces tests ;
- rapprocher ces résultats des études de toxicité des éléments de façon à essayer d'évaluer la dangerosité ou non de l'utilisation de tels matériaux.

C'est ainsi qu'après avoir décrit et analysé la pratique artisanale de la fonderie au Sénégal, nous étudierons la qualité métallurgique des alliages produits par les fondeurs, avant de nous intéresser au comportement de ces alliages en milieu culinaire.

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés aux marmites, produits de grande diffusion au Sénégal, dont l'utilisation conduit à des contacts prolongés avec les aliments, ce qui n'est pas le cas des ustensiles de type louche, écumoire, etc.

I Pratique artisanale de la fonderie au Sénégal

I-1 Technique utilisée

La technique de mise en œuvre utilisée est celle de la fonderie en moules non permanents (sable

silico argileux). Comme nous l'avons vu, elle produit de façon totalement artisanale principalement des marmites (figure 3-1) à partir des alliages d'aluminium de récupération.



Figure 3-1: *Exemple de marmite sénégalaise.*

Par sa qualité de fabrication, elle démontre le savoir faire des ces artisans qui tirent la plupart de leurs connaissances de leurs expériences.

La pratique artisanale se décline en plusieurs étapes décrites dans l'annexe III-1.

- les déchets d'aluminium collectés, dont la plupart sont issus de pièces d'automobile usagées, sont acheminés chez le fondeur. Celui-ci compose une "charge" à partir de déchets qu'il sélectionne pour élaborer un alliage résistant mécaniquement ;
- la charge, placée dans un creuset fabriqué à partir d'un morceau de tôle d'acier prélevée dans un fût, est amenée à la fusion par la combustion du charbon de bois ;
- le moule, réalisé d'après un modèle de marmite, est obtenu par densification manuelle du sable naturel silico-argileux. Il est réalisé en deux parties qui s'emboîtent parfaitement au niveau d'un plan de joint situé sur rebord supérieur de la marmite (plan de contact de la marmite avec son couvercle) ;
- la coulée se fait à la louche après avoir "décrassé" le bain de métal fondu, retiré les morceaux d'acier éventuellement inclus dans les déchets solides avant fusion et "affiné" l'alliage, pratique très peu connue, relevant même du secret de fabrication, par l'addition de sel de cuisine, de sacs plastiques, de tuyaux pvc, etc. ;
- après solidification de l'alliage, les pièces sont décochées et préparées en vue de leur commercialisation (ébavurage, usinage manuel des surfaces extérieure et intérieure, etc.).

La production est déclinée en marmites de tailles différentes classées en 10 catégories (annexe III-1) allant du récipient de 1 kilo à celui de 30 kilos.

Avant de passer à l'étude de la qualité des produits finis qui constitue le cœur de notre chapitre, nous allons rapidement faire une analyse critique de ce procédé de fabrication.

I-2 Analyse critique du procédé de fabrication

Cette analyse s'effectuera en deux parties. Dans la première, nous ferons une analyse qui

s'intéressera à l'ensemble des paramètres techniques qui influent sur la qualité des produits moulés, depuis le procédé jusqu'à l'élaboration de l'alliage en passant par la qualité du sable utilisé et en particulier son vieillissement. Dans la deuxième partie nous analyserons le contexte socioprofessionnel dans lequel évoluent les artisans ainsi que son influence sur la qualité des produits.

I-2-1 Analyse des paramètres techniques

a) Procédé de moulage

La technique du moulage au sable pratiquée par les fondeurs du Sénégal est très classique. Elle est remarquablement bien utilisée et mise en œuvre bien qu'elle n'ait pas bénéficié des progrès et des connaissances accumulées depuis longtemps par les sociétés industrialisées faute de moyens. Ceci est certainement le fruit d'une longue expérience optimisée au fil du temps sur une gamme de produits donnée. Pour évaluer le degré de performance de la technique mise au point par les artisans fondeurs sénégalais, nous pouvons nous référer à un critère significatif : l'épaisseur minimale des parois des pièces élaborées par fonderie.

Fabriquer des pièces présentant de faibles épaisseurs par la fonderie est un exercice délicat lorsque la seule énergie disponible pour remplir le moule tire son origine de la gravité. Ainsi, lorsque l'épaisseur de paroi est trop faible, le moule ne se remplit pas correctement.

L'abaque de Roinet⁵² (figure 3-2) permet d'évaluer cette épaisseur minimale en fonction d'un paramètre de forme (D) calculé à partir des dimensions de l'objet à réaliser. Par exemple, pour une marmite de 1 kg (210 x 120 x 4 mm d'épaisseur), le paramètre d'encombrement D est d'environ 337 cm, et l'épaisseur donnée par l'abaque (pour un alliage de type Al-Si 13) est d'environ 4,7 mm alors que celle réellement mesurée sur la marmite est de 4 mm.

D'une manière générale, les épaisseurs mesurées sur les marmites sont inférieures à celles extraites de l'abaque (voir tableau 3-1).

Contenance marmite	1 kg	1,5 kg	2 kg	3 kg
Épaisseur réelle (en mm)	4	4	4	5
Épaisseur abaque (mm)	4,6	5,5	5,5	5,8

Tableau 3-1 : Comparaison entre épaisseurs de parois mesurées sur les marmites et prévues par l'abaque de Roinet .

⁵² G. FACY et M. POMPIDOU dans *Précis de Fonderie, méthodologie, production et normalisation*, AFNOR (1983).

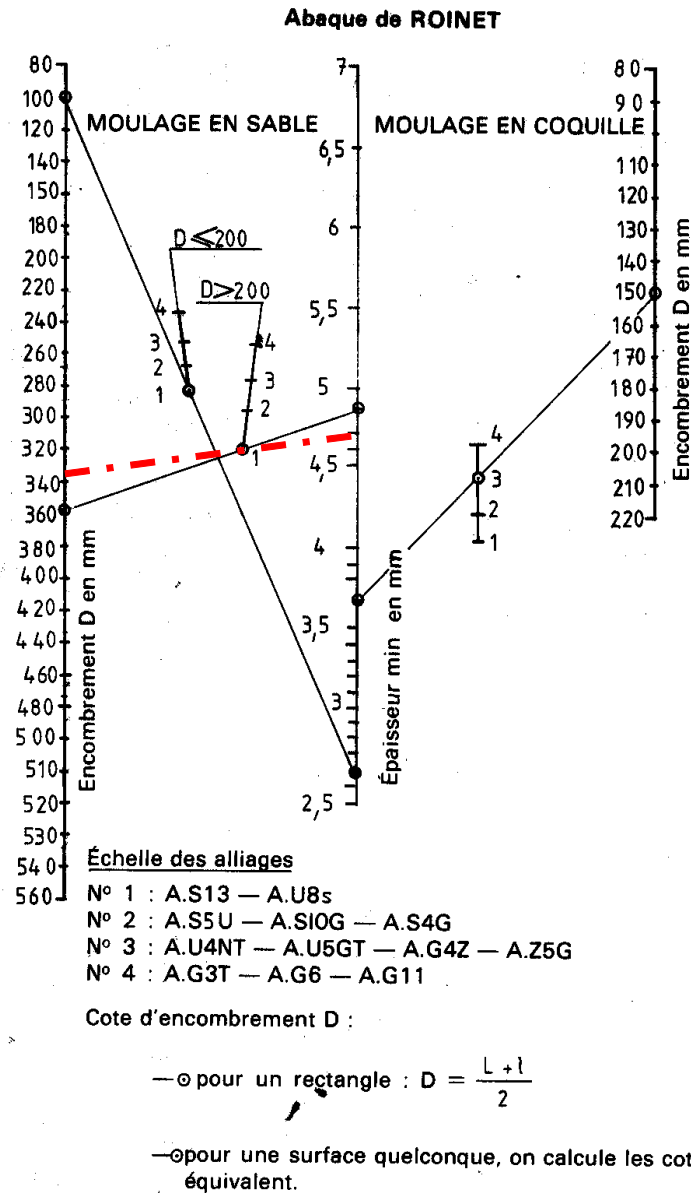


Figure 3-2 : Abaque de Roinet .

Nous pouvons en conclure que du point de vue de l'épaisseur, la méthode a très bien été optimisée par les artisans sénégalais. En contrepartie, d'autres paramètres ont pu avoir été négligés voire sacrifiés. Nous pouvons évoquer à ce propos la qualité métallurgique du métal élaboré, point sur lequel nous allons porter notre attention dans la suite de ce travail.

b) Sable de fonderie

Position du problème

Les sables utilisés en fonderie pour la fabrication des moules ont des propriétés spécifiques

permettant de garantir la qualité des objets fabriqués^{52,53}. Ce sont tout particulièrement :

- la réfractarité ;
- la résistance au choc thermique ;
- une faible dilatation thermique ;
- la cohésion ;
- la plasticité ;
- la perméabilité ;
- la granulométrie ;
- l'aptitude au recyclage.

En effet, le moule doit reproduire le plus fidèlement possible la forme et les détails du modèle, ne doit pas se détériorer ou réagir au contact du métal en fusion, doit être perméable aux gaz, pour ne citer que ces principales fonctionnalités.

Pour assurer la cohésion du moule, les grains de sable (chromite, zircone, silice, etc.) de diamètres convenables (0,1 mm à 1 mm suivant l'état de surface voulu sur la pièce finale) doivent être liés les uns aux autres. Ces liants peuvent être organiques (huile de lin, amidon, sucre, etc.), synthétiques (urée, formol, résines) ou naturels (argile)^{52, 53}. Au Sénégal, le matériau de moulage utilisé par les artisans fondeurs est le sable naturel silico-argileux.

En cours d'utilisation (c'est-à-dire au cours des réutilisations successives, car ce matériau est recyclable), le sable de moulage perd peu à peu ses propriétés. Le liant se modifie car le sable se charge en impuretés (principalement de la cendre de charbon de bois ajoutée pour servir d'interface entre le moule et le métal liquide). Cette dégradation progressive de la qualité du sable de moulage se manifeste par l'apparition de défauts sur les pièces⁵⁴. Malgré leur manque de moyens, les fondeurs ont conscience de cette évolution et se fient, une fois de plus à leur expérience et leur savoir faire pour s'y adapter. Pour palier cet inconvénient, le sable est recyclé et mélangé à du sable neuf dès lors que le fondeur constate une perte de ses propriétés. Cette régénération d'une partie du sable est en général privilégiée par rapport à un renouvellement complet de l'ensemble par du sable neuf.

Pour aller plus loin, dans ce travail nous avons porté un regard scientifique sur l'évolution du sable de fonderie utilisé à Dakar par les fondeurs du quartier de Colobane. Des tests mécaniques permettent en effet de mesurer les propriétés des sables de fonderie et de suivre leur évolution dans le temps.

Étude du sable utilisé en fonderie à Dakar

Comme nous venons de le voir l'artisan, n'a aucun moyen d'évaluer la qualité de son sable hormis ses connaissances empiriques et ses appréciations subjectives. Au lieu d'attendre que des défauts

⁵³ P. JASSON dans *Techniques de l'Ingénieur Traité de métallurgie, Sables et matériaux de moulage de fonderie*, dossier M 754 (1989).

⁵⁴ J.J. PERRIER et S. JACOB dans *Techniques de l'Ingénieur, Fonderie d'aluminium : défauts et conception des pièces*, dossier M 3 638 (2004).

imputables à la qualité du sable apparaissent sur les objets pour changer le sable, il est possible de déterminer, par une analyse de l'évolution des propriétés du sable au cours du temps, à quelle fréquence il est nécessaire de changer une partie du sable.

Nous allons pour cela nous appuyer sur deux essais normalisés présentés en détails dans l'annexe III-2 : l'essai de « l'équivalent de sable, (ES) » (NF EN 933-8) et celui de « la granulométrie par tamisage » (Norme P18-560).

La granulométrie d'un sable permet d'avoir une distribution de la dimension moyenne de ses grains, exprimée en pourcentage de sa masse totale. Elle permet de définir, entre autres, 2 classes granulaires qui sont le sable fin ($20 \mu\text{m} < \text{diamètre des grains de sable} \leq 200 \mu\text{m}$) et le sable grossier ($200 \mu\text{m} < \text{diamètre des grains de sable} \leq 2000 \mu\text{m}$)⁵⁵.

L'essai d'équivalent de sable (ES) quant à lui mesure la « propreté » du sable. Pour cela, le sable est lavé avec une solution floculante normalisée de chlorure de calcium (Cl_2Ca). Cet essai permet d'avoir la proportion de particules fines ou très fines dans le sol analysé⁵⁵ et peut être exprimée par une valeur dite « à vue » ou une autre dite « au piston ». L'interprétation des résultats peut se faire indifféremment sur l'une ou l'autre de ces deux valeurs. Plus la valeur d'ES sera élevée, plus le sable en question sera déclaré « propre ».

Une étude du sable utilisé par les fondeurs a donc été réalisée.

Le 27 février, le fondeur, ayant constaté que son sable avait perdu ses propriétés, a procédé à un renouvellement partiel de ce dernier (nos observations nous apprennent que les fondeurs changent entre 1/4 et 1/3 de leur sable usé par du sable neuf à chaque renouvellement). Nous avons voulu suivre l'évolution de la nature de ce sable au cours de son utilisation. Nous avons donc fait plusieurs prélèvements dont les analyses ont permis d'établir le tableau 3-2 :

Date	27 février	12 mai	29 mai	Sable neuf	Sable usé
Proportion de sable fin	42 \pm 1%	33 \pm 1%	13 \pm 1%	/	/
Proportion de sable grossier	57 \pm 1%	65 \pm 1%	85 \pm 1%	/	/
ES à vue	46 \pm 2%	37 \pm 2%	35 \pm 2%	77 \pm 2%	35 \pm 2%

Tableau 3-2 : Résultats de l'analyse du sable utilisé par les fondeurs de Colobane à Dakar.

Les résultats peuvent être interprétés de la manière suivante.

Lors du moulage, la cendre très fine de charbon de bois ajoutée par les fondeurs dénature petit à petit le sable en enrobant les grains ce qui conduit à augmenter leur taille : c'est la raison pour laquelle le pourcentage de sable grossier augmente au fil de l'utilisation du sable. Une confirmation de la présence de ces éléments fins est donnée par l'essai d'équivalent de sable dont la valeur diminue de façon progressive, ce qui signifie que le sable devient de moins en moins propre avec l'augmentation au cours du temps de la proportion d'impuretés.

Dans le but de modéliser cette baisse, nous avons tracé la figure 3-3 qui représente l'évolution de l'ES au cours du temps.

⁵⁵ J LEGRAND dans *Techniques de l'Ingénieur. Description identification et classification des sols*, dossier C 208 (1974).

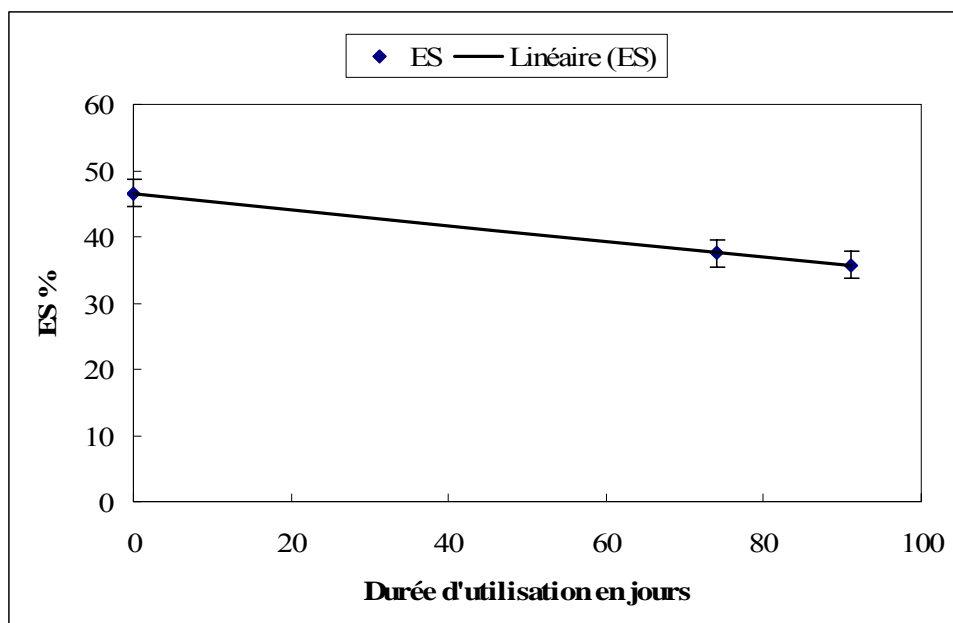


Figure 3-3 : Evolution au cours du temps de l'ES à vue du sable utilisé par les fondeurs de Dakar.

D'après nos mesures, nous observons donc une baisse quasi linéaire, en moyenne de 0,11%/jour de l'équivalent de sable à vue. Considérant cette évolution moyenne de l'ES et sa valeur pour le sable usé (tableau 3-2), nous pouvons dire que le sable qui a été analysé le 29 mai devra être renouvelé dans les jours qui suivent, car au-delà, il risque d'avoir un équivalent de sable plus faible que celui du sable usé, ce qui sera préjudiciable à la qualité des produits finis.

Si le 29 mai est retenu comme la date limite au-delà de laquelle il faut renouveler une partie du sable sous peine de voir apparaître des défauts sur les produits finis, cela fait environ trois mois d'utilisation pour ce sable renouvelé le 27 février. Le sable neuf n'est presque jamais utilisé seul. Néanmoins, d'après la mesure de son équivalent de sable et en supposant une dégradation du sable à la vitesse à laquelle nous l'avons observée (baisse de l'ES de sable de 0,11% par jour), nous pouvons dire que ce sable mettrait environ un an pour atteindre l'ES du sable usé, soit 4 fois plus de temps que notre échantillon prélevé à la date du 27 février.

Pour un artisan qui renouvelle une partie de son sable une fois qu'il constate des défauts sur son produit (presque la quasi-totalité des artisans fondeurs), il est donc raisonnable d'opérer le renouvellement partiel du sable tous les trois mois. En cas d'utilisation du sable neuf, celui-ci peut être utilisé pendant un an sans intervention, ensuite un renouvellement partiel trimestriel, d'au moins un tiers du sable, est préconisé.

c) Fusion et coulée du métal

La fusion de la charge et la coulée du métal liquide sont des étapes importantes de la fabrication des pièces de fonderie. C'est en effet à ce niveau que la qualité des alliages et celle de la pièce finie se préparent.

L'aluminium et ses alliages ont certes des températures de fusion assez basses comparées à

celles d'autres matériaux tels que les aciers ou les alliages de cuivre que l'artisan moule aussi, mais leur principal défaut dans cette utilisation est leur grande affinité pour l'oxygène à l'état solide mais aussi à l'état liquide. C'est la raison pour laquelle l'aluminium et ses alliages se recouvrent spontanément d'une couche d'alumine à l'état solide (dès la température ambiante) comme à l'état liquide et absorbent d'autres gaz tel que l'hydrogène à l'état liquide qui forment au moment de la solidification de petites bulles dans le métal appelées pores.

L'alumine formée à ce stade constitue une perte en métal car il est impossible de la traiter de manière artisanale pour en extraire de nouveau de l'aluminium. Elle constitue une scorie qui flotte à la surface du bain et qu'il faut éliminer par l'opération de « décrassage » que les artisans exécutent avec des écumeuses en ajoutant quelquefois du chlorure de sodium. Les scories retiennent aussi de l'aluminium liquide qui, même s'il est en partie récupéré artisanalement, contribue à la diminution du rendement de l'opération de fusion. La quantité de scories formées est fonction de la température d'élaboration de l'alliage et de la durée du séjour du bain liquide à cette température. Dans ces conditions, pour perdre le moins de métal possible, la fusion doit être la plus rapide possible et à la température la plus basse possible, compatible avec les conditions de coulée. Pour limiter le contact du bain de métal liquide avec l'air, il serait logique aussi d'utiliser un creuset à faible ouverture.

Lorsqu'on examine le processus mis en œuvre par les fondeurs du Sénégal, on s'aperçoit que la fusion est assez longue (1h à 2h suivant la charge) et la forme des creusets utilisés n'est pas idéale car ils offrent au métal en fusion une grande surface d'échange avec l'air ambiant.

Écourter la phase de fusion des déchets métalliques nécessiterait l'utilisation d'un combustible fortement calorifique autre que le charbon de bois (gaz, fuel, huile de vidange, etc.), une solution qui n'est pas encore à la portée des artisans. Si ces derniers conservent leur système de chauffage, il leur faudrait au moins limiter les pertes thermiques.

Une amélioration pourrait être apportée en couvrant le creuset de façon efficace pendant la fusion et en compactant les déchets d'aluminium avant de les introduire dans le creuset.

Réduire l'ouverture des creusets paraît difficile à réaliser. En effet, les fondeurs se servent d'une louche pour puiser le métal liquide à couler dans le moule. Dans la mesure où le col du creuset est resserré, la louche devient inutilisable. Il faut alors manipuler les creusets pour verser le métal liquide dans le moule. La tôle de fûts dans laquelle ils sont fabriqués (2 à 3/10 d'épaisseur) ne résiste pas mécaniquement aux sollicitations engendrées par cette manipulation. La construction d'un creuset en tôle épaisse s'impose. Il faudrait alors faire appel à la construction mécano soudée en partant de tronçons de tubes d'acier de gros diamètres sur lesquels on viendrait rapporter, par soudage à l'arc, un fond circulaire. Des anses soudées près de l'ouverture permettraient la manipulation à l'aide de pinces.

La maîtrise de la température de coulée est aussi un facteur à prendre en compte dans la chaîne de la qualité des marmites. La viscosité de l'alliage liquide est fonction de la température^{56, 57}. Plus l'alliage est fluide, meilleure est sa coulabilité, d'où une meilleure aptitude à remplir le moule et à

⁵⁶ C. VARGEL, dans *Techniques de l'Ingénieur. Propriétés générales de l'aluminium et de ses alliages*, dossier M 4 661 (2005).

⁵⁷ E. ROTHWELL, "A precise determination of viscosity of liquid tin, lead, bismuth and aluminium by absolute method", *Journal of Institute of Metals* **90** (1961-1962) page 389.

épouser les reliefs de celui-ci.

Augmenter la température du métal présente un autre avantage car accroître l'intervalle de température entre la coulée et le début de solidification de l'alliage, c'est offrir au métal la possibilité de rester liquide plus longtemps et permettre le remplissage des parties du moule les plus éloignées du trou de coulée. Cette propriété a certainement été mise à profit pour réaliser des marmites à parois minces (4 à 7 mm), et sans défauts.

Afin de vérifier cette hypothèse, nous nous sommes livrés à quelques mesures de températures de coulée chez les artisans fondeurs avec un thermocouple. Les résultats figurent dans le tableau (3-3) où nous précisons aussi les caractéristiques de la pièce.

Température de coulée (°C)	Caractéristiques des pièces
Entre 650 et 680	Pièces de grandes épaisseurs et de formes simples (plaques, cornières épaisses, pièces de décoration (éléphant ...))
Entre 700 et 730	Très grosses marmites de 20 kg de contenance et plus Épaisseur de paroi = 7 mm
Entre 750 et 780	Les autres marmites, les pièces fines ou ayant des formes complexes, épaisseur moyenne entre 4 et 6 mm

Tableau 3-3 : Mesures expérimentales de la température de coulée des artisans et caractéristiques des pièces coulées.

En ce qui concerne la fabrication des marmites, la température minimale relevée est, d'après le tableau 3-3, de 700 °C.

Parallèlement, nous avons réalisé des expériences d'analyse thermique pour évaluer les températures de début de solidification des alliages de fonderie utilisés par les artisans au Sénégal. Un exemple de courbe de solidification est reporté sur la figure 3-4. Pour cet essai, la température maximale de début de solidification relevée est de 618°C, la surchauffe (différence de température entre la coulée et le début de la solidification) est comprise entre 82°C et 162°C lorsque la température de coulée est de 700°C, respectivement 780°C.

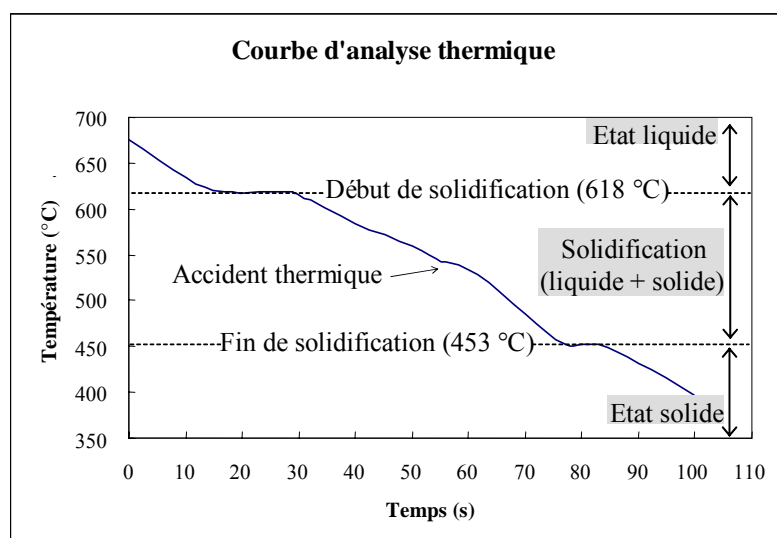


Figure 3-4 : Courbe de refroidissement d'un échantillon d'alliage élaboré par les artisans du Sénégal.

Cette surchauffe se fait au détriment de la qualité du métal qui s'oxyde et absorbe des gaz dont une partie sera retrouvée sous formes d'inclusions ou de porosités dans les pièces finies.

En fonderie industrielle, on évite généralement le contact entre les alliages d'aluminium liquide et les objets en fer ou en acier, parce que le fer passe très rapidement en solution dans l'aluminium. Lors de la solidification de l'alliage, il se combine avec l'aluminium pour donner naissance à un composé défini Al_3Fe qui fragilise le matériau⁵⁸. Or dans le processus de mise en valeur des déchets utilisé au Sénégal, les alliages d'aluminium liquide sont en contact permanent et prolongé avec le fer provenant des creusets (qui se percent après plusieurs utilisations), des ustensiles utilisés pour écumer, puiser, verser le métal et des morceaux d'acier restés prisonniers dans les déchets fondus.

On peut donc s'attendre à ce que les alliages produits par les fondeurs soient enrichis en fer au cours de la fusion. L'analyse de la microstructure des alliages étudiés nous permettra de répondre à cette question.

d) Elaboration des alliages

Le fondeur opère des mélanges entre déchets de natures différentes (voir annexe III-1) dans le but d'élaborer des alliages avec une bonne coulabilité qui donneront des objets dont nous rappelons ici les principales qualités : résister au feu, résister mécaniquement et être durable. Sur le plan technique cela signifie être capable d'élaborer des alliages à bas point de fusion ayant un intervalle de solidification limité⁵⁹. Il est donc recherché un comportement voisin de celui du corps pur vis-à-vis de la solidification. En effet, la solidification à température constante ou sur un intervalle étroit permet un meilleur remplissage du moule. Or les alliages d'aluminium ayant ces propriétés sont des alliages eutectiques qui contiennent environ 13 % de silicium en masse. L'automobile, principale source d'approvisionnement des déchets utilise une grande quantité de ces alliages. Nous pouvons donc prévoir dès maintenant que le silicium sera presque systématiquement présent dans les marmites et autres ustensiles de cuisine de fabrication artisanale du Sénégal, en plus des autres éléments présents dans les alliages industriels, sans compter les éléments introduits involontairement par l'utilisation de déchets issus de pièces composites (plastiques, peintures, traitements de surface, inclusions de fer, de cuivre, etc.) ou volontairement comme les sacs plastiques ajoutés par une minorité d'artisans.

I-2-2 Analyse du milieu socioprofessionnel

a) Le métier du fondeur

La pratique de l'activité

L'activité de la fonderie, comme nous l'avons évoqué plus haut, est une activité à part entière de l'économie sénégalaise. Elle n'est cependant pas toujours reconnue par les pouvoirs publics, si bien que la plupart du temps, elle est classée dans le secteur informel. Toutefois, elle est animée par de véritables professionnels qui se consacrent à plein temps à leur travail.

⁵⁸ M. HANSEN, dans *Constitution of binary alloys 2nd Ed.*, Mc GRAW-HILL BOOK COMPANY INC .The Maple Press Company, New York (1958).

⁵⁹ J.J. PERRIER dans *Techniques de l'Ingénieur, Traité de Matériaux métalliques, Fusion des alliages d'aluminium, dossier M 3635* (2003).

La pratique de cette activité relève plus d'un art que d'une technologie. En effet, les différentes étapes de la réalisation des pièces, dans le contexte sénégalais, laissent une part importante à l'interprétation et à l'intervention de l'homme, compte tenu des connaissances pratiques acquises après plusieurs années d'expériences. Cette pratique a été optimisée pour la fabrication d'objets très spécifiques et limités en nombre, en taille et en dimensions tels que les marmites. Les fondeurs possèdent donc des éléments de réponse à certains problèmes de fonderie, mais ne sont pas capables de traiter des cas trop éloignés de ceux posés par les ustensiles de cuisine. C'est là que se situe le handicap dans l'évolution du métier de fondeur. Cela n'interdit pas les initiatives personnelles pour créer et innover. Par exemple, lors d'une de nos visites dans le quartier de Colobane, un des fondeurs avec qui nous avons travaillé, essayait d'injecter un mélange d'huile de vidange et d'air pour augmenter le pouvoir calorifique de son combustible (le charbon de bois).

Toutefois, certains fondeurs, parmi les plus expérimentés, fabriquent des pièces de rechange pour le secteur automobile, ou des pièces de décoration, voire des objets d'art. Ceci leur génère des revenus supplémentaires substantiels de 30.000 francs CFA (45 euros) à plus de 200.000 francs CFA (300 euros), en fonction de la nature, de la taille et de la forme de la pièce. En comparaison, le bénéfice tiré du travail de 25 kg d'aluminium pour la fabrication d'ustensiles de cuisine (quantité moyenne utilisée par fondeur par jour) ne se situe qu'entre 2000 francs CFA (3 euros) et 4000 francs CFA (6 euros). Ce bénéfice net est très faible en comparaison de celui des commerçants sur ces objets.

Sécurité du travail

La fonderie est une activité dont la pratique peut-être dangereuse avec la manipulation de matières portées à haute température, de sources de chaleur, à cause des risques de projection, d'incendie et d'émanation de gaz ou de fumées potentiellement toxiques. Contrairement à la France où la réglementation impose l'utilisation de vêtements de protection, d'outils adaptés et de locaux répondant à des normes de sécurité⁶⁰, au Sénégal, le fondeur n'est soumis à aucune contrainte sécuritaire. Son atelier est très exigu, à peine une dizaine de m², et il doit y entreposer son matériel et réserver une place pour préparer les moules et faire fondre les déchets de métaux. Dans son unité de production artisanale travaillent au moins deux personnes : lui, « le patron » qui possède la maîtrise de l'art de la fonderie et un ou plusieurs « apprentis » pour réaliser les tâches subalternes. A l'exception d'une infime minorité, les fondeurs n'utilisent aucune protection (vêtements protecteurs, gants, chaussures adaptées). Ils travaillent à mains nues et en sandales ou parfois même pieds nus. Le travail de fonderie réalisé dans de telles conditions présente un caractère dangereux que les artisans compensent par une pratique gestuelle très ordonnée et optimisée.

b) Restructurer la profession : une nécessité

La profession de fondeur doit être restructurée afin que ses acteurs aient plus d'emprise sur leur secteur et sur la composition de leur produit. Un projet a été initié dans ce sens par la direction de l'artisanat et l'Agence Intergouvernementale de la Francophonie, en partenariat avec le C.T.I.F. et l'association des fondeurs du Sénégal (réf : AG/DCE/mn/20030429-018). Il permettra de doter les artisans d'un four industriel fonctionnant au gaz, une source plus énergétique que le charbon de bois.

⁶⁰ Code du travail français, livre II "Réglementation du travail", titre III "hygiène, sécurité et conditions de travail", articles L233-1 à L233-7.

Les quantités traitées seront plus élevées avec des pertes en énergie réduites, ce qui devrait augmenter le profit des artisans. En plus de l'unité de fusion industrielle, ce projet prévoit une formation théorique à la fonderie pour les artisans et la création d'une petite unité chargée de l'achat, du tri et de la confection de lingots de composition connue, qui pourront par la suite être transformés en produits finis. Ce projet n'en est qu'au début de sa mise en œuvre et ne concerne pour le moment qu'un petit nombre d'artisans. Mais à terme, il intégrera l'ensemble des professionnels du secteur de la fonderie artisanale du Sénégal.

Mais en attendant l'aboutissement de ce projet, les artisans travaillent toujours, par atelier, avec des creusets dont la charge est d'une vingtaine de kilos par cycle. Cette multiplicité d'ateliers et de fours artisanaux n'est pas économiquement rentable.

II Étude bibliographique

Dans les pays industrialisés et à haut niveau de consommation, des lois strictes réglementent l'utilisation des matériaux destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires. Au Sénégal, aucune législation nationale n'existe concernant les récipients ou emballages métalliques ou plastiques. Dans de pareils cas, l'Agence Sénégalaise de Normalisation (ASNOR) se réfère aux normes françaises correspondantes.

II-1 Le contexte réglementaire européen

Les lois françaises sur l'alimentarité des matériaux et des alliages d'aluminium en particulier sont relativement récentes puisque la première d'entre elles a vu le jour le 27 août 1987 et a été signée par le ministre de l'agriculture de l'époque, Monsieur François GUILLAUME (annexe III-3). Ce texte fixe les limites des compositions chimiques des alliages d'aluminium admises pour la fabrication d'objets amenés à rentrer en contact avec les aliments. Plusieurs normes se sont ensuite inspirées de cet arrêté ministériel parmi lesquelles la norme NF EN 601 de juillet 2004 résumée dans le tableau (3-4).

Eléments	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sb	Sn	Sr	Zr	Ti	Autres	Al
% masse maximum	13,5	2	0,6	4	11	0,35	3	0,25	0,4	0,1	0,2	0,3	0,3	$\Sigma < 0,15$	reste

Tableau 3-4 : Teneurs maximales admises pour les alliages d'aluminium en contact avec des aliments d'après la norme française NF EN 601 de juillet 2004.

Compte tenu des progrès énormes réalisés dans le domaine de l'emballage et du conditionnement alimentaire depuis cette date, liés au traitement des surfaces (revêtements polymères notamment), cette réglementation (loi du 27 août 1987) s'est enrichie de nouveaux tests à la fois plus spécifiques mais aussi plus contraignants. Apparaît alors clairement la notion de toxicité des alliages liée à celle de « transfert ». Il s'agit précisément du transfert des éléments contenus dans l'alliage ou le revêtement de surface, libérés sous l'effet d'une corrosion ou d'une diffusion chimique, processus activé thermiquement, dans l'aliment avec lequel il est mis en contact. Ce transfert, encore appelé « migration », est évalué par la quantité d'éléments contenue dans le milieu alimentaire.

Afin d'évaluer ces transferts, les normes préconisent de mettre en contact des échantillons du matériau à tester avec des simulants alimentaires (par exemple l'éthanol pour simuler les aliments alcoolisés) dans des conditions de température précises et pendant des temps donnés^{61, 62}. Les éléments contenus dans l'alliage et susceptibles de passer dans le simulant sont ensuite analysés. A l'issue de ces tests, compte tenu des doses admissibles des éléments détectés par l'analyse, le produit est validé ou non. Dans la pratique, ces tests avec des simulants alimentaires sont destinés à étudier le prolongement de la durée de conservation des aliments dans leurs emballages.

Pour les alliages d'aluminium non revêtus, ce qui est le cas des ustensiles de cuisine fabriqués artisanalement au Sénégal, la réglementation actuelle (NF EN 601 de juillet 2004) retient essentiellement le respect de la composition chimique des alliages figurant dans la loi du 27 août 1987. Aucun test d'alimentarité n'est prévu. Le fournisseur du produit doit amener la preuve que le matériau utilisé respecte la norme, ce qui la plupart du temps se résume à la fourniture du bulletin d'analyse de ce matériau.

II-2 Le transfert de matière des ustensiles en aluminium

Peu d'études scientifiques ont été réalisées dans le domaine du transfert de matière de l'aluminium lors des contacts avec des aliments. Les travaux portent en général sur l'action de liquides simulateurs à la place d'aliments réels. Cependant, quelques études menées sur des aliments réels ont montré l'influence de la température et de la durée d'interaction sur la migration de l'aluminium dans les denrées alimentaires. Ainsi Gramiccioni *et al.*⁶³ en 1987 ont montré qu'avec 3% d'acide acétique, la migration après 24 heures était approximativement 10 fois supérieure à 40°C qu'à 5°C. Parmi les autres résultats publiés, Pennington et Jones⁶⁴ mesurent qu'une cuisson entreprise dans un récipient en aluminium augmente de moins de 1 mg/kg la teneur en aluminium de la moitié des aliments et de moins de 10 mg/kg celle de 80 % des aliments analysés. Mei et Yao⁶⁵ vont plus loin en publiant, en 1993, que l'eau du robinet portée à ébullition durant 10 ou 15 minutes dans une casserole en aluminium peut engendrer une migration du métal jusqu'à 1,5 mg/l, selon le degré d'acidité de l'eau et la composition chimique des ustensiles en aluminium. Ces mesures ont été confirmées par Müller *et al.*⁶⁶ en 1993, Nagy et Jobst⁶⁷ en 1994 et Grammicioni *et al.*⁶⁸ en 1996. Cependant, une étude précédente sur le sujet

⁶¹ A. KOZLOWSKI dans *Techniques de l'Ingénieur*, Alimentarité des matériaux critères de choix dossier M 4 492 (2004).

⁶² A. KOZLOWSKI dans *Techniques de l'Ingénieur*, Alimentarité des matériaux réglementation, dossier M 4 490 (2004).

⁶³ L. GRAMICCIONI *et al.*, "An experimental study about aluminium packaged food", *International symposium on Nutritional and toxicological aspects of food processing*, Rome, April, 14-16, 1987, R. and Quattrucci Eds, Taylor and Francis London (1989) pages 331-336.

⁶⁴ J.A.T. PENNINGTON, J.W. JONES dans *Dietary intake of aluminium in: Aluminium and health, A Critical Review*, Hillel Gitelman, Marcel Dekker Inc. (1989).

⁶⁵ L. MEI, T. YAO, "Aluminium contamination of food from using aluminium ware" *International Journal of Environment Analytical Chemistry* **50** (1993) pages 1-8.

⁶⁶ J.P. MÜLLER, A. STEINEGGER C. SCHLATTER, "Contribution of aluminium from packaging materials and cooking utensils to the daily aluminium intake" *Zeitschrift für Lebensmittel Untersuchung und Forschung* **197**(4) (1993) pages 332-341.

⁶⁷ E. NAGY, K. JOBST, "Aluminium dissolved from kitchen utensils" *Bulletin of Environment Contamination and Toxicology*. **529** (1994) pages 336-399.

par Liukkonen-Lilja et Piepponen⁶⁹ en 1992, faisait état de valeurs pouvant atteindre 5 mg/l. Toutes ces études confirment ce qu'avait déjà trouvé Hugues⁷⁰ en 1992 à savoir que les aliments qui absorbent la plus grande quantité d'aluminium provenant des récipients sont les aliments acides tels que les tomates, le chou, la rhubarbe et de nombreuses baies. Cependant, les éléments alcalins ayant subi une forte adjonction de sel, assimilent encore plus l'aluminium.

Nous retiendrons de cet ensemble de résultats que la corrosion des alliages d'aluminium par les aliments est un phénomène très complexe intégrant de nombreux aspects (qualité, nature des aliments, mode de chauffage, forme et dimension des récipients, etc.) que M. P. Schmidt et S. Carisey, des experts du CETIM ont énumérés dans une note interne de l'actuelle société ALCAN⁷¹.

La synthèse de ces différentes études nous amène à définir nous-mêmes un protocole opératoire qui sera exposé plus loin et que nous respecterons tout le long de notre étude du comportement des alliages élaborés par fonderie artisanale. Un échantillon d'origine industrielle, respectant la norme sur l'alimentarité sera comparé aux alliages de fabrication artisanale.

Parallèlement au problème de transfert situé à l'interface entre le matériau et le milieu environnant, se pose celui de la toxicité des éléments transférés dans le corps humain. Ce problème relève d'études toxicologiques qui n'entrent pas dans le champ de nos investigations mais auxquelles nous référerons pour étayer la discussion de nos résultats expérimentaux.

III Étude de la qualité métallurgique des alliages artisanaux

III-1 Protocole expérimental

III-1-1 Les échantillons

a) Alliages issus du recyclage

Nous avons souligné dans l'annexe III-1 que les déchets d'aluminium valorisés au Sénégal sont issus de milieux divers et variés (édition, automobile, etc.) que les fondeurs classent en alliages « durs », « mous » et « normaux ». Compte tenu de l'absence de règles préétablies pour la confection de la charge de fusion et de la diversité des déchets d'aluminium, chaque alliage est unique.

Pour couvrir un éventail assez large et représentatif de la qualité des alliages élaborés par les fondeurs, nous avons récolté, sur une période de plus d'un an, 14 échantillons prélevés sur des marmites déjà prêtes ou au moment de la coulée chez différents artisans.

⁶⁸ L. GRAMICCONI, G. INGRAO, M. R. MILANO, P. SANTARONI, G. TOMASSI, "Aluminium levels in italian diets and in selected food from aluminium utensils", *Food additives and Contaminants* **13**(7) (1996) pages 767-774.

⁶⁹ H. LIUKKONEN-LILJA, S. PIEPPONEN, "Leaching of aluminium from aluminium dishes and packages", *Food Additives and Contaminants* **9**(3) (1992) pages 213-223.

⁷⁰ J. T. HUGHES dans *Aluminium and your health*, Rimes House (1992).

⁷¹ M. P. SCHMIDT, S. CARISEY, *Présentation CETIM* le 15-05-2001.

b) Alliage témoin

Pour avoir un point de comparaison avec nos alliages artisanaux, nous avons prélevé des échantillons sur un autocuisseur de fabrication européenne. Lors de la présentation des résultats des expériences que nous avons menées, cet échantillon sera dénommé « témoin ».

III-1-2 Tests et analyses

Dans notre étude, l'évaluation de la qualité des produits issus de la transformation des déchets d'aluminium porte sur 3 aspects :

a) Composition chimique des alliages

C'est le seul critère qui nous permet de situer nos échantillons par rapport à la réglementation. Les mesures ont été faites par spectrométrie d'émission optique (annexe II-1).

Des analyses ponctuelles réalisées avec une sonde en dispersion d'énergie de rayons X couplée à l'observation au Microscope Electronique à Balayage, (MEB annexe II-2), ont été réalisées pour identifier les différentes phases et les composés intermétalliques présents dans les alliages.

b) Microstructure des alliages

L'analyse et l'identification des composants de la microstructure nous ont permis de préciser la distribution des éléments présents dans les différentes phases du matériau. C'est un aspect important du problème de l'alimentarité que nous avons essayé par la suite de lier aux phénomènes de corrosion. Dans ce but, des observations d'ensemble de la microstructure ont été réalisées au microscope optique (annexe II-3) et au MEB, sur des coupes polies à la silice colloïdale et attaquées avec un réactif composé de 5% d'acide fluorhydrique et 95% d'eau distillée.

c) Dureté Vickers

Les essais sont réalisés sous une charge de 3 kg (HV_3) en respectant les conditions d'essai relatives à la norme NF A 03-154. Ils nous donnent une indication sur le niveau global de résistance au poinçonnement du matériau.

III-2 Résultats expérimentaux

III-2-1 Analyse chimique des échantillons

Les résultats de l'analyse spectrométrique des échantillons sélectionnés et du témoin ont été regroupés dans le tableau (3-5).

% masse E c h	Si	Cu	Fe	Zn	Mg	Mn	Cr	Ti	Pb	Sn	Ni	Al
1	2,96	0,837	0,726	0,73	0,748	0,204	0,017	0,011	0,041	<0,003	0,084	reste
2	6,66	2,93	0,665	0,468	0,306	0,154	0,030	0,034	0,05	0,372	0,164	reste
3	8,33	3,43	0,777	0,602	0,183	0,172	0,03	0,051	0,094	0,025	0,189	reste
4	4,24	3,43	0,422	0,758	0,448	0,183	0,008	0,033	0,022	<0,003	0,013	reste
5	5,7	4,04	0,601	0,935	0,313	0,201	0,022	0,047	0,040	0,008	0,04	reste
6	8,5	1,44	0,6	0,58	0,21	0,17	0,028	0,033	0,05	0,21	0,15	reste
7	2,85	1,25	0,45	0,51	0,18	0,15	0,016	0,055	0,038	<0,02	0,017	reste
8	2,03	0,95	0,36	0,9	0,51	0,1	0,012	0,042	<0,02	<0,02	0,008	reste
9	2,76	0,63	0,33	0,39	0,18	0,084	0,008	0,041	<0,02	<0,02	0,008	reste
10	8,78	1,12	0,36	0,85	0,049	0,04	0,005	0,023	0,047	<0,02	<0,005	reste
11	4,01	1,03	0,45	0,46	0,12	0,06	0,005	0,031	0,03	0,022	0,01	reste
12	5,48	1,54	0,41	0,44	0,057	0,15	0,011	0,055	0,055	<0,02	0,021	reste
13	9,9	0,96	0,57	0,44	0,093	0,28	0,018	0,029	0,06	<0,02	0,048	reste
14	7,63	1,23	0,58	0,62	0,49	0,2	0,027	0,029	0,12	0,058	0,13	reste
Témoin	0,17	<0,005	0,62	0,032	<0,01	<0,005	<0,005	0,016	<0,02	<0,02	<0,005	reste
Norme	13,5	0,6	2	0,25	11	4	0,35	0,3	<0,05	0,1	3	reste

Tableau 3-5 : Composition chimique en % massique du témoin et des échantillons récoltés auprès des fondeurs du Sénégal et teneurs maximales admises par la norme NF EN 601 (juillet 2004).

Nous constatons que les teneurs de l'échantillon témoin sont parfaitement en accord avec celles admises par la norme. Quant à nos échantillons du Sénégal, l'examen du tableau d'analyse fait apparaître différents points suivants.

i) Grande variété des compositions chimiques des alliages

Ceci est une conséquence des choix opérés par les fondeurs pour constituer les charges de fusion. Cette caractéristique témoigne de l'extrême diversité de la qualité et de la quantité des matériaux composant le gisement des déchets d'aluminium, et d'un approvisionnement chez le fondeur lui aussi diversifié et variable dans le temps. Le traitement de grandes quantités de matériaux, comme le prévoit le projet initié par la Direction de l'Artisanat évoqué plus haut, sera un élément régulateur de la composition des alliages produits, indépendamment de leur traitement et de leur affinage.

ii) Le silicium est le principal élément d'addition de ces alliages

Nous avons vu dans l'annexe III-1, qu'il est l'un des constituants majeurs des alliages d'aluminium destinés à la fonderie, car il donne avec 87,3% d'aluminium un mélange eutectique fondant à 577°C. Il permet d'abaisser ainsi la température de fusion des alliages et améliore la coulabilité⁷².

Les teneurs en silicium des alliages d'aluminium de fabrication artisanale sont variables d'un échantillon à l'autre (2,96% à 9,9%). Elles leur confèrent une composition hypoeutectique dans le

⁷² F. HERBULOT dans *Techniques de l'Ingénieur, Traité Matériaux métalliques, récupération et recyclage de l'aluminium, stratégie, dossier M 2 345 (2001)*.

diagramme binaire Al-Si qui respectent la valeur maximale de 13% donnée par la norme NF EN 601 de juillet 2004. La provenance de cet élément est certainement liée à l'utilisation en proportions importantes d'alliages issus de l'automobile.

iii) Teneurs en cuivre et en zinc élevées

Elles dépassent de beaucoup celles admises par la norme NF EN 601 de juillet 2004. Tous nos échantillons sont donc hors norme de ce point de vue.

iv) Autres éléments

D'autres éléments tels que le nickel, le magnésium, le titane, le chrome, l'étain et le plomb sont présents en faibles quantités dans nos alliages, à l'exception de quelques échantillons. En effet, les échantillons n°2 et 6 ont des teneurs en étain supérieures à celles autorisées par la norme. Il en est de même pour les échantillons n° 3, 12, 13 et 14 par rapport à leur teneur en plomb.

La teneur élevée en étain de l'échantillon n°6 est une conséquence de la charge dont il est issu. Les informations obtenues auprès du fondeur l'ayant élaborée nous apprennent que cette charge est la seule qui fut principalement constituée de rampes de camions convoyeurs de marchandises. La contamination de la solution d'aluminium par l'étain provient certainement de ces profilés.

Le plomb n'est pas un constituant « naturel » des alliages d'aluminium. Il n'a pu être introduit dans la charge de fusion que de manière accidentelle. Cependant, les artisans ont l'habitude de le voir « souiller » leurs alliages. En général, ils l'enlèvent après avoir coulé les pièces finies (marmite, louche, etc.). En effet, le plomb n'est pas miscible avec la quasi-totalité des éléments d'alliages à la température ambiante, à l'exception de l'étain avec lequel il forme une solution solide contenant 98,1% en masse d'étain à 20°C. Le plomb se sépare donc par différence de densité et se solidifie en dernier lieu (son point de fusion 327°C est inférieur à celui de l'aluminium pur, 660°C). Il est alors facile de le détacher de la pièce car il n'adhère pas à l'alliage. Si l'empreinte qu'il laisse entraîne un défaut trop important, le produit est refondu. Cependant, de petites particules de plomb, peuvent toujours subsister dans la matrice, comme nous aurons l'occasion de le montrer par des analyses chimiques ponctuelles de la microstructure

Les teneurs en fer et manganèse de nos alliages sont élevées, bien qu'inférieures à celles tolérées par la norme. Ces composants ne se retrouvent que dans les alliages dits « durs » (annexe III-1) qui composent au maximum moins d'un tiers de la charge de fusion. D'autre part, les données recueillies auprès des fondeurs nous apprennent que les charges à l'origine des échantillons n° 8, n° 9 et n° 10 ne comportent pas d'alliages « durs ». Les teneurs en fer de ces alliages étant très voisines, ceci laisse penser à une source de contamination commune. Nous pouvons envisager alors deux types de contamination de l'aluminium par le fer :

- les alliages d'aluminium sont parfois associés par construction (matériau composite) à des morceaux d'acier qui, lorsqu'ils ne sont pas faciles à enlever, sont mis dans la charge avec

l'aluminium et retirés une fois ce dernier fondu (annexe III-1). L'aluminium liquide étant très corrosif vis-à-vis de l'acier⁷³, un enrichissement par contamination du bain métallique liquide par le fer s'opère ;

- le creuset en acier où l'aluminium en fusion demeure à une température élevée (plus de 650°C) pendant plus d'une heure est aussi une source de contamination. A cela s'ajoute l'utilisation d'outils, eux aussi réalisés en acier, tels que les écumoirs, les louches, etc.

III-2-2 Étude de la microstructure des alliages

Les alliages de fabrication locale étant difficilement classables dans les grandes familles de matériaux industriels, l'étude de leur microstructure devient compliquée. Pour cette raison l'identification des constituants a été réalisée par recoupement entre les informations issues des analyses chimiques élémentaires au MEB, de l'observation au microscope optique des faciès des échantillons préalablement polis, et des études bibliographiques de matériaux de compositions chimiques proches de ceux étudiés.

a) Données générales

L'aluminium a des affinités différentes avec les éléments d'addition principalement présents dans nos alliages (Si, Fe, Cu, Zn, Mg). A l'état solide, leur combinaison donne naissance à des solutions solides ou des composés intermétalliques chimiquement définis.

Les diagrammes d'équilibre binaires, Al/Si, Al/Fe, Al/Cu, Al/Zn, Al/Mg donnent déjà une idée de la nature des phases susceptibles de se former, dans leur état le plus simple.

Ainsi, nous constatons que le silicium est très peu miscible avec l'aluminium à température ambiante. Il précipite à l'état pur sous forme d'aiguilles sombres caractéristiques⁷⁴. Lorsqu'il est mélangé avec de l'aluminium dans une solution où il occupe moins de 13 % en masse, il forme un eutectique aux joints de grains d'une solution solide d'aluminium très pauvre en silicium. Cette structure en aiguilles peut être modifiée par l'ajout de strontium ou de sodium pur dans l'alliage juste avant la coulée⁷⁵. Le silicium prend alors un aspect fibreux, configuration permettant d'améliorer les caractéristiques mécaniques de l'alliage. On parle alors de structure « modifiée ».

Dans les alliages fer-aluminium contenant moins de 40% de fer, il se forme un composé intermétallique FeAl₃.

Le cuivre allié à l'aluminium en proportions inférieures à 55% en masse donne naissance au composé Al₂Cu que l'on retrouve associé à de l'aluminium dans un mélange eutectique.

Le magnésium forme avec l'aluminium un composé Al₃Mg₂ et avec le silicium un composé Mg₂Si.

⁷³ D. WANG, Z. SHI, L. ZOU "Liquid aluminium corrosion resistance surface on steel substrate", *Applied Surface Science* **214** (2003) pages 304-311.

⁷⁴ R. F. MEHL dans *Metals Handbook 8th Ed. ATLAS of microstructures of industrial alloys*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio (1972).

⁷⁵ C. XIANG, G. HUIYUAN, Y. LI, "Study of the eutectic modification level of Al-7Si alloy by computer aided recognition of thermal analysis cooling curves", *Materials Science and Engineering A* **419** (2006) pages 283-289.

Le zinc est très peu miscible dans l'aluminium, élément avec lequel il forme une solution solide contenant moins de 0,05% de Zn à la température ambiante. En revanche, il se combine au magnésium pour former un composé $MgZn_2$.

Le nickel forme des composés Al_3Ni , Al_3Ni_2 avec l'aluminium dans des alliages dont le pourcentage de nickel est inférieur à 40% en masse.

Les alliages d'aluminium industriels ont des structures complexes dans la mesure où ces éléments en proportion variables vont interagir les uns avec les autres pour donner des composés mixtes $Al_xM_1yM_2z...$. Par exemple, dans les alliages Al-Fe-Si peuvent se former différents composés intermétalliques : Al_8Fe_2Si , Al_5FeSi , $Al_{12}Fe_3Si_2$ ^{76, 77}.

L'ajout de cuivre à un alliage Al-Fe-Si va entraîner la formation du composé $Al_5Mg_8Cu_2Si_6$, l'agrégat eutectique Al_2Cu étant toujours présent. Par ailleurs, il va favoriser la formation d'une microporosité interdendritique ^{78, 79}. Cette phase est souvent associée aux intermétalliques contenant du fer.

Dans les alliages exempts de cuivre, le manganèse a tendance à se retrouver dans les intermétalliques riches en fer $(Fe\ Mn)Al_6$, $(Fe\ Mn)_3Si_2Al_{15}$ ou se trouve sous les formes $(Cu\ Fe\ Mn)Al_6$, $(Cu\ Fe\ Mn)_3Si_2Al_{15}$, $Cu_2Mn_3Al_{20}$ dans les alliages qui en contiennent.

Le nickel, le zinc et le magnésium, éléments d'addition présents dans les alliages d'aluminium à hautes caractéristiques mécaniques, forment des composés intermétalliques variés et complexes $Al_8Mg_3FeSi_6$, $Al_5Mg_8Cu_2Si_6$, $Al_3(CuNi)$, Mg_2Si ⁸⁰.

Ainsi, la structure des alliages d'aluminium peut être très complexe suivant leur composition chimique et les traitements thermiques qui rendent certains d'entre eux sensibles au durcissement structural. Cependant, les principaux constituants de ces matériaux restent une matrice d'aluminium et des cristaux de silicium que l'on trouve en grande quantité dans les alliages de fonderie.

La microstructure des alliages d'aluminium, et plus particulièrement celle relative aux alliages de fonderie riches en silicium non modifié, présente un faciès caractéristique nommé « écriture chinoise » comme le montrent les micrographies de la figure (3-5) relatives à des matériaux de composition chimique voisine de celles de nos échantillons issues de la bibliographie.

⁷⁶ S.G. SHABESTARI, "The effect of iron and manganese on the formation of intermetallic compound in aluminium silicon alloys", *Materials Science and Engineering A* **383**(2004) pages 289-298.

⁷⁷ P. ASHTARI, H. TEZUKA, T. SATO, "Modification of Fe containing intermetallic compounds by K addition to Fe rich AA 319 aluminium alloys" *Scripta Materialia* **53** (2005) pages 937-942.

⁷⁸ C. H. CACERES, M.B. DJUADJEVIC, T. J. STOCKWELL, J. H. SOKOLOWSKI "The effect of Cu content on the level of microporosity in Al-Si-Cu-Mg casting alloys", *Scripta Materialia* **40** (5) (1999) pages 631-637

⁷⁹ C. M. DINNIS, J. A. TAYLOR, A. K. DAHLE, "Iron related porosity in Al-Si (Cu) foundry alloys", *Metal Science and Engineering A* **425** (2006) pages 286-296.

⁸⁰ N. A. BELOV, D. G. ESKIN, N. N. AVXENTIEVA, "Constituent phase diagrams of the Al-Cu-Fe-Mg-Ni-Si system and their application to the analysis of aluminium piston alloys", *Acta Materialia* **53** (2005) pages 4709-4722.

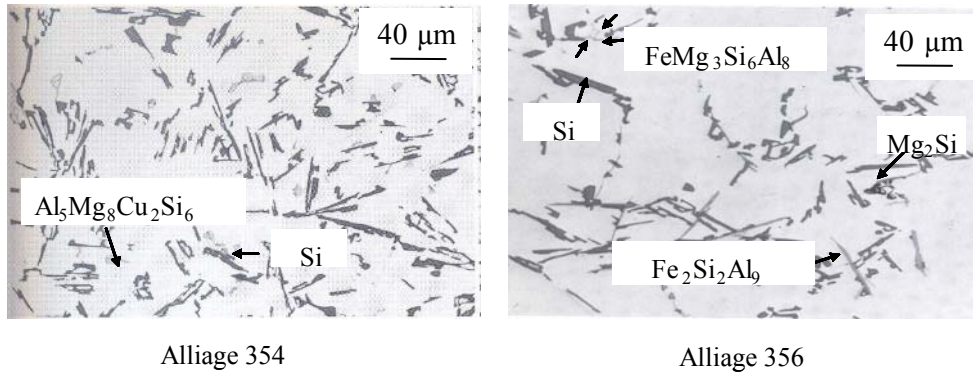


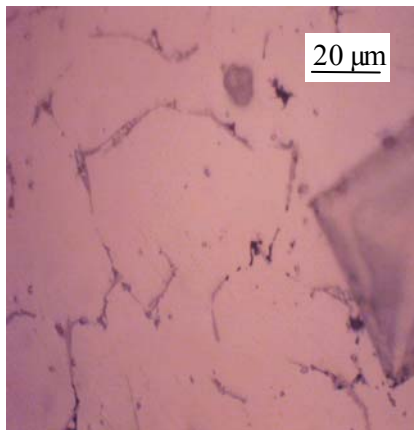
Figure 3-5 : Micrographies des alliages 354 et 356 contenant respectivement 9% de Si, 1,8% de Cu, 0,5% de Mg et 7% de Si, 0,3% de Mg, 0,2% de Fe .

b) Identification des phases présentes

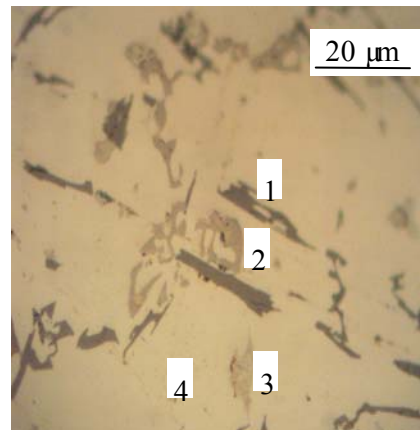
Pour identifier les différentes phases dans nos alliages, nous avons utilisé plusieurs techniques d'analyses et d'observation.

Microscopie optique

D'un point de vue général, la microstructure des échantillons artisanaux du Sénégal se présente en deux groupes. Dans chacun d'eux, nous avons la présence quasi systématique de quatre phases en proportions différentes (figure 3-6).



Type A : Ech. n°1 (2,96% de Si)



Type B : Ech. n°3 (8,33% de Si)

Figure 3-6 : Microstructures représentatives des alliages d'aluminium du Sénégal.

Ces phases sont :

- des aiguilles sombres (repère 1) ;
- des agrégats de couleur rosée (repère 2) ;
- des aiguilles claires (repère 3) ;
- un fond clair qui occupe 80 à 90 % de la surface de la zone observée (repère 4).

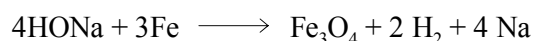
Le type A, caractérisé par une faible densité d'aiguilles et d'agrégats, est retrouvé sur les échantillons contenant une faible proportion de silicium (échantillons 1, 7, 8, 9).

Le type B, dans lequel sa densité d'aiguilles et d'agrégats est supérieure, est caractéristique des alliages à forte teneur de silicium (échantillons 2, 3, 5, 6, 10, 13, 14).

Ainsi la quantité de silicium présente dans le matériau conditionne, dans une large mesure, la microstructure des alliages étudiés.

Nous avons signalé précédemment que la structure du silicium, importante au regard des propriétés mécaniques de l'alliage, peut être modifiée par un traitement opéré industriellement et qui consiste en une addition de sodium ou de strontium avant la coulée. Dans le cadre de notre étude, nous avons cherché à opérer une telle modification, à l'aide de moyens simples et compatibles avec ceux des artisans.

La modification que nous avons réalisée résulte de l'action de la soude (sous forme solide) sur le fer, contenu en assez grande quantité dans les alliages artisanaux, pour libérer du sodium pur suivant la réaction proposée par Gay-Lussac et Thénard en 1808⁸¹ :



La microstructure obtenue par ajout de 1% en masse de pastilles de soude (1% de la masse de l'alliage à traiter) est assez voisine de celle des alliages modifiés industriellement. Le silicium, se présente sous une forme fibreuse occupant, avec l'aluminium auquel il est associé dans un agrégat eutectique, les espaces interdendritiques (figure 3-7).

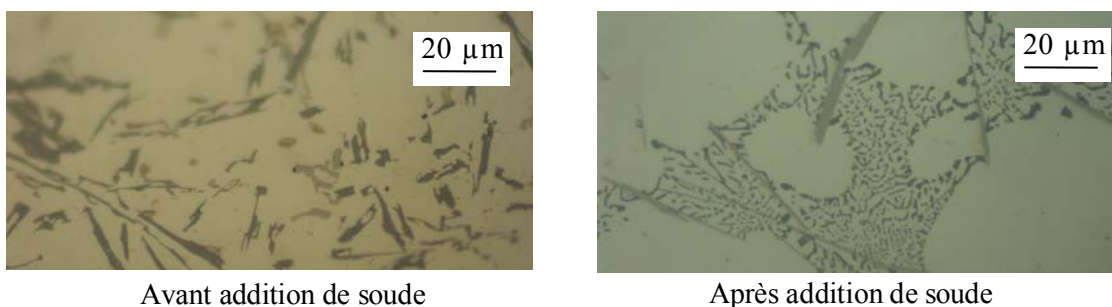


Figure 3-7 : Micrographies de l'échantillon n°3 avant et après modification de la microstructure du silicium par ajout de la soude.

Quant à notre échantillon témoin, sa microstructure est totalement différente (figure 3-8). Elle est principalement constituée de la matrice d'aluminium dans laquelle on distingue d'autres phases de taille micrométrique (flèche).

⁸¹ G. CHAPAS et C. CHARMETANT dans *Chimie Minérale 2ème partie Métaux*, Librairie Emmanuel VITTE (1949).

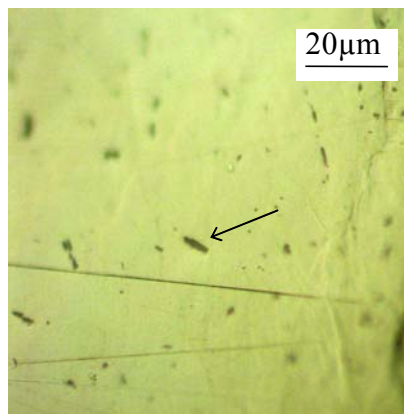


Figure 3-8 : *Microstructure de l'échantillon témoin observé au microscope optique.*

Analyse chimique des phases

Grâce au MEB, l'analyse des rayons X émis par le matériau lors de son interaction avec les électrons du faisceau incident en position fixe sous une accélération de 20KV permet d'identifier la nature des éléments chimiques constituant la cible (annexe III-5). Cette technique est aussi quantitative car elle permet d'évaluer la proportion de ces éléments. Toutefois, des précautions sont à prendre, notamment lors de l'interprétation des résultats. En effet, les mesures peuvent être biaisées par un effet de taille. Lorsque la taille de la zone d'interaction faisceau d'électrons-matière (ici 4 à 5 µm) est supérieure à celle de l'objet analysé, les éléments constitutifs de la matrice environnante vont apparaître dans l'analyse, modifiant ainsi les proportions relatives.

Ce problème se rencontrera aussi avec les phases situées sous la surface (non visibles à la surface de l'échantillon) et qui vont interagir avec le faisceau d'électrons jusqu'à environ 1µm de profondeur.

Pour limiter les erreurs sur les mesures, nous avons donc réalisé de nombreux essais sur chaque échantillon. La figure (3-9), choisie comme exemple, montre le résultat de cette identification pour les échantillons provenant du Sénégal. Elle représente une micrographie de l'échantillon n°3 sur lequel les résultats des analyses ont été reportés. Sur les graphiques, l'ordonnée est fonction de l'intensité du rayonnement émis par l'élément et l'abscisse est fonction de l'énergie de ce rayonnement, laquelle est caractéristique des espèces chimiques (annexe II-2).

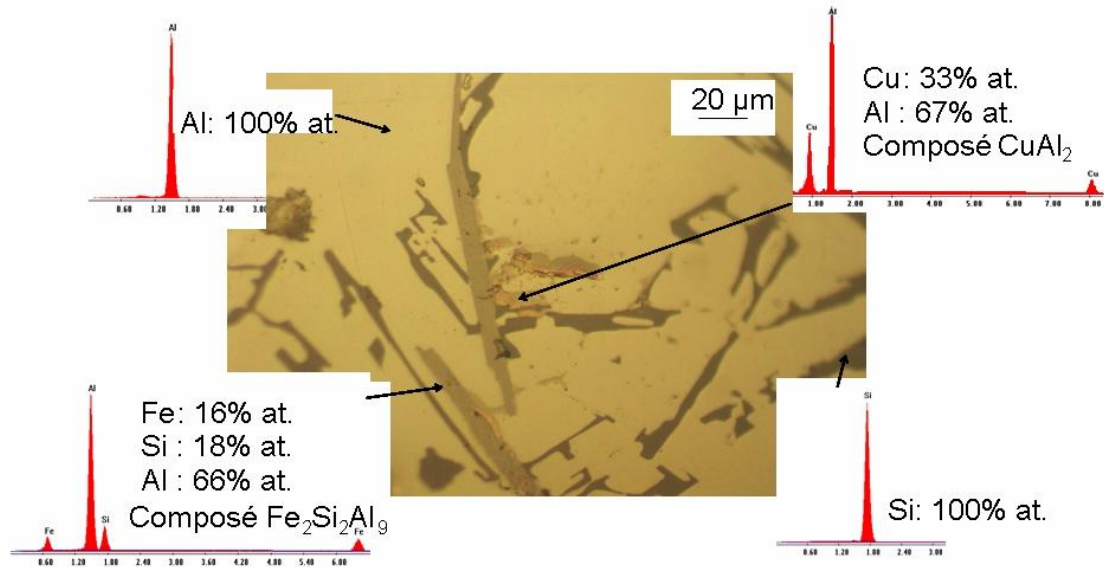


Figure 3-9 : Identification des différentes phases d'un alliage artisanal du Sénégal (exemple de l'échantillon n°3).

Nous identifions ici la matrice constituée d'aluminium. Les aiguilles sombres sont formées de silicium, les zones rosées correspondent au composé Al_2Cu . Les grandes aiguilles brun clair correspondent au composé intermétallique $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$ dont la présence est assez courante dans les alliages d'aluminium riches en fer^{76, 77} (composition proche de celle du composé FeSiAl_5).

Dans les alliages riches en magnésium (comme l'échantillon n°2 avec 0,306% en masse de Mg), le silicium et le magnésium se combinent pour former le composé Mg_2Si comme le montre la figure (3-10).

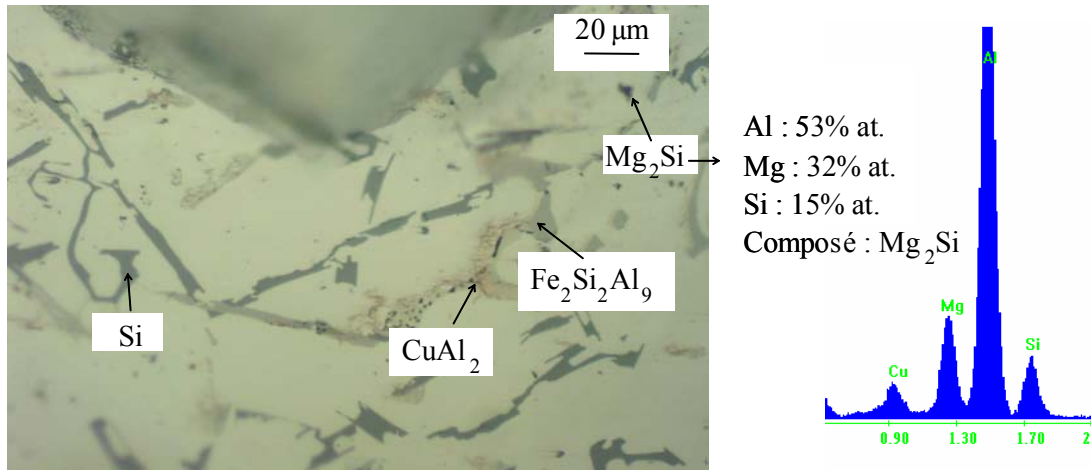


Figure 3-10 : Identification du composé Mg_2Si sur l'échantillon n°2 représentatif des échantillons riches en magnésium.

L'analyse élémentaire couplée à l'observation des surfaces au MEB nous a aussi montré la complexité de la microstructure dans laquelle d'autres éléments mineurs (Mn, Pb, Ni) sont présents

mais en quantité moindre :

i) Le manganèse a été analysé dans le proche voisinage du composé $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$ ou associé dans la plupart des cas, au fer, au silicium, à l'aluminium et au cuivre. Des auteurs ont montré qu'il forme des composés stables tels que $(\text{FeMn})_3\text{SiAl}_{12}$ et $(\text{CuFeMn})\text{Al}_6$ dans les alliages d'aluminium contenant du silicium et du cuivre. Nous pouvons donc légitimement supposer que ces composés contenant du manganèse peuvent se former dans nos échantillons. De plus, aussi bien le fer que le cuivre purs peuvent dissoudre, en solution solide, une certaine proportion de manganèse (d'après les diagrammes binaires correspondants) d'où une certaine affinité du manganèse pour ces éléments. La figure 3-11 donne un exemple d'analyse de microstructure où l'on décèle la présence de manganèse. La petite taille des phases rend l'interprétation de l'analyse difficile aussi nous ferons l'hypothèse, en adéquation avec les données de la bibliographie, de l'existence de la phase $(\text{CuFeMn})\text{Al}_6$.

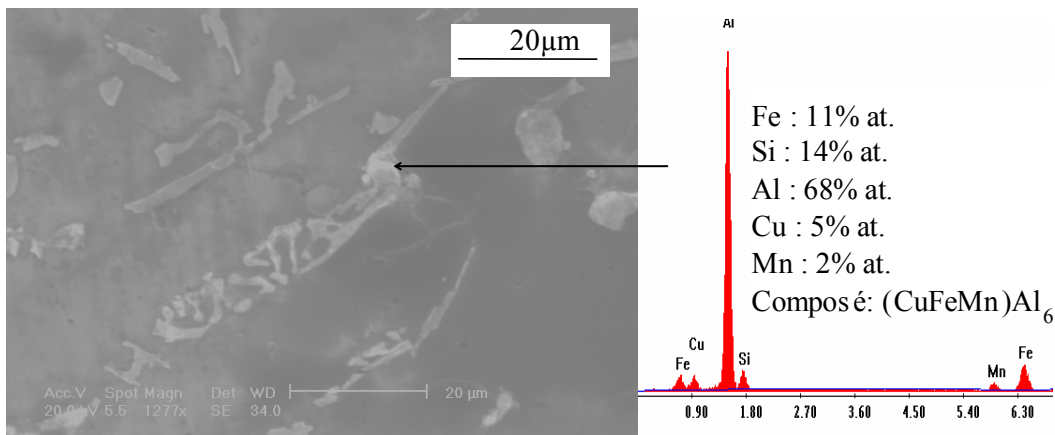


Figure 3-11 : Analyse de la présence de manganèse sur l'échantillon n°1.

ii) De petites particules riches en cuivre ont été observées, amalgamées avec des fragments du composé Al_2Cu (figure 3-12).

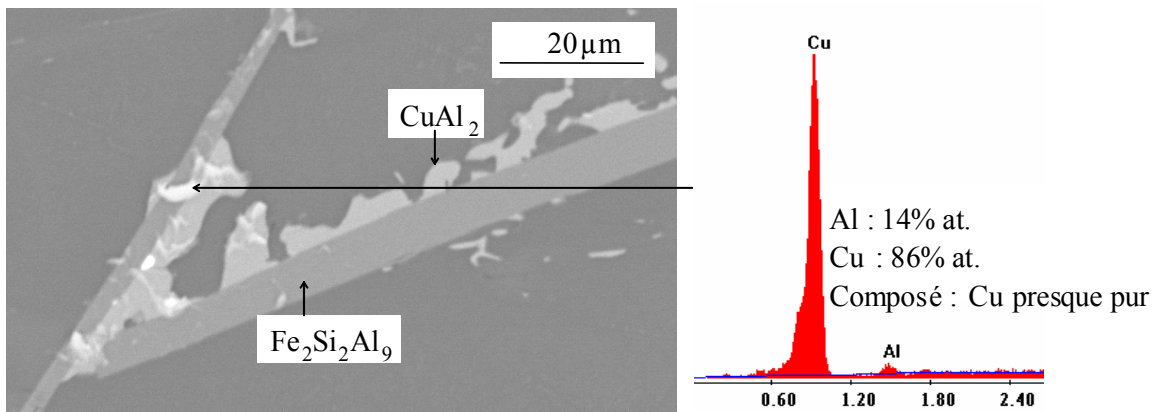


Figure 3-12 : Particules riches en cuivre associées à des cristaux de Al_2Cu sur l'échantillon n°5.

Ces nodules, incrustés dans le composé Al_2Cu , peuvent être les résidus d'attaque de petites particules de cuivre pur par l'aluminium liquide au moment de la fusion, provenant de déchets composites Al/Cu.

iii) Le nickel est toujours localisé dans des constituants contenant par ailleurs du cuivre et de l'aluminium. Des auteurs ont montré l'existence d'un composé Cu_3NiAl_6 (très proche de Al_2Cu). Il en est de même avec le magnésium qui peut former le composé CuMgAl_2 .

L'analyse chimique de l'agrégat représenté sur la figure 3-13 laisse supposer l'existence du composé Al_2Cu dans lequel les éléments Mg et Ni ont été intégrés.

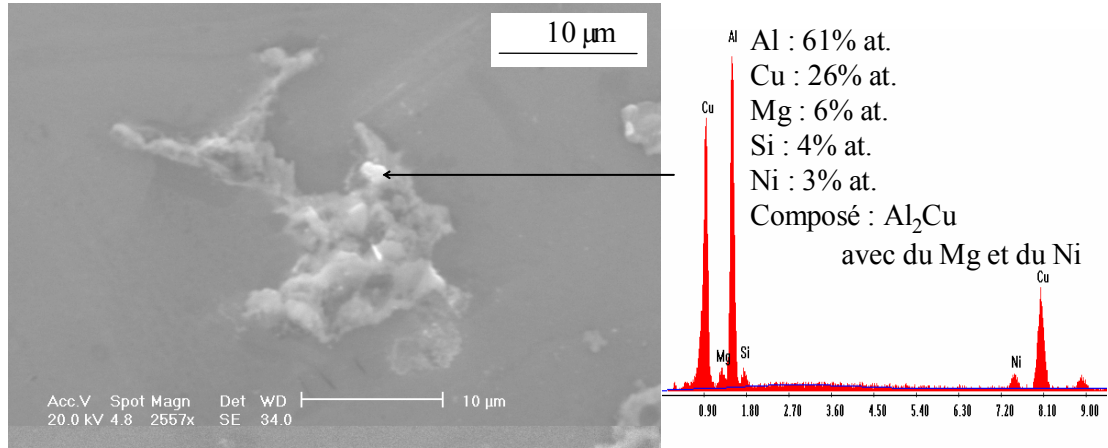


Figure 3-13 : Agrégat de Al_2Cu ayant intégré du Mg et du Ni (l'échantillon n° 14).

iv) Le plomb, présent dans l'échantillon n°14 en quantité hors norme (0,12% en masse), forme de petites particules sphériques de taille micrométrique (figure 3-14) qu'il est difficile de reconnaître dans le foisonnement des détails microstructuraux des échantillons observés. Le plomb étant insoluble dans Al, Si et Cu, la présence de cet élément lors de l'analyse est liée à une taille de la zone d'interaction électrons/matériau plus grande que celle de la phase à analyser, comme nous l'avons souligné précédemment.

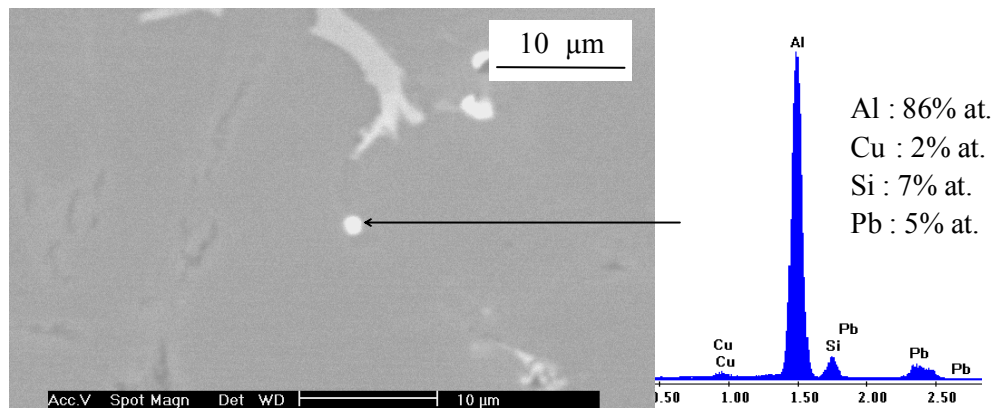


Figure 3-14 : Particule de plomb incrustée dans la matrice d'aluminium sur l'échantillon n°3.

v) Des éléments chimiques tels que le carbone, l'oxygène, le sodium le chlore et le potassium ont été détectés localement comme le montre la figure 3-15.

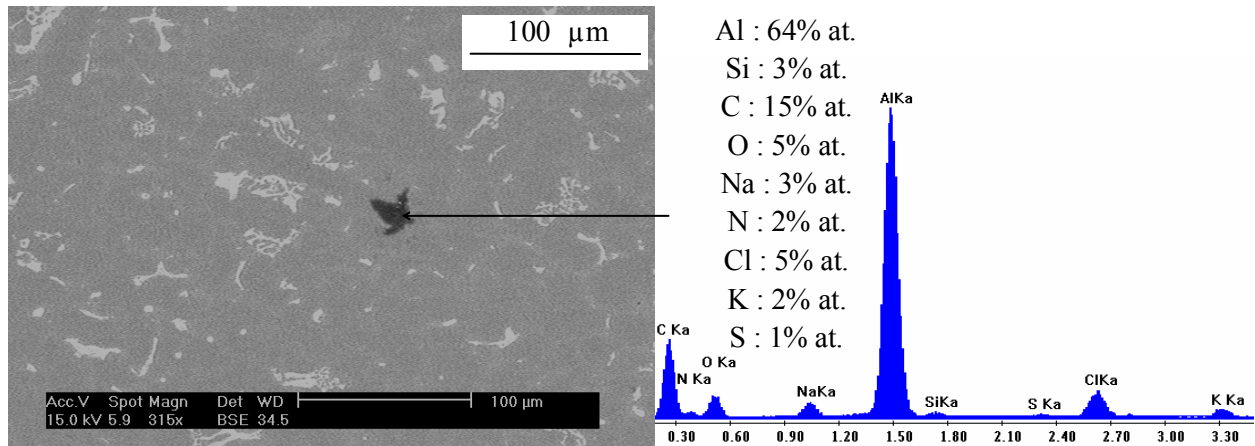


Figure 3-15 : Analyse de la zone sombre pointée par la flèche sur l'échantillon n°1.

Leur présence inattendue peut être liée à certaines pratiques dans le milieu des fondeurs : dispersion de chlorure de sodium pour agglomérer les scories d'alumine, introduction des sacs plastiques (composés chlorés) pour « affiner » les alliages.

vi) En revanche, nulle trace de zinc dont les analyses chimiques au spectromètre à étincelle font état en quantité supérieure à la norme. Cet élément est peu miscible avec l'aluminium à température ambiante. Il forme toutefois avec le magnésium un composé intermétallique $MgZn_2$ que nous n'avons pas identifié.

Pour conclure l'étude des caractéristiques métallurgiques des alliages utilisés dans la fabrication des ustensiles de cuisine au Sénégal, nous retenons qu'ils contiennent tous du silicium en proportions variables mais inférieures aux 13% correspondant à l'eutectique Al-Si. Ces alliages comportent par ailleurs d'importantes proportions de cuivre et de zinc qui les mettent en dehors de la réglementation actuellement en vigueur dans les pays européens.

Sur le plan microstructural, ces matériaux, bien que très diversifiés au niveau de la composition chimique, sont constitués d'une matrice d'aluminium dans laquelle nous trouvons systématiquement mais en proportions variables des aiguilles de silicium, des intermétalliques Al_2Cu et $Fe_2Si_2Al_9$. A cette structure de base peuvent être incorporés, suivant la composition des alliages, les éléments tels que le Mg, Mn et Ni que l'on trouve très imbriqués dans les agrégats complexes formés à partir des deux composés cités précédemment.

La formation de cette multitude de constituants peut expliquer la présence de l'accident thermique relevé sur la courbe d'analyse thermique (figure 3-4).

Dans l'échantillon témoin, nous distinguons deux phases en dehors de la matrice dont les compositions sont données par la figure 3-16. Il s'agit de particules contenant soit du fer soit du silicium.

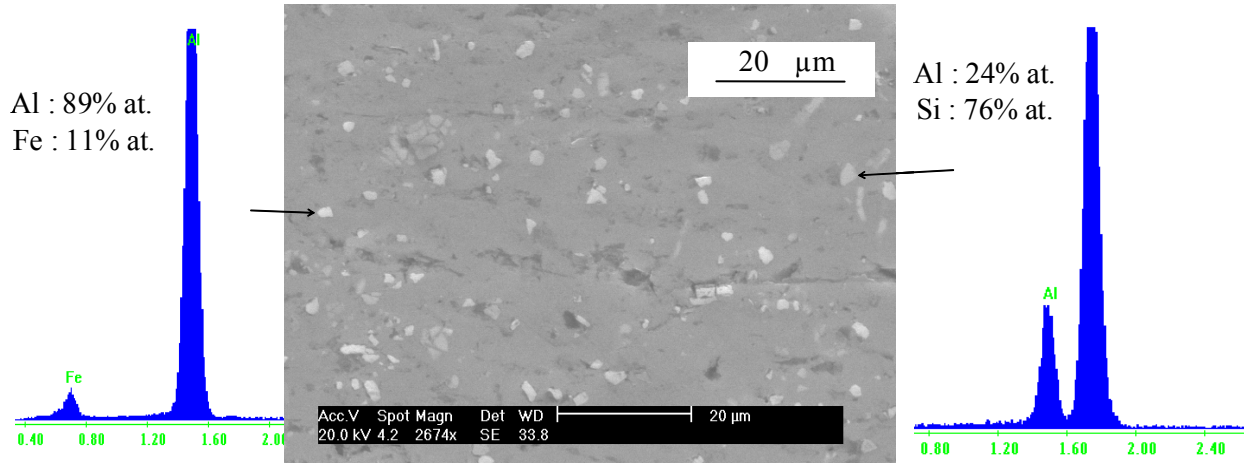


Figure 3-16 : Analyse des zones pointées par les flèches sur l'échantillon témoin.

III-2-3 Caractérisation mécanique des alliages

Des mesures de dureté Vickers sous une charge de 3 kg (HV_3) ont été réalisées sur chaque échantillon afin d'évaluer cette propriété mécanique. Les résultats ont été reportés sur le tableau 3-6 suivant. Sur ce tableau, chaque valeur est une moyenne d'une vingtaine de mesures de dureté sur l'échantillon intéressé.

n°Echantillon.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Témoin
$HV_3 \pm 5$	82	73	84	84	64	72	62	65	64	63	73	92	90	80	70

Tableau 3-6 : Dureté moyenne HV_3 des échantillons d'alliages d'aluminium étudiés.

Les duretés sont en accord avec celles mesurées sur des alliages industriels de compositions voisines⁵², à l'état brut de coulée.

IV Résistance à la corrosion en milieu culinaire

IV-1 Procédure expérimentale

Dans cette partie de l'étude, nous nous intéressons aux transferts de matière susceptibles d'apparaître entre les ustensiles de cuisine et les milieux culinaires avec lesquels ils sont mis en contact, sachant par ailleurs que les alliages produits par les artisans fondeurs sont tous en dehors de la norme européenne qui régit la composition des alliages d'aluminium destinés à cet usage. Nous nous focalisons donc sur l'aluminium qui est quantitativement l'élément le plus important, et sur le cuivre et le zinc dont les teneurs dépassent celles tolérées par la norme.

Toutefois nous ne chercherons pas à vérifier expérimentalement la toxicité de nos alliages, problème pour lequel nous ne sommes pas compétents (tests à mener sur des êtres vivants).

En l'absence de tests préconisés par les normes, nous avons mis en œuvre des essais

représentatifs des conditions de préparation d'aliments au Sénégal. Dans ce but, nous avons choisi les milieux suivants :

- de l'eau du robinet appelé milieu O ;
- des mélanges d'eau du robinet et de sel de cuisine titrés à 9 g/l et 3 g/l, appelés milieu OS, représentant respectivement les teneurs moyennes en sel du sang et des plats cuisinés vendus en supermarché ;
- un mélange d'eau du robinet et de riz appelé milieu OR (15 g de riz brisé parfumé dans 250 ml d'eau du robinet). Le riz est en effet la céréale la plus consommée au Sénégal où les habitants en consomment en moyenne une fois par jour accompagnée de légumes, de poissons ou de viandes ;
- de la tomate fraîche pelée transformée en purée (100 g) appelée milieu TF. Comme le riz, la tomate est largement utilisée en cuisine sénégalaise ;
- du concentré de tomate appelé milieu OCT (30 g de concentré de tomate + 40 ml d'eau du robinet). Le concentré de tomate est aussi très utilisé en cuisine sénégalaise notamment pour la préparation de sauces ;
- de l'huile d'arachide raffinée appelée milieu H. Le Sénégal produit en effet de l'arachide qui est transformée sur place en huile utilisée pour la cuisine.

La cuisine se faisant la plupart du temps à chaud, nous avons testé ces milieux à la température d'ébullition pour simuler des conditions réelles de cuisson, sauf pour l'huile où la température a été maintenue autour de 150°C, température préconisée par la directive 97/48/CE du conseil de l'Europe pour réaliser des tests de migration sur les emballages métalliques. Les temps de cuisson cumulés adoptés dans nos tests sont de 15 mn, 30 mn, et 60 mn (15 mn + 15 mn + 30mn). Ils simulent le cycle thermique des aliments cuits et réchauffés au Sénégal. Entre chaque cycle thermique, le milieu est refroidi. Nous noterons aussi que pour compenser l'évaporation pendant la phase de cuisson, de l'eau distillée a été ajoutée périodiquement pour maintenir le volume du mélange constant et éviter ainsi une surconcentration en éléments dissous dans l'eau.

En parallèle avec ces essais en température, des tests ont été réalisés à la température ambiante sur le milieu OS.

Les échantillons d'alliages d'aluminium utilisés pour ces essais de résistance en milieu culinaire se présentent sous deux formes :

- des plaquettes parallélépipédiques d'environ 2 cm de côté et d'épaisseur 2 mm, dont l'une des surfaces a été préparée par polissage pour suivre l'évolution de l'état de surface sous l'action des différents milieux. Ces plaques serviront également à suivre l'évolution de la perte de masse des échantillons au cours des différents tests ;
- des copeaux prélevés par tournage à partir de nos échantillons bruts. Nous les avons utilisés lors des tests visant à quantifier le transfert de matière, pour accroître la surface de contact métal-milieu. Pour une épaisseur moyenne de copeaux de 0,1 mm, la surface disponible est d'environ 74 cm² par gramme d'alliage.

De cette façon, lorsqu'un échantillon parallélépipédique de 2 mm d'épaisseur et 3 g de copeaux

du même matériau sont placés au contact du milieu alimentaire dans un récipient en pyrex, la surface totale en contact avec le matériau est d'environ 231 cm².

Nous avons choisi, en fonction de leur composition chimique, deux alliages d'élaboration artisanale (échantillon n°1 et n°3) et l'autocuisseur en aluminium qui nous sert de témoin. Les échantillons ont été dénommés comme suit dans la suite des analyses :

- échantillon n°1, qui contient de faibles teneurs en silicium et en cuivre combiné avec un taux de magnésium élevé ;
- échantillon n°3, qui se différencie du précédent par de fortes teneurs en silicium et en cuivre avec un faible taux de magnésium ;
- échantillon n°3m, qui présente une structure modifiée du silicium obtenue par le traitement à la soude solide de l'échantillon n°3, (figure 3-7) ;
- échantillon de référence, appelé « témoin ».

Le tableau 3-7 rappelle la composition de ces différents échantillons retenus pour les tests en milieu culinaire.

% masse Échantillons	Si	Cu	Fe	Zn	Mg	Mn	Cr	Ti	Pb	Sn	Ni	Al
n°1	2,96	0,837	0,726	0,73	0,748	0,204	0,0168	0,011	0,0418	<0,003	0,0836	reste
n°3 et n°3m	8,33	3,43	0,777	0,602	0,183	0,172	0,03	0,0512	0,0937	0,0246	0,189	reste
Témoin	0,17	<0,005	0,62	0,032	<0,01	<0,005	<0,005	0,016	<0,02	<0,02	<0,005	reste

Tableau 3-7 : Composition chimique des alliages utilisés dans les tests culinaires.

Afin d'éviter les nombreuses sources de dispersion inhérentes aux tests pratiqués en milieu alimentaire, le protocole expérimental suivant a été établi et mis en œuvre :

1) La plaquette et 3 g de copeaux sont plongés dans un récipient en pyrex contenant l'un des milieux identifiés plus haut, lorsque celui-ci a atteint la température prévue (150 °C pour le milieu H et environ 100°C pour les autres milieux).

2) A l'issue de chaque cycle de cuisson (15 mn + 15 mn + 30 mn), pendant lequel des ajouts d'eau distillée ont compensé les pertes dues à l'évaporation, l'échantillon parallélépipédique est retiré et rincé à l'eau distillée puis à l'alcool dans un bain à ultrasons.

3) L'échantillon nettoyé est ensuite placé dans une étuve à 110°C, pendant une demi-heure au minimum, pour enlever toute trace d'humidité avant d'être pesé avec une balance de précision (le résultat est rapporté à la surface initiale), puis observé au microscope optique, au MEB et à l'AFM. L'analyse locale de la surface, faite à l'aide de l'AFM après chaque étape du test, permet de cartographier les reliefs de surface et d'apporter des informations plus précises sur la formation de cavités et le comportement des différentes phases au cours de la corrosion. Par ailleurs, des valeurs de rugosité peuvent être obtenues de ces analyses parmi lesquelles nous avons retenu l'indice *Rq* (annexe III-4) qui donne l'écart moyen quadratique du profil. Notons à ce propos que pour suivre l'évolution de l'indice de rugosité d'un échantillon après différents tests, les mesures doivent être réalisées sur la même surface, ce qui a été fait lors de nos mesures.

4) Après analyse, l'échantillon testé est de nouveau placé en milieu culinaire pour subir un nouveau cycle thermique avant d'être encore analysé.

5) En fin de test de corrosion, une partie du milieu culinaire est prélevée (25 ml) pour analyser les espèces chimiques sélectionnées. Dans ce but des tests qualitatifs sont réalisés par colorimétrie (annexe III-5) pour la recherche d'ions aluminium, cuivre et zinc de même que des mesures quantitatives, grâce au spectromètre d'émission à plasma induit ICPMS (annexe III-6). Elles nous permettent de suivre les transferts de matière du métal vers le milieu culinaire pour les éléments tels que l'aluminium, le cuivre, le zinc, et dans certains cas le silicium, le plomb et l'étain. Le choix s'est porté sur ces éléments en raison de leurs teneurs importantes dans la composition chimique des alliages.

IV-2 Résultats qualitatifs : étude de la microstructure des échantillons

Avant d'entamer l'étude systématique de la résistance à la corrosion des échantillons en milieu culinaire, des tests préliminaires ont été réalisés dans différents milieux afin de saisir, de façon qualitative la dégradation des matériaux. Les résultats présentés permettent aussi de tester la validité de la méthode d'évaluation de la corrosion sur nos échantillons par le suivi des modifications de surface de ces derniers :

i) L'échantillon n°3, plongé à la température ambiante dans une solution OS à 9 g/l se dégrade au cours du temps comme le montre la figure 3-17.

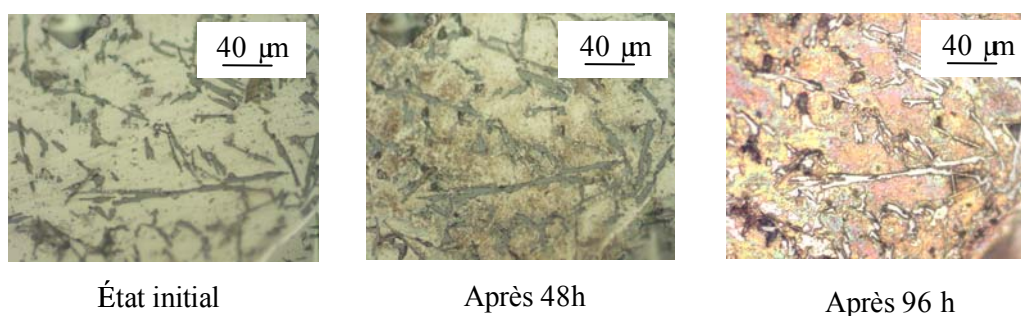


Figure 3-17 : Corrosion de l'échantillon n°3 dans le milieu OS à 9 g/l à température ambiante.

Au bout de 48h, la corrosion se manifeste par une attaque préférentielle de la matrice d'aluminium et après 96h, quelques piqûres sont visibles. Par colorimétrie, la présence d'ions aluminium a été détectée dans la solution.

ii) L'échantillon n°3 plongé dans une solution OS à 9 g/l bouillante montre une rapide dégradation de la surface comme l'illustre la figure 3-18.

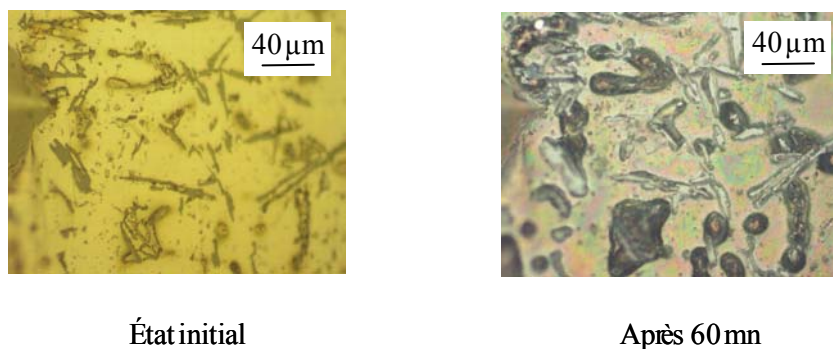


Figure 3-18 : Corrosion de l'échantillon n°3 dans le milieu OS à (9 g/l) porté à ébullition pendant une heure.

La même zone, photographiée avant et après ce test, montre une attaque du matériau au niveau des aiguilles de silicium et des composés intermétalliques, laissant penser que la matrice d'aluminium a subi une attaque préférentielle.

iii) L'échantillon n°1 plongé dans une solution OS à 3 g/l à ébullition montre, de façon encore plus évidente, une corrosion du matériau dans la matrice d'aluminium autour des aiguilles de silicium et des composés intermétalliques (figure 3-19). De l'aluminium a encore été mis en évidence par colorimétrie dans la solution.

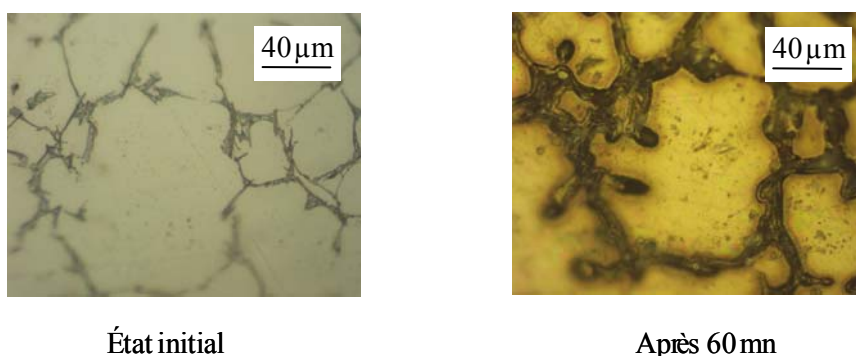


Figure 3-19 : Corrosion de l'échantillon n°1 dans le milieu OS à (3g/l) porté à ébullition pendant une heure.

iv) L'expérience conduite avec l'échantillon n°1, mais dans de le milieu OR, conduit au même résultat (figure 3-20). De l'aluminium a aussi été mis en évidence dans la solution par colorimétrie.

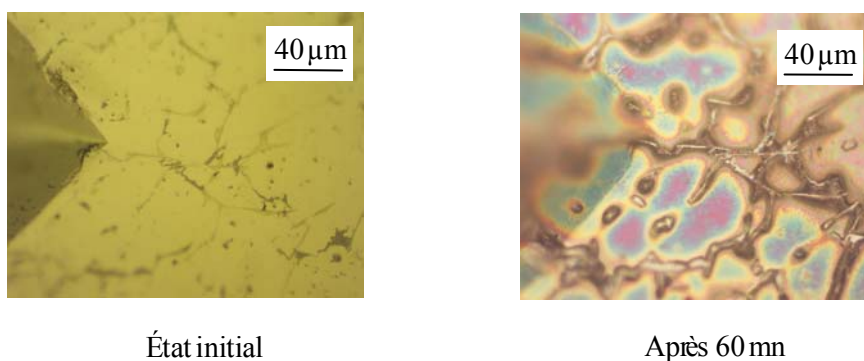


Figure 3-20 : Corrosion de l'échantillon n°1 dans le milieu OR porté à ébullition pendant une heure.

Ainsi, à l'issue de quelques tests préliminaires, nous constatons que les alliages artisanaux ne sont pas inertes face aux aliments avec lesquels ils entrent en contact et nous remarquons des conséquences importantes sur la microstructure, plus particulièrement au niveau des interfaces entre l'aluminium et les autres phases.

IV-3 Résultats quantitatifs : profilométrie 3D et pertes de masse

Les résultats des tests quantitatifs sur nos échantillons dans les différents milieux sont regroupés sur les figures et tableaux ci après.

Les pertes de masse des échantillons sélectionnés, après des temps de test cumulés de 15 mn, 30 mn et 60 mn dans les conditions et les milieux retenus ont été présentées sous forme d'histogrammes sur la figure 3-21. Le milieu OS à 9 g/l n'a pas été retenu pour ces tests quantitatifs car notre objectif était de nous rapprocher des conditions moyennes de cuisine au Sénégal. L'incertitude sur nos mesures a été évaluée à $\pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$. Elle est représentée sur les histogrammes par des barres verticales.

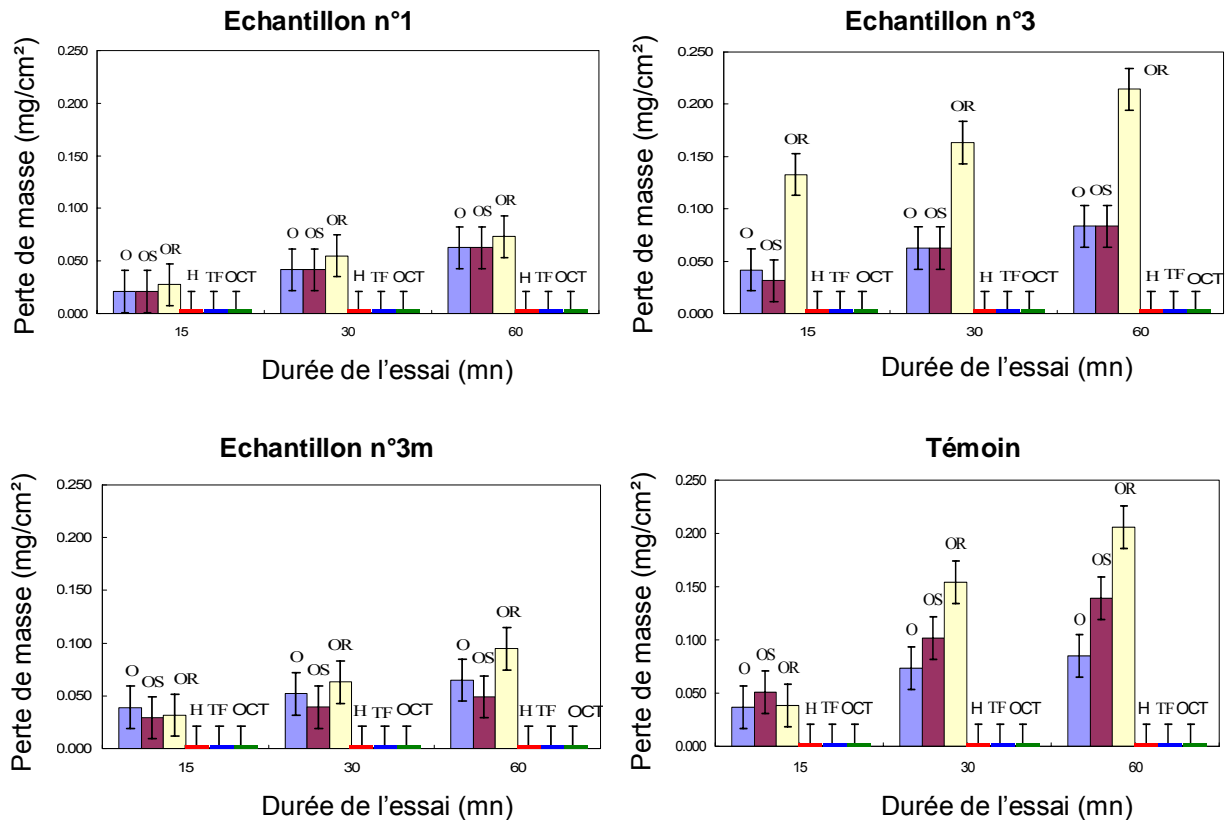


Figure 3-21 : Histogramme de pertes de masse cumulées des différents échantillons dans les différents milieux d'expérimentation.

Les courbes d'évolution des pertes de masse cumulées des différents échantillons dans divers milieux sont représentées sur la figure 3-22.

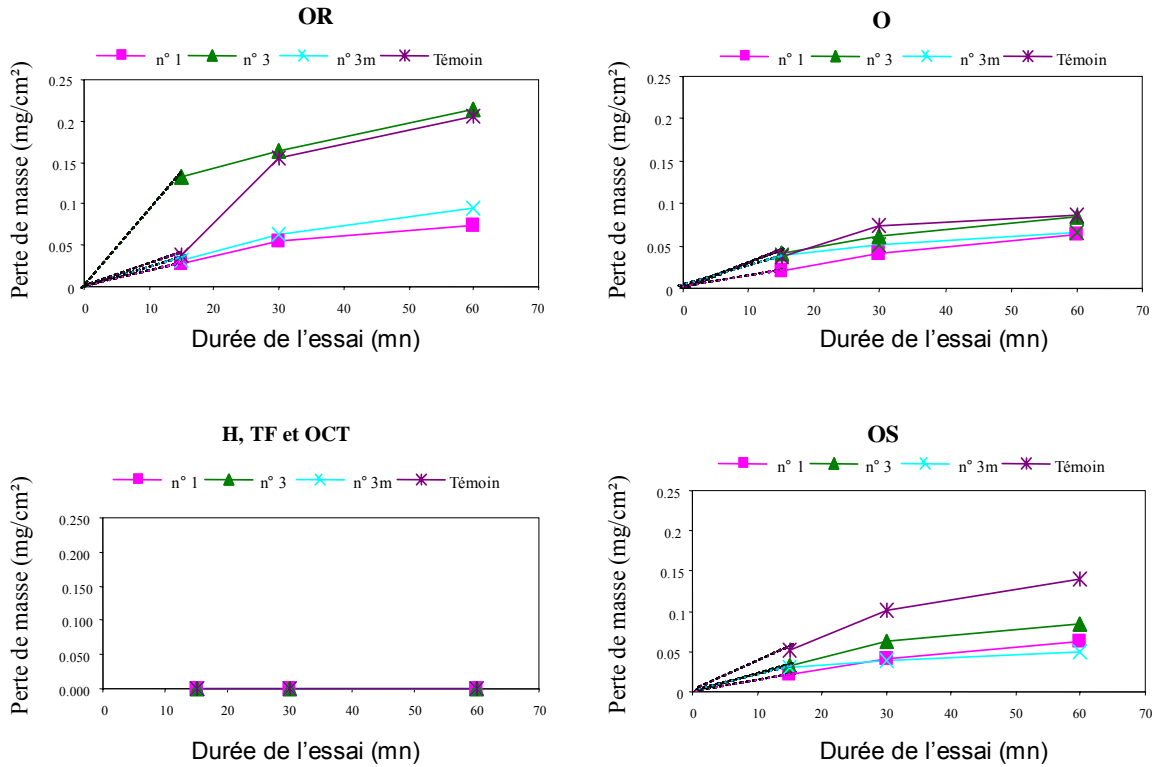


Figure 3-22 : *Courbes d'évolution de la perte de masse en fonction du temps pour les différents milieux considérés.*

L'examen des histogrammes et des courbes d'évolution de la perte en masse permet de tirer les conclusions suivantes :

- la perte de masse augmente régulièrement en fonction du temps pour les milieux les plus agressifs qui sont les milieux O, OS et OR ;
- les milieux TF, OCT et H ne donnent pas lieu à des pertes mesurables avec les moyens employés ;
- le milieu OR est le plus agressif ;
- l'échantillon n°1 présente la meilleure résistance à la corrosion alors que l'échantillon témoin, contre toute attente, a la plus grande perte de masse observée.

Les mesures réalisées par l'AFM sur les surfaces à l'issue de ces essais ont permis de déterminer des valeurs du paramètre de rugosité Rq représentées sur la figure 3-23.

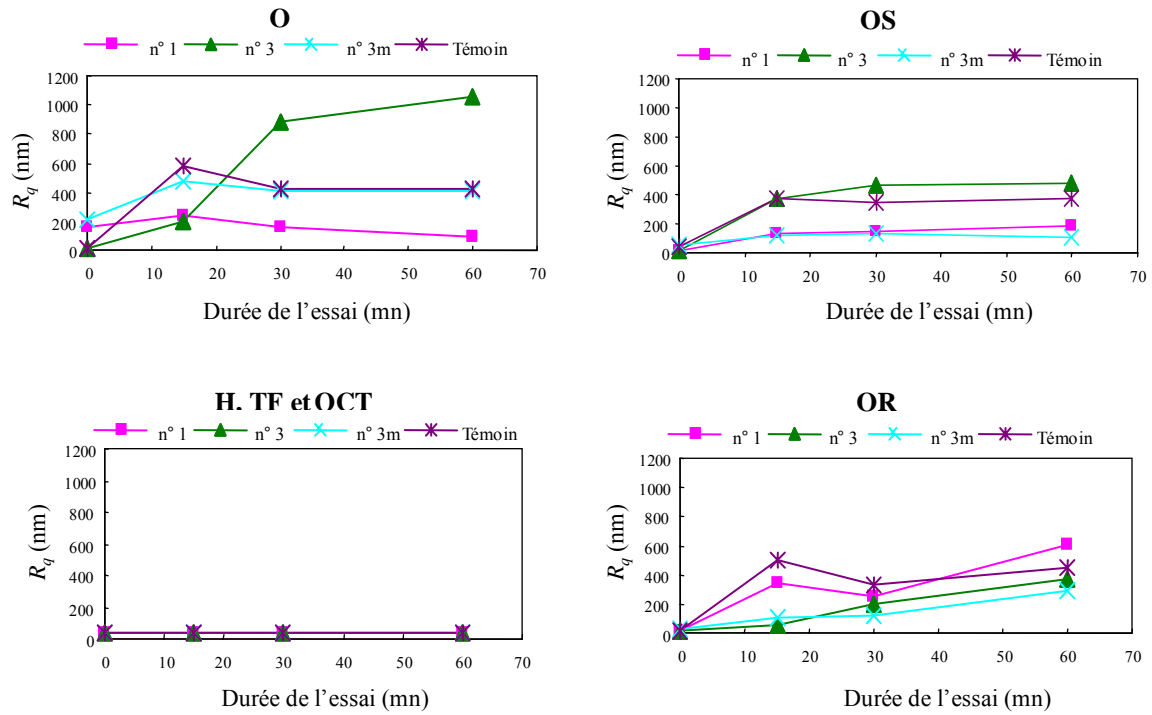


Figure 3-23 : Evolution du paramètre de rugosité R_q en fonction du temps, dans les différents milieux de corrosion.

Nous remarquons que la valeur du paramètre de rugosités R_q mesurée sur les surfaces évolue de différentes manières :

a) Peu ou pas de variation en fonction du temps

C'est le cas de l'ensemble des échantillons plongés dans les milieux H, TF et OCT. L'examen de la cartographie 3D de la surface, illustrée par la figure (3-24), nous révèle que la surface ne subit pas de modifications significatives.

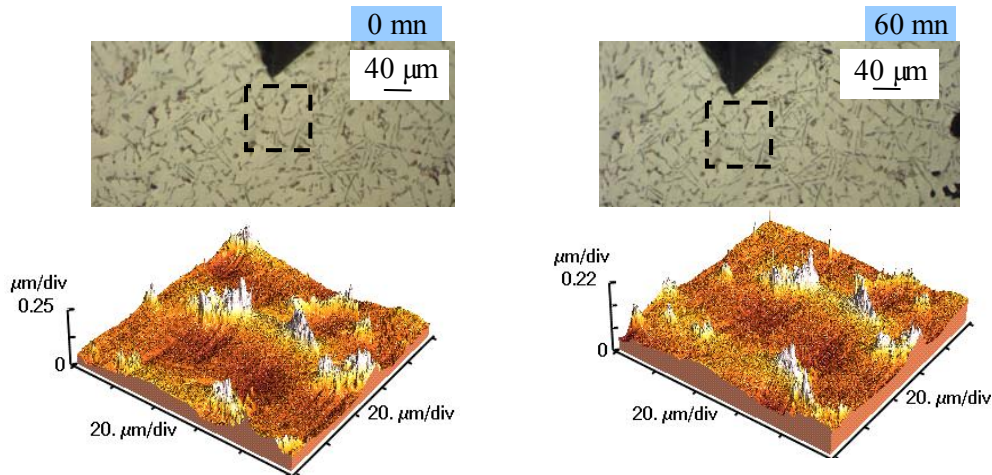


Figure 3-24 : Exemple de micrographies optiques et profil 3D de la surface de l'échantillon n°3 pour un test en milieu H.

b) Variation progressive et régulière plus ou moins marquée de R_q en fonction du temps

La variation est modulée par la nature du milieu. Cette évolution a été observée notamment sur l'ensemble des échantillons testés dans le milieu OR, ou sur l'échantillon n°3 dans le milieu O. L'observation au microscope à force atomique de la surface de cet échantillon, illustre la variation de R_q évoquée (figure 3-25).

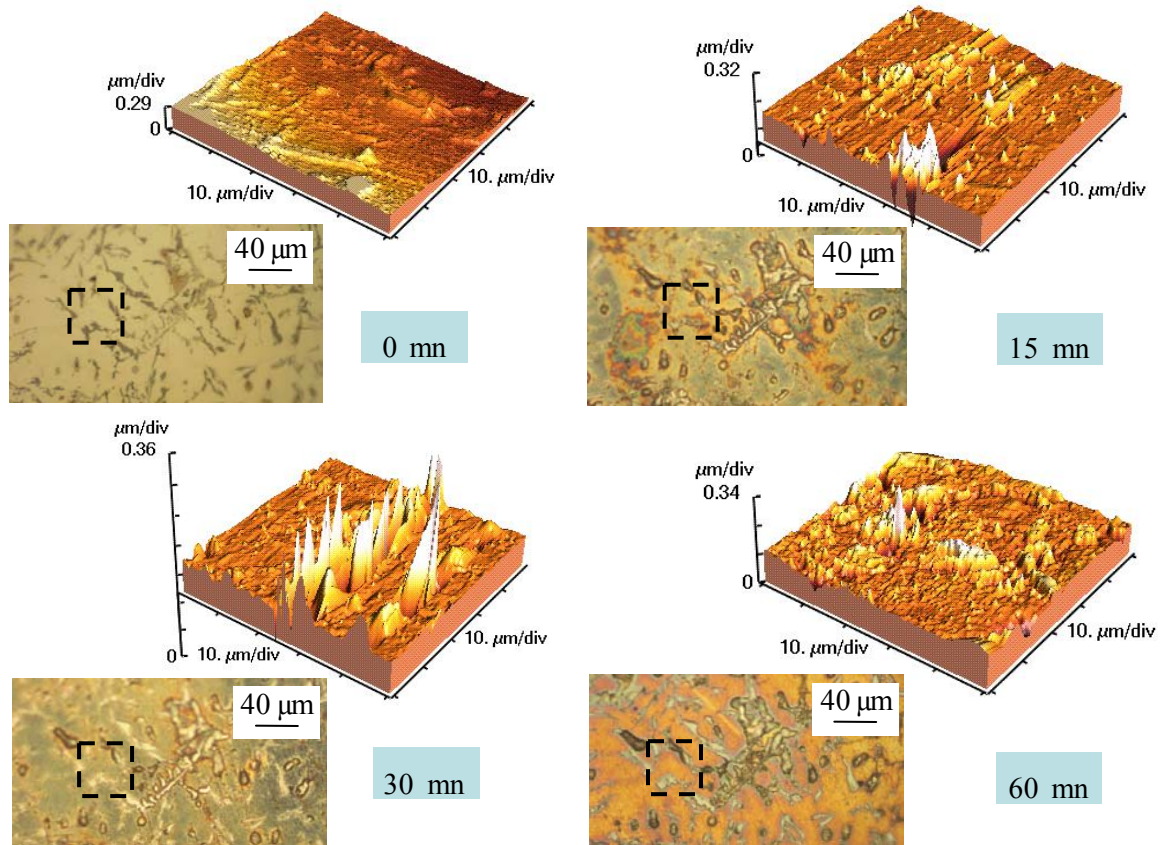


Figure 3-25 : Evolution de la surface de l'échantillon n°3 au cours du temps dans le milieu O (profils 3D et micrographies optiques).

La figure 3-25 montre des cavités ou des sillons d'attaque localisés à l'emplacement des composés intermétalliques et des aiguilles de silicium.

c) Variation importante de R_q pendant le premier quart d'heure suivie d'une phase stationnaire voire une légère décroissance

C'est le cas de figure observé sur le reste des échantillons. L'évolution constatée est, là encore, liée à la corrosion du matériau sur des sites localisés comme le montre la figure 3-26.

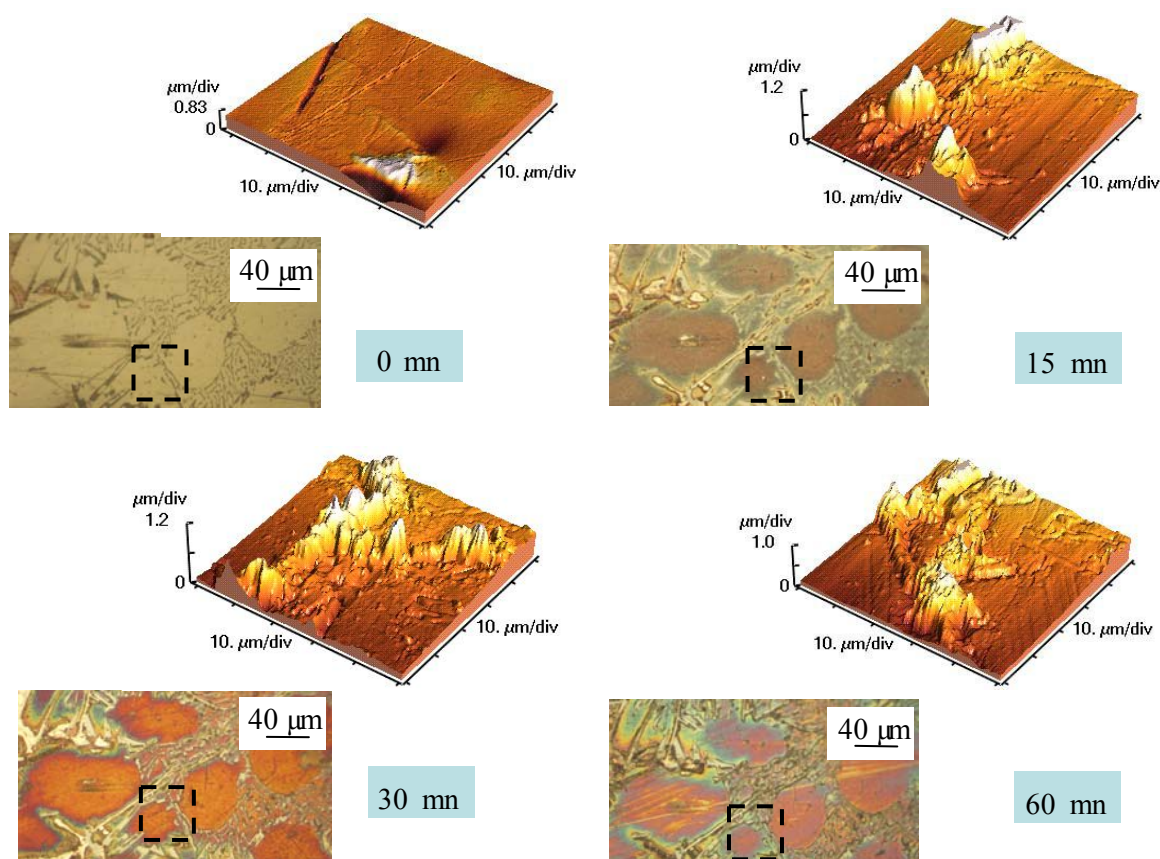


Figure 3-26 : Evolution de la surface de l'échantillon n°3m dans le milieu O au cours du temps (profils 3D et micrographies optiques).

Nous observons que la modification de la surface passe par une première phase de formation de piqûres (détectée dès 15 mn) suivie par une phase où le relief créé s'émousse ou s'aplanit, entraînant une diminution de R_q .

A l'issue de cette première analyse, nous constatons que la résistance à la corrosion des alliages issus du recyclage est gouvernée par la nature du milieu alimentaire (les milieux H, TF et OCT se sont révélés peu actifs alors que le milieu OR est le plus corrosif), par la composition des alliages et par la structure micrographique. Par ailleurs, ce sont les solutions aqueuses qui sont à l'origine des dégradations de surface les plus importantes. La corrosion aqueuse est donc impliquée dans le mécanisme mis en jeu.

IV-4 Analyse chimique des substrats de corrosion

Après avoir montré la mise en solution possible des alliages d'aluminium par corrosion au contact du milieu alimentaire, nous avons maintenant recherché les produits de la corrosion alimentaire dans l'aliment lui-même. Nous allons donc chercher à évaluer le transfert de matière. Les éléments recherchés, comme nous l'avons énoncé plus haut, sont l'aluminium, le cuivre, le zinc, et quelques fois

le silicium, le plomb ou l'étain. Leur choix se justifie encore plus maintenant, à la suite de l'observation grâce aux profils 3D, de la corrosion essentiellement localisée dans la matrice d'aluminium et au niveau des interfaces de cette matrice avec les autres phases.

Dans cette partie de l'étude, la corrosion a été prolongée jusqu'à 3 heures afin d'augmenter la concentration des ions issus de la corrosion dans les solutions. Le tableau 3-8 présente, à titre d'illustration, les résultats obtenus pour le milieu O.

	Ech n°1	Ech n°3	Ech n°3m	Témoin
Zinc	< 20 µg/l	< 20 µg/l	< 20 µg/l	< 20 µg/l
Cuivre	< 20 µg/l	< 20 µg/l	< 20 µg/l	< 20 µg/l
Aluminium	< 50 µg/l	< 50 µg/l	< 50 µg/l	< 50 µg/l

Tableau 3-8 : *Eléments chimiques quantifiés dans le milieu O après 3 h de corrosion.*

Ces analyses nous montrent que les quantités d'éléments métalliques présentes dans les milieux de corrosion sont toutes très faibles, de l'ordre de la dizaine de parties par milliard (µg/l) et ne reflètent pas les évolutions constatées au niveau des pertes de masse. Nous pouvons donc nous interroger sur la crédibilité de ces mesures.

IV-5 Analyse des résultats

Avant de rentrer dans l'analyse et la discussion des résultats issus de notre expérimentation, démarche dans laquelle nous avons cherché à établir des liens et des recoupements avec les travaux réalisés par d'autres auteurs, une remarque préalable paraît nécessaire pour situer le contexte dans lequel nous nous plaçons à ce stade de notre investigation.

Le comportement à la corrosion des alliages d'aluminium, matériaux largement utilisés dans le monde industriel, a fait l'objet de nombreuses études en rapport avec leurs domaines d'application (transport, énergie, génie civil, etc.) mais aussi dans le cadre de recherches fondamentales. Ces études sont cependant nettement moins nombreuses dans le domaine alimentaire qui nous préoccupe. De plus, dans ce cas précis, les travaux effectués portent essentiellement sur les aliments mis en contact avec les matériaux dans lesquels on cherche à évaluer le transfert de matière. Les auteurs ne se préoccupent presque jamais de la dégradation du matériau lui-même vue à travers les concepts de la science des matériaux, si bien qu'une mise en relation des deux aspects du problème est tout à fait novatrice. Le problème est aussi compliqué par la complexité des alliages étudiés, inclassables parmi les nuances produites industriellement.

IV-5-1 Etude du mécanisme de la corrosion de nos échantillons

a) Corrosion de l'aluminium

La corrosion aqueuse a largement été étudiée car responsable d'une grande partie de la dégradation des matériaux. Celle-ci débute, pour l'aluminium et ses alliages, par l'attaque du film protecteur d'alumine (Al_2O_3) qui recouvre spontanément ces matériaux exposés à l'air libre⁸². Pour

⁸² C. VARGEL dans *Le comportement de l'aluminium et de ses alliages*, DUNOD, Paris (1979).

l'aluminium pur, cette couche est continue et a même tendance à s'épaissir lorsque ce dernier est plongé dans l'eau bouillante. C'est le bohémitage, une opération industriellement pratiquée pour traiter superficiellement l'aluminium (formation de bohémite $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). En présence d'ions Cl^- , que l'on trouve par exemple dans l'eau du robinet⁸³ (inférieure à $200\mu\text{g/l}$) à la base de nos solutions corrosives, cette couche protectrice peut localement disparaître⁸⁴, mettant l'aluminium à nu qui devient une anode (figure 3-27).

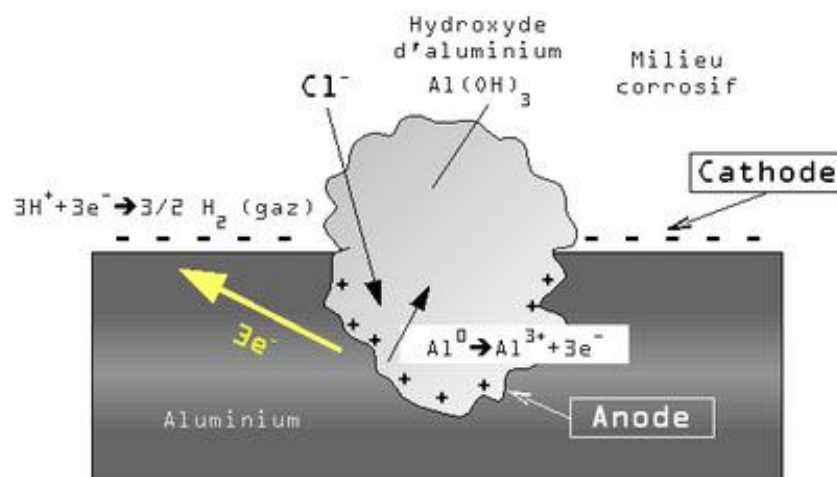
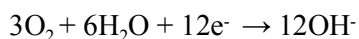


Figure 3-27 : Corrosion aqueuse de l'aluminium.

Sur cette anode, il se produit la réaction d'oxydation suivante :



La surface du métal (aluminium) environnant devient le siège d'une réaction cathodique dans laquelle l'eau est réduite :



Globalement, l'aluminium métallique se dissout pour former de l'hydroxyde d'aluminium suivant la réaction :



Il se produit ce qu'on appelle une piqûration⁸⁵. C'est le principe de la corrosion aqueuse décrit par C. Vargel dans son ouvrage sur le comportement de l'aluminium et de ses alliages. Ce mécanisme est aussi gouverné par la concentration en ions H^+ de la solution, c'est-à-dire son pH , et le potentiel électrique E de la pièce par rapport à la solution⁸⁶. L'étude de la corrosion du métal dans un milieu donné permet de tracer un diagramme $E\text{-pH}$ (diagramme potentiel, pH), sur lequel sont indiquées les zones de stabilité du métal M , celles de l'ion M^{n+} et de l'oxyde ou de l'hydroxyde du métal M qui en est

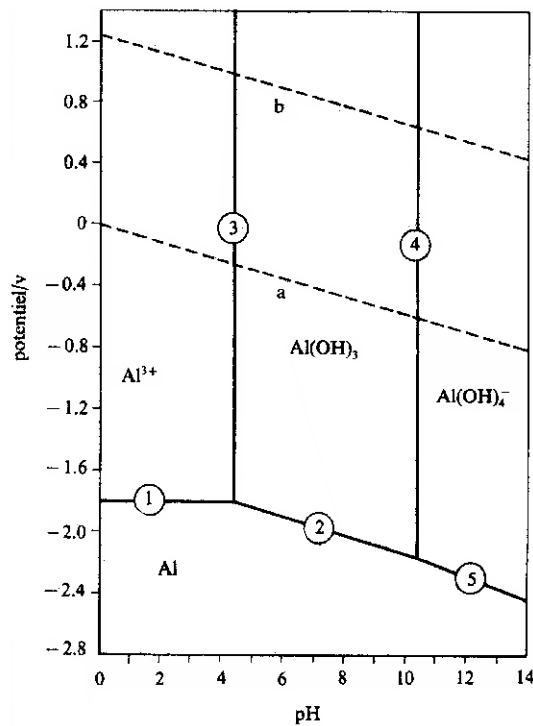
⁸³ Décret n°2001-1220 du 20-12-2001 relatif à la réglementation sur la potabilité de l'eau (mise en application le 24 dec. 2003).

⁸⁴ M. ERGUN, M. BALBASI, A. TOSUN, "Correlation model of aluminium pitting potential variation with environmental conditions", *British Corrosion Journal* 32(2) (1997) pages 117-121.

⁸⁵ D. ALTENPOHL dans *Aluminium viewed from within*, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, (1982).

⁸⁶ D. LANDOLT dans *Traité des matériaux, Corrosion et chimie des surfaces des métaux*, vol. 12, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne (2003).

issu. Ce diagramme porte le nom de diagramme de Pourbaix et nous présentons ici celui de l'aluminium dans l'eau (figure 3-28).



a : potentiel réversible de l'électrode à hydrogène
 b : potentiel réversible de l'électrode à oxygène
 a ↔ b : domaine de stabilité de l'eau à pression ambiante

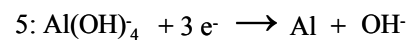
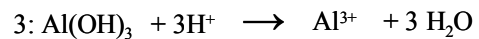
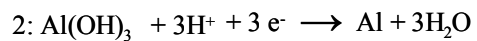
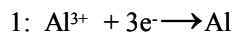


Figure 3-28 : Diagramme de Pourbaix de l'aluminium dans l'eau à 25°C⁸⁶

b) Corrosion des alliages d'aluminium de fabrication artisanale

Dans nos alliages d'aluminium, la microstructure est formée d'un mélange de phases, comme nous l'avons vu précédemment, comprenant en majorité des cristaux d'aluminium primaire, des composés intermétalliques et du silicium. Les différentes phases ayant des potentiels de corrosion différents^{87,88}, un couplage galvanique s'établit entre les différents constituants de la structure, et les zones anodiques passent en solution. La dégradation du matériau se manifeste alors par l'apparition et le développement de piqûres. Les composés intermétalliques et le silicium étant situés aux joints de grains des cristaux d'aluminium primaire, on parle de « corrosion intergranulaire »^{87,88} qui peut être activée par la présence d'ions Cl^- .

L'étude de la corrosion des métaux par les milieux alimentaires devient compliquée en raison de l'extrême diversité des espèces chimiques qu'ils contiennent, espèces variant en fonction de la provenance du produit, du mode de préparation et de cuisson de l'aliment, etc. Il est donc très difficile de maîtriser l'ensemble de ces facteurs pour avoir un milieu stable et reproductible dans les tests, et de comparer les résultats des essais à ceux obtenus par d'autres auteurs.

⁸⁷ R. P. WEI, C. M. LIAO, M. GAO, "A transmission electron microscopy study of constituent-particle-induced corrosion in 7075-T5 and 2024-T3 aluminium alloys" *Metallurgical and Material Transactions A* **29** (1998) pages 1153-1160.

⁸⁸ P. S. PAO, C. R. FENG, J. J. GILL, K.K. SANKARA, "Corrosion-fatigue crack growth in friction stir welded Al 7050" *Scripta Materialia* **45**(5) (2001) pages 605-612.

L'identification des mécanismes de corrosion devient ici indispensable pour connaître le rôle de chacun des éléments d'alliage dans le processus de transfert. La réponse à cette question peut être donnée par l'observation des surfaces des échantillons testés.

Les photographies des surfaces exposées à l'action des aliments tels que le riz, l'eau salée ou l'eau du robinet, montrent une étroite corrélation entre le site de la dégradation et la microstructure des alliages. Par des observations de surface, nous avons montré que des piqûres, voire de véritables sillons, apparaissent à proximité des aiguilles du silicium eutectique ou des composés intermétalliques contenant du fer ($\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$). Les agrégats contenant du cuivre sont quant à eux mis en relief par l'action des milieux alimentaires sur nos alliages. Les observations optiques des surfaces restent difficiles à interpréter pour savoir qui de la matrice d'aluminium, du silicium ou des intermétalliques subit en premier lieu l'action de la corrosion. L'observation des profils 3D obtenus par AFM, ou par interférométrie optique sur de petites zones présentant ces différentes phases apporte un début de réponse. L'échantillon n°3 que nous avons cartographié en interférométrie optique (figure 3-29) avant et après corrosion dans le milieu OR constitue un bon exemple.

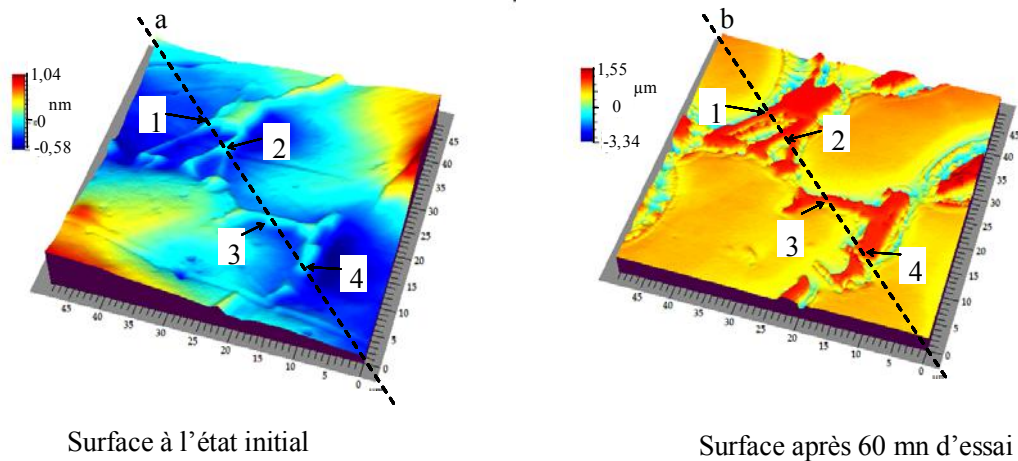


Figure 3-29 : Evolution de la surface de l'échantillon n°3 avant et après corrosion dans le milieu OR pendant 60 mn.

Après le test, on observe en relief, et nettement détachées, les aiguilles de silicium eutectique, bordées par un fossé d'attaque profond faisant la liaison avec la matrice d'aluminium à un niveau intermédiaire, ce que confirme le profil suivant la même diagonale donné par la figure 3-29.

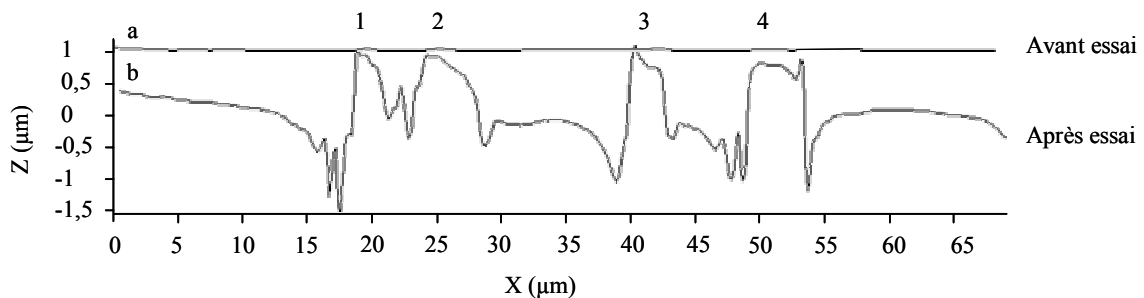


Figure 3-30 : Présentation, à la même échelle, de l'évolution de la surface suivant la diagonale de la figure 3-29 de l'échantillon n°3(a) avant et (b) après 60 mn de corrosion dans la solution OR.

Le paramètre de rugosité R_q mesuré sur la surface brute de polissage (état initial), de l'ordre d'une trentaine de nanomètres, passe après corrosion à une valeur de 500 nm, soit 17 fois plus.

Nous montrons ainsi que l'aluminium se corrode préférentiellement au niveau du silicium et des composés intermétalliques et confirmons, de ce point de vue, le mécanisme de corrosion par couplage galvanique en milieu aqueux des différentes phases présentes dans les alliages d'aluminium industriel observé par différents auteurs^{87, 88, 89, 90}.

D'autres auteurs⁹¹ ont toutefois noté le comportement différent des précipités riches en Mg qui, anodiques par rapport à l'aluminium, sont mis en solution. Le magnésium étant associé au zinc dans les composés de type $MgZn_2$, ces deux éléments vont donc passer en solution dans le milieu alimentaire.

De l'analyse précédente nous pouvons maintenant tirer les conclusions suivantes :

- la matrice d'aluminium attaquée par le milieu alimentaire va libérer des ions Al^{3+} , lesquels vont passer dans le milieu alimentaire ;
- l'attaque de l'interface aluminium-silicium ou aluminium-composés intermétalliques va conduire à un déchaussement des ces derniers, lesquels seront incorporés aux aliments sous leur forme solide. Leur mise en solution éventuelle dépendra alors du milieu. Dans la mesure où les composés intermétalliques restent insolubles, ce mode de dégradation des matériaux relativise l'effet d'une trop grande quantité de cuivre dans les alliages produits par les artisans fondeurs ;
- le magnésium, mais surtout le zinc, dont la concentration est supérieure à celle admise par la norme, stockés dans les alliages sous forme de solution solide, de composés intermétalliques, vont passer en solution dans le milieu alimentaire.

IV-5-2 Perte de masse des échantillons

Les courbes de perte de masse des échantillons dans les différents milieux de corrosion (figure 3-22) présentent une même allure générale faisant apparaître un premier stade (15 mn) pendant lequel la perte de masse est rapide, puis un deuxième stade où l'évolution de la variation de la masse en fonction du temps est quasi linéaire.

Le premier stade est lié en partie au décrochement de quelques particules solides de la surface non polie des échantillons, provenant de l'opération de fonderie et non éliminées par les opération de nettoyage (finitions), mais aussi à la formation de piqûres dont le développement est assez rapide en début d'essai suite au confinement des produits de corrosion (piqûres par différence de potentiel électrolytique).

Le deuxième stade ne fait pas apparaître de différences significatives (compte tenu des

⁸⁹ L. E. FRATILA-APACHITEI, I. APACHITEI, J. DUSZCZYK, "Characterization of cast Al-Si(Cu) alloys by scanning Kelvin probe force microscopy", *Electrochimica Acta* **51** (2006) pages (5892-5896).

⁹⁰ F. ANDREATTA, H. TERRY, J.H.W. DE WIT, "Corrosion behaviour of different tempers of AA7075 aluminium alloy", *Electrochimica Acta* **49** (2004) pages 2851-2862.

⁹¹ V. GUILLAUMIN, G. MANKOWSKI, "Localized corrosion of 6056 T6 aluminium alloy in chloride media", *Corrosion Science* **42** (2000) pages 109-125.

incertitudes) entre les vitesses de corrosion, à l'exception du milieu le plus agressif, le milieu OR et du témoin dans le milieu O, comme le montre le tableau (3-9).

Vitesse mg/(cm ² .h)	Éch. n°1	Éch. n°3	Éch. n°3m	Témoin
Milieu O	0,05 ± 0,02	0,05 ± 0,02	0,03 ± 0,02	0,06 ± 0,02
Milieu OS	0,05 ± 0,02	0,07 ± 0,02	0,02 ± 0,02	0,12 ± 0,02
Milieu OR	0,06 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,08 ± 0,02	0,22 ± 0,02

Tableau 3-9 : Vitesse de dégradation de la surface des matériaux dans les différents milieux entre l'état 15 mn et l'état 60 mn soit après 45 mn de corrosion.

Plusieurs aspects intéressants apparaissent :

a) Influence de la composition chimique des alliages

Celle-ci apparaît sur les pertes de masse brutes à l'issue du test de corrosion de 60 mn, mais aussi sur les vitesses de corrosion dans le milieu OR. Nous remarquons que l'échantillon n°1 présente globalement la meilleure résistance à la corrosion et ceci dans les différents milieux. L'échantillon témoin, est quant à lui le moins résistant (en dépit de la conformité du matériau par rapport aux normes européennes). L'échantillon n°3 a un comportement intermédiaire qui est cependant moins bon que celui de l'échantillon n°3m (modification de la microstructure par le sodium), lequel se rapproche de celui de l'échantillon n°1.

A la lumière des mécanismes de corrosion mis à jour précédemment et compte tenu de la composition chimique des échantillons, nous pouvons montrer le rôle particulier des divers éléments.

i) La quantité de silicium (pour la structure non modifiée) présente dans les alliages conditionne le nombre de sites de corrosion de l'aluminium. Plus elle est importante et plus la perte de masse sera conséquente. C'est ce que nous constatons en comparant les résultats des échantillons n°1 et n°3. Le cuivre et le fer jouent ici un rôle secondaire masqué par celui du silicium.

ii) Lorsque la quantité de silicium est faible (cas de l'échantillon témoin), le rôle du fer devient prépondérant et les nombreuses particules de composés intermétalliques à base de fer constituent autant de sites de corrosion dans le matériau.

iii) Le rôle particulier de la microstructure est mis en exergue sur l'échantillon n°3m dans lequel le silicium, sous l'effet du sodium libéré par l'action de la soude sur le fer, adopte une microstructure fibreuse. L'amélioration du comportement à la corrosion de ce matériau modifié, par rapport à celui de l'échantillon n°3 dont il est issu, illustrée par la figure 3-31, est ici liée au rapport entre les surfaces anodiques et cathodiques, plus faible sur l'échantillon n°3m que sur l'échantillon n°3, diminuant ainsi la densité de courant aux interfaces, mais aussi à une probable modification des différences de potentiel entre les phases allant dans le sens d'une diminution, comme l'ont montré L.E. Fratila *et al.*. Le critère principal choisi pour matérialiser cette différence de comportement en corrosion est la perte de masse par unité de surface.

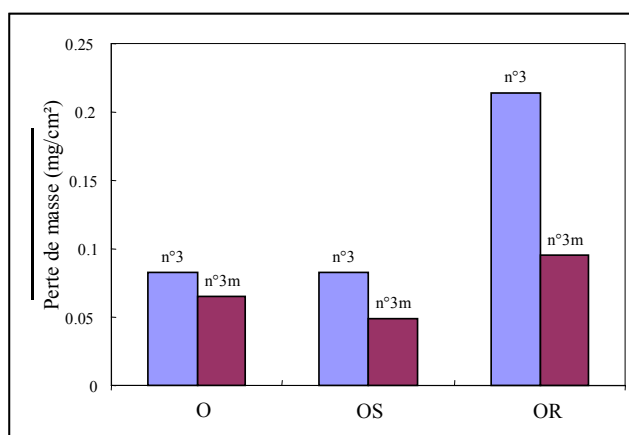


Figure 3-31 : Comparaison de la perte de masse totale des échantillons n°3 et n°3m après 60 mn dans les milieux O, OS et OR.

La perte de masse de l'échantillon dont la microstructure est modifiée par notre traitement à la soude (échantillon n°3m) est en moyenne 30% inférieure à celle de l'échantillon non traité (échantillon n°3). Cette masse de matière perdue par la marmite a une grande importance sur sa longévité. En effet, cette perte se traduit par une diminution de l'épaisseur de la marmite dont la fragilité augmente, ce qui diminue sa durée de vie. Le traitement opéré, en abaissant les pertes de matière, améliore donc la durée de vie de la marmite.

Par ailleurs, les quantités de soude utilisées pour cet affinage sont très faibles, environ 1% en masse et son prix d'achat est 4 fois inférieur à celui des déchets d'aluminium au Sénégal (d'après le prix en vigueur⁹² des pastilles de soude). Ainsi l'affinage de 100 kilos d'aluminium représente un investissement supplémentaire de l'ordre de 100 francs CFA (0,15 euros) sur une dépense totale supérieure à 40000 francs CFA (61 euros). L'utilisation de soude n'entraîne donc pas de surcoût significatif au niveau de la production des marmites donc n'influe pas sur leur prix de vente.

b) Influence du milieu

Les pertes de masse mesurées montrent peu d'influence de la teneur en sel de cuisine dans l'eau, compte tenu de la courte durée de nos essais et de l'incertitude sur nos mesures.

L'huile d'arachide, pour les mêmes raisons, n'a pas d'effets mesurables sur nos échantillons.

La tomate, contre toute attente, n'a pas causé de dégradations significatives. Pourtant, ce fruit est réputé pour son acidité, mais les essais ont été menés sur des tomates pelées achetées en hiver, qui ont donc poussé dans des conditions très artificielles. La provenance et la saison peuvent être responsables d'une modification de l'acidité de ces produits (le pH des solutions avec la tomate fraîche était autour de 7 tout le long de notre expérimentation). Les tests sur le concentré de tomate n'ont pas causé plus d'effet sur nos échantillons, le pH n'est pas différent de celui de la tomate fraîche. Les acidités de ces deux produits sont donc probablement équivalentes, ce qui est sûrement encore une

⁹² www.emarketlabo.com (sodium hydroxyde en pastilles)

conséquence de leur origine et de leur mode de culture.

La cuisson du riz révèle être une opération très agressive pour les différents alliages avec une perte de masse d'environ 0,2 mg/cm² au bout d'une heure pour l'échantillon le plus chargé en silicium.

IV-5-3 Le transfert de matière aux aliments

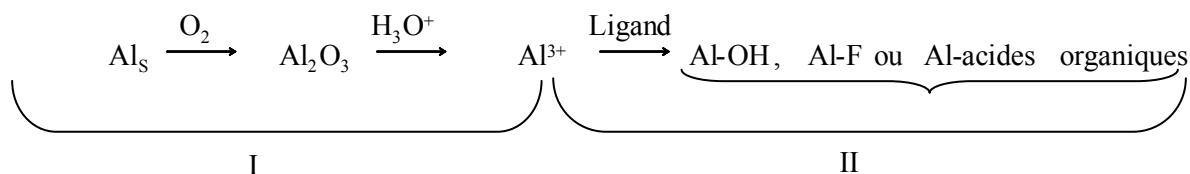
Le transfert de matière comporte deux aspects :

- la corrosion par l'opération chimique ou électro-chimique d'attaque du matériau par le milieu, que nous venons de voir ;
- le passage des produits de corrosion dans l'aliment, aspect que les auteurs ont particulièrement étudié, sachant que la quantité d'éléments métalliques ingérée par l'intermédiaire des aliments est le point le plus important.

Dans ce contexte particulier et complexe du contact de l'aluminium avec des aliments, Shuping Bi⁹³ a proposé un modèle permettant de décrire le transfert de matière du métal vers l'aliment. Celui-ci repose sur l'équilibre chimique suivant :



Le processus de transfert se fait en deux temps respectant le schéma suivant :



Dans un premier stade des ions aluminium sont libérés sous l'effet d'une réaction chimique ou électrochimique de l'aluminium solide (Al_s) et de sa couche protectrice d'alumine (Al₂O₃) avec le milieu environnant. Ce processus est activé par la présence d'ions H₃O⁺.

Dans un second stade, les ions aluminium, libérés par les réactions précédentes, se complexent avec les ions du milieu environnant qui régulent ainsi les réactions du stade I. Cette complexation se fait avec les acides gras et organiques contenus dans les aliments tels que l'acide citrique, l'acide oxalique, l'acide acétique, etc. ainsi qu'avec d'autres ions présents dans le milieu (OH⁻, F⁻...).

L'exploitation qualitative du modèle tend à prouver que la mise en solution de l'aluminium dépend de la concentration en ions H₃O⁺ donc du pH du milieu, et de sa faculté à absorber les ions Al³⁺ issus de la corrosion du métal par le mécanisme de complexation évoqué.

La présence de cuivre, de zinc et surtout d'aluminium, principal élément concerné par la corrosion, en quantités très faibles voire à l'état de traces dans les milieux alimentaires analysés, laisse supposer que le phénomène de corrosion et d'attaque chimique ou électrochimique du stade I dans le modèle de Shuping Bi, n'a pas pu se développer. Ce résultat n'est pas en accord avec les pertes de

⁹³ S. BI, "A model describing the complexing effect in the leaching of aluminium from cooking utensils", *Environmental Pollution*, **92**(1) (1996) pages 85-89.

masse mesurées. En effet, pour le milieu OR que nous prendrons ici en exemple, la perte de masse mesurée est de 0,2 mg/cm² pour une durée d'essai d'une heure. En faisant l'hypothèse selon laquelle la corrosion des échantillons massifs est identique à celle des copeaux, et en supposant par ailleurs que seul l'aluminium est dissous, la quantité de cet élément dans le milieu alimentaire pour nos conditions d'essai (échantillon massif de dimensions 20 x 20 x 4 mm + 3 g de copeaux pour un volume de mélange de 250 ml) devrait être d'environ 46,6 mg soit une concentration de 186 400 µg/l au bout d'une heure dans l'aliment (nous négligeons ici l'aluminium apporté par le riz et l'eau). Aucune raison valable ne peut justifier une telle différence, car la technique d'analyse ICPMS retenue dans notre étude est la plus adaptée à la situation. Par ailleurs, ne pas trouver les éléments perdus par le métal dans l'aliment pourrait se justifier par de l'absorption ou des dépôts sur les échantillons ou sur les parois du récipient utilisé pour le test, qui n'ont pas été observés, ou par la formation de complexes volatils, ce qui est peu probable.

La question reste donc ouverte sur la validité des résultats d'analyse et, par conséquent sur les mécanismes du transfert de matière du métal vers l'aliment.

V Discussion des résultats

V-1 L'alimentarité des alliages artisanaux

V-1-1 Qu'en est-il de l'alimentarité des matériaux testés ?

Il est assez difficile de se faire une opinion juste de la situation, compte tenu des résultats des mesures sur les transferts. Nous pouvons cependant évaluer cette qualité en considérant le cas le plus défavorable, relatif à la cuisson dans le riz de l'échantillon n°3, en faisant l'hypothèse d'un transfert total du métal corrodé dans l'aliment.

Dans ces conditions, la perte de masse de l'échantillon n°3 après cuisson dans le riz pendant une heure s'élève à 0,2 mg/cm². Une marmite de 5 kg de contenance (328 mm de diamètre pour 220 mm de hauteur) remplie aux 2/3 (environ 23,5 dm² de surface de contact avec l'aliment pour 12 l de volume occupé) perd, dans ces conditions, une masse de 471 mg de métal.

En faisant de plus l'hypothèse, d'une perte de masse due à l'oxydation de l'élément principal de l'alliage, l'aluminium, dont la toxicité est sujette à controverses, qui est ensuite entièrement transféré à l'aliment, une personne consommant 250 g de ce riz (2 fois la consommation moyenne d'un sénégalais par repas) ingérerait 9,8 mg de ce métal. A cette quantité d'aluminium provenant de la marmite s'ajoute celle apportée par les aliments. Une eau potable contient environ 0,2 mg/l d'aluminium⁹⁴ et le riz en contient environ 1,7µg/g⁹⁵. Dans les conditions de notre test (250 ml d'eau + 15 g de riz), l'apport d'aluminium de l'aliment est de 0,05 mg pour l'eau et 0,025 mg pour le riz. Ainsi la quantité totale d'aluminium ingérée pendant ce repas serait de l'ordre de 9,9 mg (les contributions de l'eau et du riz

⁹⁴ Conseil de l'Europe, Déclaration de principe relative aux métaux et alliages, document technique "Lignes directrices sur les métaux et alliages utilisés comme matières destinées à entrer en contact avec les denrées alimentaires" (13-02-2002).

⁹⁵ J.L. GREGER, W. GOETZ, D. SULLIVAN, "Aluminium levels in foods cooked and stored in aluminium pans, trays and foil", *Journal of Food Protection* **48**(9) (1985) pages 772-777.

sont tellement faibles que la quantité d'aluminium ingérée est relativement indépendante de la proportion eau-riz).

Or les normes de toxicité retenues par le conseil de l'Europe, extraites des recommandations de la JECFA (comité mixte d'experts FAO/OMS)⁹⁶, font état d'une dose admissible journalière de 1 mg par kilogramme de masse corporelle pour les humains. Cette dose est la quantité maximale tolérable par l'organisme humain au-delà de laquelle l'aluminium devient toxique pour lui. Ainsi pour une personne de 70 kg, la dose journalière admissible est de 70 mg (plus de 7 fois le résultat de notre calcul).

Ce bilan simplifié montre que nous sommes loin du seuil critique pour lequel la santé humaine est mise en danger.

V-1-2 Transfert des autres éléments contenus dans l'alliage

Nous admettons maintenant que l'alliage de la marmite subit une corrosion uniforme, ce qui suppose un transfert intégral de chacun des éléments présents dans le matériau suivant le cas le plus défavorable envisagé précédemment (9,8 mg de métal perdus pour la cuisson d'une quantité de 250 mg de riz, d'après les mesures effectuées sur l'échantillon n°3). Compte tenu des doses admissibles retenues par le comité de l'Europe, le bilan de matière de la personne de 70 kg qui ingère 250 g de riz est résumé dans le tableau 3-10 suivant.

Elément	Cu	Fe	Si	Zn	Pb	Sn	Al
Dose journalière admissible (mg/kg)	0,5	0,8	-	1	0,0036	2	1
Dose journalière admissible pour une personne de 70 kg (mg)	35	56	-	70	0,25	140	70
Quantité ingérée (mg) par la consommation de 250 g de riz	0,34	0,075	0,81	0,06	0,009	0,002	8,4

Tableau 3-10 : Quantités d'éléments provenant de la corrosion susceptibles d'être ingérées lors d'une consommation de 250 g de riz, comparées avec les teneurs admissibles d'après les normes en vigueur.

La quantité de métal ingérée est calculée en multipliant la masse totale perdue (9,8 mg) par le pourcentage massique de chaque métal dans l'échantillon n°3 (tableau 3-5). Par exemple pour le cuivre nous avons $9,8 \text{ mg} \times (8,33/100)$.

Nous remarquons que les quantités d'éléments ingérés par la consommation de 250 g de riz cuit sont largement inférieures aux seuils admissibles, ce qui laisse une grande marge de manœuvre en cas d'apport de ces mêmes éléments par d'autres aliments.

On notera que, compte tenu de nos hypothèses, l'échantillon n°3 utilisé, pourtant hors normes du fait de sa composition chimique à cause de sa haute teneur en cuivre, en zinc et en plomb, ne présente apparemment pas de danger pour la santé. Dans le cas où la teneur en plomb est doublée (on est proche du cas de l'alliage n°14), la dose journalière admissible pour cet élément est loin d'être atteinte. Il en sera de même avec l'étain contenu dans l'alliage n°6 en quantité 10 fois supérieure à celle de l'alliage n°3.

⁹⁶ JECFA (Joint Expert Committee on Food Additives) "Toxicological evaluation of current food additives and contaminants" Geneva, WHO Technical Report Series (1989) pages 113-154.

Le comportement de l'échantillon témoin conduit à des conclusions semblables aux précédentes compte tenu d'une perte de masse de 0,2 mg/cm² et des hypothèses faites comme le montre le tableau 3-11.

Elément	Cu	Fe	Si	Zn	Pb	Sn	Al
Dose journalière admissible (mg/kg)	0,5	0,8	-	1	0,0036	2	1
Dose journalière admissible personne de 70 kg (mg)	35	56	-	70	0,25	140	70
Quantité ingérée (mg) par consommation de 250 g de riz	$<4,9 \cdot 10^{-4}$	0,06	0,02	0,03	$<0,002$	/	9,7

Tableau 3-11 : *Quantité d'éléments susceptibles d'être ingérés avec une consommation de 250 g de riz cuisiné avec l'alliage témoin, comparées avec les teneurs admissibles d'après les normes en vigueur.*

Compte tenu des résultats précédents, une question vient à l'esprit :

Suivant quels critères ont été définies les fourchettes de composition chimique des alliages d'aluminium à usage alimentaire proposées par la norme européenne ?

Sont probablement à prendre en compte à la fois des facteurs métallurgiques liés aux propriétés mécaniques, chimiques et de mise en œuvre des alliages d'aluminium ainsi que des facteurs toxicologiques par le biais des doses admissibles de ces divers éléments après transfert. Le rapprochement entre les caractéristiques chimique et toxicologique, fait par le tableau 3-12, laisse supposer une contribution de l'ensemble de ces critères.

Elément	Si	Cu	Fe	Zn	Mg	Mn	Pb	Sn	Ni	Al
Composition suivant norme	13,5	0,6	2	0,25	11	4	$<0,05$	0,1	3	/
Dose journalière mg/kg	/	0,5	0,8	1	/	2 à 3	0,0036	2	0,005	1

Tableau 3-12 : *Doses admissibles pour le corps humain et tolérées par la norme NF EN 601 qui régit les alliages d'aluminium en contact avec les denrées alimentaires.*

En effet on peut remarquer les points suivants :

- la teneur en magnésium des alliages est fixée à 11% alors que la directive européenne ne mentionne pas cet élément ;
- le cuivre, le fer et le zinc sensibilisent les alliages à la corrosion intergranulaire. Leurs quantités admissibles dans les alliages sont faibles ;
- le silicium ne fait pas l'objet de directives particulières quant à sa toxicité mais sa teneur est pourtant limitée à 13,5%. Cette quantité correspond approximativement à la composition de l'alliage eutectique Al/Si, connu et utilisé pour sa bonne aptitude à la fonderie ;
- le plomb, qui nous l'avons vu est insoluble dans l'aluminium, est pourtant limité à un niveau très bas suite à sa toxicité reconnue.

C'est donc certainement la conjugaison d'un ensemble de contraintes, intéressant plusieurs domaines, qui a guidé l'édification de cette norme.

Nous dirons en conclusion à cette partie de l'étude que, d'après nos expériences, nous pensons que les alliages rentrant dans la fabrication des marmites au Sénégal ne présentent pas de dangers particuliers sur le plan toxicologique.

Pour mettre à profit l'étude que nous avons faite sur les alliages artisanaux, nous allons proposer aux partenaires impliqués dans la valorisation des déchets d'aluminium, une meilleure façon de les utiliser en nous appuyant sur nos expériences et connaissances scientifiques. Ceci se fera par l'intermédiaire de la proposition de contribution au projet de modernisation de la fonderie artisanale au Sénégal, présentée dans le paragraphe ci-après.

V-2 Contribution au projet A.I.F./C.T.I.F./Direction de l'Artisanat

Compte tenu des résultats obtenus au cours des tests effectués sur les alliages d'aluminium issus du recyclage au Sénégal, nous allons maintenant proposer un meilleur usage des déchets d'aluminium, notamment par une réflexion sur les utilisations possibles des principales nuances d'alliages rencontrées.

Pour améliorer la qualité alimentaire des alliages d'aluminium, qui comme nous l'avons vu, est fortement liée à la composition chimique des alliages, deux voies peuvent être envisagées :

- intervenir au niveau de la collecte pour écarter de la confection des ustensiles de cuisine les alliages présentant un pourcentage de cuivre élevé afin de limiter la corrosion galvanique aluminium-cuivre. Mais les artisans ne peuvent pas analyser la composition de tous les alliages pour identifier eux-mêmes les déchets d'aluminium à proscrire pour fabriquer des marmites. Toutefois, la nature des déchets peut leur donner des indications sur la possible composition de l'alliage ;
- analyser et modifier la composition du bain d'aluminium liquide et corriger les teneurs des différents composants. Mais pour cela aussi, il faut des moyens (spectromètre, four, etc.).

Ces points sont un des objectifs du projet de modernisation de la fonderie d'aluminium initié par la Direction de l'Artisanat et ses partenaires destiné à améliorer le contrôle de la qualité chimique des alliages par la mise sur place d'une structure industrielle de tri et de confection de lingots. Trois qualités différentes de lingots seront mises à la disposition des artisans pour la fabrication :

- des ustensiles de cuisine ;
- des pièces de rechange pour les industries et l'automobile ;
- des objets décoratifs.

Après la collecte, un tri judicieux est nécessaire pour sélectionner les déchets les plus aptes à entrer dans la confection des trois catégories de lingots, car les propriétés recherchées pour chacun d'eux sont spécifiques. Voici donc nos propositions en ce qui concerne le choix des déchets d'aluminium pour ces trois catégories.

i) Les ustensiles de cuisine

Ces alliages doivent présenter une bonne coulabilité pour être mis en forme par fonderie avec des moules en sable (teneur en silicium assez élevée), mais aussi une bonne résistance à la corrosion pour leur comportement en milieu culinaire (teneurs en cuivre et fer faibles et bonne proportion de magnésium, les teneurs des autres éléments doivent être tenues aussi faibles que possible). On se conformera à la norme NF EN 601 de juillet 2004 pour les teneurs maximales de tous ces éléments. L'essentiel est de trouver un bon compromis pour des éléments comme le silicium dont une forte teneur garantit une bonne mise en forme en fonderie, mais une mauvaise résistance en corrosion. On privilégiera donc les alliages issus du milieu alimentaire (canette, etc.) et de celui de l'édition (plaque d'imprimerie, etc.) qui peuvent être mélangés avec d'autres issus du milieu automobile (culasses, carters, etc.) ou de celui du bâtiment (cadre de fenêtre, etc.).

ii) Les pièces de rechange pour les industries et l'automobile

Ces pièces ont en général besoin de propriétés mécaniques à chaud élevées. Pour cela le cuivre mais aussi le nickel et le magnésium sont de bons éléments d'alliage. Les déchets d'aluminium contenant du cuivre (entre 1 et 3%), provenant essentiellement du secteur automobile (carter, etc.) peuvent ainsi être consacrés la fabrication de ce type de produit. Cependant, d'autres considérations particulières telles que l'environnement de fonctionnement et les sollicitations spécifiques de la pièce de rechange sont en prendre en compte pour élaborer le meilleur alliage possible pour une pièce spécifique.

iii) Les pièces décoratives

Elles ne sont en général pas soumises à des sollicitations mécaniques ou à un milieu corrosif (marin ou alimentaire). Les alliages d'aluminium qui ne peuvent pas entrer dans la fabrication des pièces précédentes, peuvent être utilisés pour l'élaboration de ces objets décoratifs. Mais comme précédemment, le contexte et les conditions d'utilisation sont à prendre en compte pour répondre aux spécifications d'une pièce donnée.

Conclusion

A l'issue de notre étude sur la fabrication et la qualité des ustensiles de cuisine produits à Dakar, nous constatons que la fonderie est un art bien maîtrisé par les artisans dans le domaine d'application visé ; les résultats sont même assez surprenants quant à la qualité de fabrication des produits, compte tenu du peu de moyens matériels dont ils disposent.

Nous suggérons quelques améliorations sur les aspects de fabrication concernant l'utilisation du sable de moulage et l'élaboration des alliages à partir des déchets.

Tout d'abord un renouvellement partiel du sable réalisé environ tous les trois mois permet d'éviter les défauts dus à une qualité défectueuse du sable de moulage

D'un autre côté, nous avons montré que la qualité des alliages produits est fortement dépendante d'un approvisionnement en déchets irrégulier en qualité et en quantité, de la connaissance et de l'expérience en « science des matériaux » des artisans. Cette qualité a été évaluée à travers des

analyses et des tests que nous avons voulu rendre représentatifs des pratiques de consommation et de préparation des aliments au Sénégal.

Nous avons aussi montré que l'ensemble des alliages ne satisfait pas la norme NF EN 601 réglementant la composition chimique des alliages.

Nous notons peu d'effet de corrosion lorsque les échantillons sont plongés dans les milieux tomate fraîche (TF), concentré de tomate (OCT), huile (H) et eau du robinet (O) qui sont ensuite chauffés à ébullition pendant une heure. Une perte de masse comprise entre $0,02$ et $0,09 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$ a été mesurée.

Le milieu eau du robinet salée (OS) accroît cette dégradation jusqu'à des valeurs comprises entre $0,04$ et $0,13 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$.

Dans le milieu eau du robinet avec du riz (OR) la corrosion est la plus élevée et se situe entre $0,2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$ au maximum et $0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$ au minimum.

Sur l'ensemble des échantillons testés, le témoin industriel présente la moins bonne résistance à la corrosion et l'alliage artisanal, avec la plus faible teneur en silicium (2,96% Si en masse), résiste le mieux.

Nous montrons par ailleurs une relation étroite entre la résistance à la corrosion des alliages et leur microstructure. En particulier, la structure modifiée du silicium dans les alliages artisanaux permet d'améliorer cette résistance, ce qui constitue un moyen de limiter la corrosion des alliages riches en cet élément.

L'estimation des transferts des éléments de l'alliage n'a pas apporté de résultats très probants dans la mesure où nous n'avons pas pu établir une corrélation entre la perte de masse des échantillons et les quantités d'éléments métalliques présents dans le milieu alimentaire. En nous appuyant sur les mesures de perte de masse et en supposant que la masse métallique perdue se retrouve intégralement dans les aliments, nous montrons aussi que les quantités d'ions métalliques potentiellement ingérées par une personne de 70 kg qui mange 250 g de riz dans une journée, milieu dans lequel la corrosion est la plus importante ($0,2 \text{ mg/cm}^2$), sont largement inférieures aux seuils journaliers admissibles retenus dans les directives européennes.

Après avoir évalué la qualité alimentaire des alliages utilisés pour la fabrication des ustensiles de cuisine, quelles recommandations peut-on faire aux artisans fondeurs pour l'améliorer ?

L'absence de sélection des déchets par les fondeurs avant la fusion ne remet pas en cause la qualité alimentaire des alliages, cependant les alliages produits ne respectent pas la norme européenne en raison de trop grandes quantités de cuivre et de zinc.

Améliorer la qualité sur ce plan particulier est un objectif difficile voire impossible à atteindre compte tenu des conditions de travail des fondeurs. En effet, identifier les alliages de la série 2000 riches en cuivre qu'il faudrait retirer des charges de fusion est impossible sans moyen d'analyse chimique.

Évaporer le zinc en augmentant la température de fusion du bain métallique supposerait la

construction de fours adaptés et l'utilisation d'une plus grande quantité de charbon de bois ou d'une source d'énergie plus calorifique que ce dernier. Par conséquent, aucune perspective d'amélioration n'est possible sans modifier les pratiques et augmenter les moyens. Maintenir le niveau de silicium dans les alliages améliore la résistance à la corrosion des alliages produits artisanalement. Pour atteindre cet objectif, il faut trier les alliages les plus riches en cet élément, opération impossible à réaliser sans analyse, ou opérer par dilution en ajoutant à la charge des canettes de boissons contenant très peu de silicium. Les artisans fondeurs font des mélanges, nous l'avons vu, il leur faudrait des moyens industriels pour réaliser cette opération dans de bonnes conditions. Cependant, la modification par le sodium de la microstructure d'un alliage artisanal, que nous avons pratiquée avec des moyens de fortune, peut-être une voie intéressante car le niveau de dégradation de l'échantillon ainsi modifié est réduit.

En revanche, la vigilance concernant la surveillance du plomb doit être maintenue. Les objets en provenance de l'imprimerie ou les jantes automobiles équilibrées avec du plomb doivent être surveillés pour éviter toute introduction intempestive de cet élément.

Compte tenu du contexte dans lequel l'activité de fonderie artisanale est pratiquée, il est probable que la seule solution efficace pour résoudre ce problème passe par une industrialisation des procédés d'élaboration permettant la production d'alliages titrés de qualité contrôlée. C'est l'objectif que se propose d'atteindre la Direction de l'Artisanat au Sénégal à travers le projet A.I.F./C.T.I.F., objectif auquel nous pensons avoir contribué en nous intéressant à un aspect particulier de la qualité des alliages, la problématique du contact alimentaire, point qui n'est pas abordé dans ce projet.

Chapitre 4

LA QUESTION EDUCATIVE DANS LA PROBLEMATIQUE DE L'ENVIRONNEMENT AU SENEGAL

SOMMAIRE

Introduction	118
I La démarche pédagogique	119
I-1 La méthode « La main à la pâte »	119
I-2 La démarche d'investigation raisonnée.....	120
I-3 Les différents types d'aides et d'accompagnement.....	122
II Contexte de la mise en place de la méthode « La main à la pâte » au Sénégal.....	123
II-1 Actions entreprises par le Ministère de l'Éducation Nationale.....	123
II-2 Actions entreprises par la Direction de l'Enseignement Élémentaire (D.E.E.)	124
III Création du module sur les déchets.....	125
III-1 Préalable.....	125
III-2 Processus de création du module	126
III-3 Structure du module réalisé.....	127
Conclusion	132
Module : Une nouvelle vie pour les déchets	133

Introduction

Nous venons de détailler dans les deux chapitres précédents la valorisation de deux déchets métalliques au Sénégal : l'acier et l'aluminium. Cette action de valorisation, comme nous l'avons située dans l'introduction générale, entre dans le cadre de la résolution d'un problème plus important relatif à l'environnement. Mais pour une amélioration durable de notre cadre de vie et une pérennisation de nos ressources naturelles, il faut dépasser le cadre de la valorisation des déchets et informer voire impliquer la population dans la résolution de cette problématique en lui enseignant de nouvelles règles de conduite sociale orientées vers le respect de la nature et une autre vision de la valeur des déchets comme l'a préconisé l'UNESCO⁹⁷. Pour une meilleure efficacité, cette action d'éducation peut s'appuyer sur des connaissances et des résultats scientifiques qui étayent sa démarche. C'est dans ce cadre que nous allons mettre nos résultats scientifiques sur le recyclage des déchets métalliques au Sénégal au service d'une éducation de la population pour une participation à la résolution d'ensemble de la problématique posée par l'environnement. Notre action s'oriente vers l'enseignement scolaire élémentaire et participe également à la diffusion des connaissances qui suscite de plus en plus l'intérêt du gouvernement du Sénégal en particulier, et des acteurs de l'éducation du monde entier en général⁹⁸.

En effet, au Sénégal comme partout dans le monde, le besoin de développement d'une Culture Scientifique et Technique (CST) se fait sentir⁹⁹. Traduit concrètement en termes de « partage des savoirs » ou de vulgarisation scientifique, la problématique de la CST place la question éducative au cœur du développement d'un pays¹⁰⁰. C'est ce que disait le chinois Guanzi (environ 645 av. J.C.) : « Si tu veux une année de prospérité, cultive du riz, si tu veux dix années de prospérité, plante des arbres et si tu veux cent ans de prospérité, éduque des hommes ».

La question a animé de façon récurrente les débats internationaux des scientifiques depuis trois à quatre décennies¹⁰¹. Si toutes les approches convergent pour donner à l'éducation un rôle majeur et en font une condition nécessaire, il devient cependant indispensable de revoir les moyens employés et de poser la question de l'efficacité des méthodes d'enseignement. La vraie question est alors « Quelle éducation scientifique pour quelle société ? »¹⁰².

Des travaux récents, réalisés en France, ont montré la faiblesse de méthodes d'éducation trop générales, abstraites ou livresques et l'importance des expériences pour l'enseignement des sciences¹⁰³.

Face à cette problématique, la coopération internationale, d'abord entre les Etats-Unis et la

⁹⁷ Congrès mondial sur l'éducation et la communication en matière d'environnement et de développement (ECO-ED), l'éducation au service d'un développement durable, Toronto, Canada, 17 Octobre 1992.

⁹⁸ G. CHARPAK dans *Enfants, chercheurs et citoyens*, Odile Jacob (1998).

⁹⁹ C. ALLEGRE dans *Un peu de science pour tout le monde*, Fayard (2003).

¹⁰⁰ Séminaire international "Curriculum, compétences et lutte contre la pauvreté en Afrique subsaharienne" Bureau International de l'Education, UNESCO Genève 10-13 novembre 2004.

¹⁰¹ W. HARLEN, J. ELSTGEEST, dans *Manuel de l'UNESCO pour l'enseignement des sciences à l'école primaire* Editions de l'UNESCO : Paris (1994).

¹⁰² J. P. ASTOLFI, A. GIORDAN, G. GOHAU, H. HOST, J. L. MARTINAND, G. RUMELHARD, G. ZADOUNAÏSKI dans, *Quelle éducation scientifique pour quelle société ?* Editions Presses Universitaires de France, Paris, (1978).

¹⁰³ *L'expérimental dans la classe*, Ouvrage collectif, Institut National de Recherche Pédagogique, ASTER n°28 (1999).

France, et aujourd'hui entre le Sénégal et la France, a pris pour référence la démarche de l'investigation raisonnée dans la rénovation des méthodes d'enseignement scientifique à l'école primaire. Cette démarche a été développée en France dès 1996 dans le cadre de l'opération « La Main à la pâte »¹⁰⁴ à partir de l'initiative du scientifique français Georges CHARPAK, prix Nobel de Physique, et reprise dans le Programme Décennal pour l'Education et la Formation (P.D.E.F. 1998-2008)¹⁰⁵ du Ministère de l'Education Nationale (M.E.N.) du Sénégal en 2005.

L'originalité de la méthode est qu'elle associe la communauté scientifique au développement et à l'accompagnement de la rénovation de l'enseignement des sciences. Dans le cas du Sénégal, cette implication de la communauté scientifique est notamment illustrée par cette thèse qui comprend en particulier la réalisation d'un module pédagogique spécifique pour l'école élémentaire sénégalaise (support écrit thématique destiné à guider les enseignants pour l'étude d'un sujet en respectant une démarche d'investigation raisonnée).

Avant de présenter ce module et son processus de création, nous allons exposer la méthode « La main à la pâte » et la démarche d'investigation raisonnée sur laquelle elle repose, puis préciser les spécificités du contexte socio-éducatif sénégalais.

I La démarche pédagogique

Un proverbe chinois dit : « si vous le dites, j'oublierai, si vous le montrez, je m'en souviendrai peut-être, mais si vous m'y faites participer, je comprendrai ». Cette méthode met en pratique cette maxime et invite les enfants à mettre littéralement « la main à la pâte » pour acquérir des connaissances. Dès 1999, elle a intéressé le Sénégal qui a alors fait appel à l'expertise française en la matière. C'est ainsi que dans le cadre du Programme pour l'Efficacité de l'Ecole Sénégalaise (P.E.E.S.), la Direction de l'enseignement Elémentaire a pris les premières initiatives pour promouvoir un projet de rénovation de l'enseignement des sciences à l'école primaire au Sénégal.

I-1 La méthode « La main à la pâte »

La méthode s'appuie sur la démarche d'investigation raisonnée et comprend 10 principes qui forment, la charte de « La main à la pâte ». Celle-ci qui a été validée par l'Académie des Sciences en 1999. Elle comporte deux parties principales : le guidage pédagogique et le partenariat^{106, 107, 108}.

Le guidage pédagogique

Les enfants observent un objet ou un phénomène du monde réel, proche et sensible et expérimentent sur lui.

Au cours de leurs investigations, les enfants argumentent et raisonnent, mettent en commun et

¹⁰⁴ G CHARPAK dans *La main à la pâte, les sciences à l'école primaire*, Flammarion (1996).

¹⁰⁵ Ministère de l'Education Nationale du Sénégal, Direction de l'Enseignant Elémentaire dans *Initiation scientifique et technologique à l'école élémentaire* Dakar (2003).

¹⁰⁶ Vidéo "La main à la pâte: une illustration des principes". CNDP-CRDP de Lyon, (2001).

¹⁰⁷ http://www.inrp.fr/lamap/?Page_Id=59

¹⁰⁸ Cdrom "Enseigner les sciences à l'école primaire, La main à la pâte", O Jacob multimédia, (1999)

discutent leurs idées et leurs résultats, construisent leurs connaissances. Une activité purement manuelle ne suffit pas.

Les activités proposées aux élèves par le maître sont organisées en séquences en vue d'une progression des apprentissages. Elles relèvent des programmes et laissent une large part à l'autonomie des élèves.

Un volume minimum de deux heures par semaine est consacré à un même thème pendant plusieurs semaines. Une continuité des activités et des méthodes pédagogiques est assurée sur l'ensemble de la scolarité.

Les enfants tiennent chacun un cahier d'expériences avec leurs mots à eux.

L'objectif majeur est une appropriation progressive par les élèves, de concepts scientifiques et de techniques opératoires, accompagnée d'une consolidation de l'expression écrite et orale.

Le partenariat

Les familles et/ou le quartier sont sollicités pour le travail réalisé en classe.

Localement, des partenaires scientifiques (universités, grandes écoles) accompagnent le travail de la classe en mettant leurs compétences à disposition.

Localement, les Instituts Universitaires de Formation des Maîtres (I.U.F.M.) mettent leur expérience pédagogique et didactique au service de l'enseignant.

L'enseignant peut obtenir, auprès du site Internet, des modules à mettre en œuvre, des idées d'activités, des réponses à ses questions. Il peut aussi participer à un travail coopératif en dialoguant avec des collègues, des formateurs et des scientifiques.

I-2 La démarche d'investigation raisonnée

I-2-1 Caractéristiques

Au delà des méthodes actives qui placent l'élève au cœur des apprentissages, la démarche d'investigation raisonnée le place en situation de chercheur. C'est par son questionnement, ses expériences, ses analyses et ses erreurs, qui sont en sciences ce que Bachelard appelle « des vérités mortes »¹⁰⁹, qu'il va construire progressivement ses connaissances et son raisonnement.

Dans cette perspective, l'enseignant ne détient pas le savoir pour le transmettre à l'élève au moyen de leçons à apprendre par cœur. Guidé par l'enseignant, l'élève chemine à travers ses erreurs, ses doutes, et construit sa compréhension des choses au moyen des expériences qu'il effectue et des échanges qu'il a avec ses camarades. Car, comme le disait Bachelard, « la connaissance scientifique est dans l'expérience aussi bien que le raisonnement »¹¹⁰. Cette nouvelle façon de faire réfléchir les enfants, de les amener à se poser des questions et à remettre en cause leurs jugements initiaux, participe à l'émergence progressive d'une attitude scientifique propice à l'acquisition des connaissances et des méthodes.

¹⁰⁹ G. BACHELARD dans *La formation de l'esprit scientifique*, PUF, Paris, (2003).

¹¹⁰ G. BACHELARD dans *Le nouvel esprit scientifique*, PUF, Paris, (1971).

Cette attitude interrogative sera utile aux enfants non seulement en sciences ou en lecture mais aussi dans leur vie de tous les jours. Cette méthode prépare en effet à l'émergence d'une nouvelle génération de citoyens, avertis et ayant toujours un esprit critique vis à vis de la vie et du développement de leur société.

Pour autant, cette nouvelle approche de l'apprentissage n'a pas pour ambition de jeter aux oubliettes les anciennes pratiques. Il y a des choses qui n'ont pas besoin d'être comprises, mais se doivent d'être apprises. C'est le cas de l'alphabet, il est inutile d'instaurer des débats pour comprendre le pourquoi de la forme des lettres. Nous avons besoin de les apprendre pour pouvoir les reconnaître. En revanche, dire à un enfant, dans le cadre du bras de levier, que « la force appliquée à l'extrémité du levier est inversement proportionnelle à la distance entre le point d'appui et le point d'application de cette force », ne lui permet pas forcément de comprendre le phénomène. Les formules qu'il aura apprises lui permettront de le vérifier, mais sa compréhension du phénomène peut ne pas être acquise pour autant. A l'inverse, en réalisant des expériences, il n'aura peut-être pas les formules, mais il comprendra le phénomène, d'abord d'une manière sensible puis progressivement plus théorique.

I-2-2 Fonctionnement de la classe

La mise en œuvre de cette démarche entraîne des changements dans l'organisation du fonctionnement de la classe où alternent travail en petits groupes et moments de questionnement ou de synthèse collective (en classe entière). Ainsi organisés en groupe, les élèves prennent une part plus active à leur apprentissage. Le fonctionnement de ces groupes est défini au début des expérimentations avec l'attribution de fonctions à ses membres (chef de groupe, rédacteur, rapporteur, responsable du matériel, etc.).

Ces responsabilités sont appelées à changer de mains au sein du groupe, au fil des séances, ce qui participe à l'apprentissage de rôles sociaux et à l'amélioration de l'écrit et de l'oral de tous les enfants. Il arrive souvent que ces séances jouent le rôle de déclencheur pour des enfants en difficulté scolaire (problème de discipline) ou qui avaient des problèmes d'expression ou d'écriture. Les uns apprennent la sociabilité et le respect d'autrui et de ses idées, et les autres y trouvent un moyen ludique d'améliorer leur expression écrite et orale.

I-2-3 Le rôle du maître

Aux côtés de l'élève, le maître joue un rôle de premier plan. Une de ses fonctions est d'aider les élèves dans la construction d'une attitude scientifique et l'acquisition progressive d'une démarche : se poser des questions, émettre des hypothèses, faire des expériences, relever des données, discuter des résultats et des conclusions possibles. Le travail de groupe et les échanges constituent une base essentielle à la construction des connaissances des élèves. Il n'est pas nécessaire d'agir en expert scientifique pour diriger les séances. Faire acquérir cette démarche signifie plutôt :

- l'avoir acquise soi-même ;
- se permettre et permettre aux élèves de tâtonner, voire de faire des erreurs et montrer comment elles peuvent être utiles ;
- accepter de ne pas tout connaître et habituer les élèves à chercher une information auprès d'autres

personnes, de livres, à reprendre des explorations ;

- poser des questions et accepter de prendre en compte toutes les réponses ;
- remettre en question ses propres représentations si nécessaire.

En effet, avec les questions des élèves, l'enseignant peut se trouver en difficulté s'il se pose en détenteur des connaissances. Il faut donc qu'il accepte de se mettre au niveau des élèves afin de chercher avec eux les éléments de réponses.

Au cours de l'activité, le maître veille au partage des tâches en proposant par exemple les rôles, définis plus haut, au sein du groupe. Il observe les enfants, facilite les échanges, relance le travail par le questionnement. Il permet à chaque groupe d'aller jusqu'au bout de ses investigations en gardant à l'esprit le sens de l'activité.

Lors du travail en petits groupes, le maître garde aussi en mémoire les réflexions des élèves susceptibles de construire et structurer la synthèse. En effet, nombreux sont les enfants qui, au moment du bilan, ont oublié comment ils en sont arrivés à leur conclusion et les arguments qu'ils avaient proposés pour convaincre.

Au moment des comptes rendus de groupe et des discussions collectives qui en résultent, le rôle du maître est de guider les élèves pour clarifier leurs idées, organiser leurs pensées et comparer les différentes solutions, analyser et interpréter les résultats pour identifier les concepts scientifiques et à les articuler entre eux.

Le maître se pose ainsi en animateur dans la classe. Il s'occupe du fonctionnement de la classe et encadre les initiatives des enfants. Pour cela, il peut avoir besoin d'un accompagnement qui peut se présenter sous différentes formes.

I-3 Les différents types d'aides et d'accompagnement

Les aides et les accompagnements sont des collaborations où les partenaires scientifiques et pédagogiques de cette nouvelle méthode d'enseignement des sciences, sortent tous les deux gagnants¹¹¹. Nous allons présenter les plus habituels d'entre eux.

Les aides ponctuelles en classe

Occasionnellement, le maître peut faire appel à des ressources extérieures. Il peut s'agir d'une aide de parents d'élèves pour aider à l'organisation et au bon déroulement d'une séance ou de la participation d'un scientifique qui pourra enrichir ou éclairer la réflexion engagée sur un sujet. Dans tous les cas, les aides ne doivent pas se substituer au maître qui garde l'entière responsabilité de la classe.

Le parrainage et la création de ressources nouvelles

Les accompagnants scientifiques peuvent être appelés à jouer d'autres rôles qui ne visent pas seulement la qualité scientifique du travail en classe. Ils pourront aussi participer à la création de

¹¹¹ S. BEC, R. GARASSINO, "Partenaires à double gagnant", les cahiers pédagogiques **421** (2004) pages 19-21.

compétences nouvelles chez les maîtres ou créer de nouveaux supports scientifiques. Concrètement, cela peut prendre des formes diverses :

Le parrainage qui peut prendre la forme d'une présence en classe (interventions ponctuelles sur une question particulière ou suivie sur le long terme) ou d'un suivi à distance d'un projet scientifique (par téléphone, courrier électronique ou site Internet). Outre son assistance théorique et pratique à la classe, le parrain, qui peut à juste titre être considéré comme une caution scientifique, peut aussi apporter un soutien intellectuel, matériel et financier.

La production et la mise à disposition de ressources pédagogiques peut se faire par le biais de la conception de malettes pédagogiques et de matériels pour les expériences spécifiques, mais aussi par la conception de guides théoriques et pratiques de progression scientifique et de modules thématiques pour l'étude d'un sujet, suivie éventuellement du développement et de la validation sur le terrain d'une progression pédagogique. Ces supports écrits peuvent être complétés au besoin par des outils audiovisuels tels que des disques audio, des photos et même des vidéos pour assister l'enseignant et les élèves.

Ces outils d'enseignement des sciences constituent un soutien majeur pour l'enseignant. Ces documents fixent les objectifs de la classe ainsi que les voies et moyens pour les atteindre. Leur élaboration nécessite la mise en commun des connaissances du monde scientifique pour le contenu, et du monde pédagogique pour la forme et les objectifs à atteindre, ces derniers étant liés au contenu des programmes d'enseignement. Ces deux mondes doivent ainsi mettre leurs connaissances et leurs compétences en commun pour élaborer un guide pertinent et utilisable.

L'action menée à l'École Centrale de Lyon (ECL) s'inscrit dans ce cadre. L'ECL s'est engagée très tôt dans l'accompagnement de « La main à la pâte » dans la région lyonnaise. Ses premières participations se sont faites sous forme de parrainage de classe et depuis quelques années, elle s'est investie dans la réalisation de modules pour l'école primaire en partenariat avec le site pilote de Vaulx en Velin (banlieue lyonnaise) et l'association INNOPÔLE en impliquant fortement les élèves ingénieurs dans le cadre de leur projet d'études.

II Contexte de la mise en place de la méthode « La main à la pâte » au Sénégal

II-1 Actions entreprises par le Ministère de l'Éducation Nationale

Afin d'être en phase avec les problèmes de l'école sénégalaise, le Ministère de l'Éducation Nationale (M.E.N.) a créé, en février 2003, une Commission Nationale de Pilotage du projet de Développement de l'Enseignement des Sciences et de la Technologie (C.N.P.D.E.S.T.) qui regroupe de grands scientifiques de l'Académie des Sciences, des enseignants expérimentés (tous les cycles d'étude sont représentés) et des pédagogues (inspecteurs et formateurs). Elle a pour principales missions de faire un diagnostic de l'enseignement des sciences et de la technologie au Sénégal, d'identifier les problèmes et leurs sources, et de proposer des solutions. Pour le diagnostic, elle a choisi de faire une enquête portant sur l'ensemble du tissu scolaire sénégalais (de la maternelle au supérieur) par le biais de questionnaires dont elle vient à peine de terminer le dépouillement. Il est donc clair que les problèmes et

leurs causes n'ont pas encore été formellement identifiés. Cependant, à la suite des échanges qui ont eu lieu les 10 et 11 mars 2005 lors du symposium international organisé par l'Académie des Sciences du Sénégal en collaboration avec le N.A.S.A.C. (Network of African Science ACademies) et l'I.A.P. (Inter Academy Panel) sur l'élaboration d'un programme régional d'enseignement des sciences auquel la C.N.P.D.E.S.T. a participé, un fort consensus a été trouvé autour de « La main à la pâte » en tant que méthode pédagogique destinée à la rénovation de l'enseignement des sciences en Afrique.

II-2 Actions entreprises par la Direction de l'Enseignement Élémentaire (D.E.E.)

La D.E.E. est sous la tutelle du M.E.N. mais elle a pris avant ce dernier des initiatives pour la rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie. Elle a choisi « La main à la pâte » depuis 1999 et mène des actions au niveau de l'élémentaire sur la base de cette méthode pour l'amélioration de l'enseignement des sciences. Ces actions, aujourd'hui autonomes, rejoindront dans le futur celles que mènera le M.E.N. pour un meilleur enseignement des sciences et de la technologie.

II-2-1 Le Projet pour l'Efficacité de l'École Sénégalaise (P.E.E.S.)

La D.E.E. s'est engagée très tôt dans un vaste programme de rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie. Dès 1999, elle faisait appel à l'expertise étrangère et sollicitait l'appui des bailleurs de fonds pour rénover son école. La France a répondu favorablement et s'est engagée, dans le cadre du P.E.E.S. (Projet pour l'Efficacité de l'École Sénégalaise), à aider le Sénégal à restructurer et à développer son école. « La main à la pâte » a été un des moyens pressentis pour aider à cette rénovation de l'école sénégalaise.

Après plusieurs séminaires de formation pour les inspecteurs de l'éducation entre 1999 et 2002, la D.E.E. a décidé de lancer une diffusion de « La main à la pâte », aidé en cela par ses partenaires de la coopération française. L'expérience devait avoir une certaine envergure pour que son impact sur l'école sénégalaise soit appréciable. C'est ainsi que 114 écoles dans les 19 circonscriptions de la zone d'intervention du P.E.E.S. au Sénégal, ont été engagées dans cette action¹¹².

Des actions ont été entreprises parmi lesquelles la mise à disposition de mallettes pédagogiques et de documents de travail mais aussi la rédaction et la publication d'une brochure intitulée « La main à la pâte, Sciences et technologie à l'école sénégalaise ». Afin de garantir l'accompagnement de ces écoles, des conventions ont été signées avec les inspections et les pôles régionaux de formation pour qu'ils aident les enseignants dans la mise en place de la méthode.

Le manque de moyens humains mais surtout financiers, avec le démarrage du nouveau projet de la coopération française pour le Sénégal (projet Qualité), a ralenti le dispositif d'accompagnement (entre 2004 et 2006), ce qui fait que le projet n'a pas eu le succès escompté. Mais avec l'arrivée récente de financements en 2006, la D.E.E. et ses partenaires ont décidé de donner un nouvel élan à ce projet dès la rentrée 2006-2007.

¹¹² <http://venus.inrp.fr/lamap/reseau/interna/senegal.html>.

II-2-2 La création d'une passerelle entre l'enseignement élémentaire et l'enseignement supérieur

En attendant la reprise du projet qu'elle a lancé avec la coopération française pour la rénovation de l'enseignement des sciences à l'école élémentaire, la D.E.E. a entrepris des contacts avec la communauté scientifique, imitant en cela l'exemple français où la communauté scientifique s'est investie dans la mise en place de « La main à la pâte ». Dans le but d'établir cette connexion entre ces deux mondes de l'éducation, elle s'est aidée de ses partenaires français, l'Ecole Centrale de Lyon et l'association INNOPÔLE pour mettre en place un partenariat avec l'Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar. C'est de ce partenariat à quatre qu'est née cette thèse qui, outre un traitement global de la problématique de l'environnement, est une première étape vers une collaboration durable entre le supérieur et l'élémentaire.

Avec la consolidation de ce nouveau lien, la D.E.E. pourra compter sur le soutien de la communauté scientifique lors de l'élaboration d'outils pédagogiques et pour l'accompagnement des classes dans le cadre de son projet de rénovation de l'enseignement des sciences au Sénégal.

III Création du module sur les déchets

III-1 Préalable

Pour élaborer un module fonctionnel et adapté au milieu scolaire sénégalais, il est nécessaire d'identifier les moyens, le mode de fonctionnement et les spécificités de l'école élémentaire de ce pays. C'est ainsi qu'après avoir suivi pendant plusieurs mois la mise en œuvre de modules dans les écoles françaises et participé au colloque sur les Accompagnements en Science et Technologie à l'École Primaire (A.S.T.E.P. Paris mai 2004), nous avons confronté l'école élémentaire sénégalaise avec des modules français dans le but d'identifier ce qui était transposable au Sénégal, mais surtout ce qui ne l'était pas afin d'en tenir compte lors de la conception du module.

Les modules choisis pour cette confrontation, « flotte-coule » et « circuits et chemins », sont compatibles avec le programme scolaire sénégalais et figurent dans le guide provisoire de formation de juin 2003 du Ministère de l'Education Nationale du Sénégal. Pour cette étape préliminaire, l'objectif était de les mettre en œuvre en respectant la méthode de « La main à la pâte » qui s'appuie sur la démarche d'investigation raisonnée.

En accord avec les autorités de l'école élémentaire sénégalaise, deux écoles de la circonscription de Guédiawaye (banlieue dakaroise), ont été retenues pour mener cette expérimentation sur le terrain : Médina Gounass et Khali Madiakhaté Kala C. Après deux jours de formation à la méthode de la pédagogie active à laquelle s'identifie « La main à la pâte » (8 et 9 janvier 2005), les enseignants volontaires de ces deux établissements ont donc mis en œuvre les modules sélectionnés dans leur classe.

Cette expérimentation au Sénégal a permis de mettre à jour certains aspects à prendre en compte pour élaborer un module adapté au contexte socio éducatif sénégalais. Ils peuvent être classés en deux groupes.

Spécificités communes avec la France

Le sujet d'étude, en plus de satisfaire le programme scolaire, doit être présenté de manière attrayante et traiter d'une thématique qui suscite la curiosité des enseignants.

Une bonne motivation et une formation adaptée des acteurs de la mise en œuvre de « La main à la pâte » sont primordiales pour que ces derniers puissent développer les modules pédagogiques en respectant la démarche d'investigation raisonnée, qui est la base de cette nouvelle méthode d'enseignement.

Les modules sont conçus pour être mis en œuvre de façon autonome par l'enseignant, cependant un parrainage de la classe par un scientifique peut être un atout supplémentaire, surtout pour des enseignants qui ont une certaine appréhension de la science et des scientifiques. De plus, cela contribue à renforcer la collaboration entre le supérieur et l'élémentaire.

Un module trop long a peu de chance de susciter de l'intérêt auprès des enseignants.

Spécificités propres au Sénégal

Les classes sénégalaises comptent en moyenne une cinquantaine d'enfants. Avec un tel effectif, il est très difficile à l'enseignant de mettre en œuvre tout seul correctement un module, c'est-à-dire en respectant la démarche d'investigation raisonnée. L'accompagnement, qui était fortement souhaité pour les effectifs des classes françaises (20 à 25 élèves), devient maintenant quasi-indispensable pour des effectifs de 50 élèves.

Le français n'est pas la langue maternelle des enfants ce qui rend l'assimilation du module plus longue pour les élèves sénégalais. Les séances demandent plus de temps pour être mises en œuvre à cause de quelques difficultés de lecture et de grammaire. Ainsi, encore plus qu'en France, une attention particulière sera apportée au vocabulaire et à la grammaire pour l'adapter au cycle scolaire visé (ici cycle 3).

Les nombreuses interruptions du calendrier scolaire sénégalais peuvent porter préjudice à la continuité souhaitée dans la mise en œuvre d'un module par la méthode de « La main à la pâte », à moins que ce dernier ne prévoient des séances qui mettent à profit ces interruptions ou ne nécessite qu'un nombre réduit de séances.

Les moyens de l'école sénégalaise sont limités et entrent en ligne de compte pour le choix du sujet et du matériel nécessaire à sa mise en œuvre qui sera, autant que possible, composé de produits de récupération.

III-2 Processus de création du module

La création du module s'est faite en plusieurs étapes :

La première d'entre elle est la détermination du sujet d'étude. Les différents acteurs du projet (E.C.L., INNOPÔLE, E.S.P. et D.E.E.) se sont mis d'accord sur la formulation, le contenu et le public ciblé par ce sujet d'étude. Le problème posé par les déchets étant au centre des préoccupations des sociétés à cause de son poids dans la problématique de l'environnement, la thématique retenue était, en accord avec les chapitres précédents, de promouvoir leur valorisation. Le choix d'un tel sujet a été guidé

en partie par notre volonté exprimée dès l'origine d'un traitement global de la problématique de l'environnement, allant jusqu'à l'investissement dans la sensibilisation et l'éducation de la population à ces problèmes. Nous avons retenu un sujet intitulé « Une nouvelle vie pour les déchets », destiné au cycle 3 de l'école sénégalaise. L'étude des déchets ne figure pas expressément dans les programmes scolaires sénégalais. Cependant, l'éducation au civisme, au respect de la nature et à une attitude responsable vis à vis des déchets figurent bien dans ces programmes scolaires. Le choix d'un tel sujet pour notre module trouve donc ici sa légitimité. Il existe de nombreux supports pédagogiques sur le thème des déchets qui s'appuient sur différentes démarches. L'originalité et la spécificité du module « Une nouvelle vie pour les déchets » est de s'inscrire de plein pied dans la réalité sénégalaise, celle des écoles, des fondeurs artisanaux et de l'industrie du recyclage des métaux. Il apporte un éclairage sur deux points essentiels, la dangerosité des déchets et l'intérêt économique et social du recyclage. Ce module permet aussi de trouver une définition commune de la classe au terme de « déchet » puis d'identifier, de classer et d'évaluer la quantité de ces derniers. Un petit calcul sur le temps que les déchets mettraient à remplir la classe s'ils n'étaient pas ramassés, aide les élèves à s'approprier ce problème de la quantité et de la diversité des déchets. Le module propose aux enfants de se pencher sur la valeur ou la nocivité des déchets et de trouver des solutions pour leur devenir, avant de leur offrir des possibilités artisanale ou artistique de valorisation.

Après avoir déterminé le sujet et son contenu, la seconde étape consiste à trouver un point d'entrée sur le sujet qui permette de définir les objectifs généraux à atteindre pour le module. Cette entrée est un prétexte pour inciter les élèves à s'intéresser au sujet. Nous avons choisi de proposer un questionnaire aux enfants qui les poussera à réfléchir à une définition du déchet, à sa nature sa diversité et son avenir.

Un cheminement logique doit ensuite être trouvé pour atteindre ces objectifs en n'hésitant pas à passer par des objectifs intermédiaires. Durant cette troisième étape, un inventaire précis du temps à consacrer à l'étude et du matériel nécessaire à sa mise en œuvre sont faits, en tenant compte de l'âge des enfants et des moyens du système éducatif

Vient ensuite l'étape de l'écriture où la collaboration entre les scientifiques et les pédagogues est la plus active. Les scientifiques sont garants du contenu scientifique et du cheminement du module. Les pédagogues valident l'approche adoptée et la forme pour qu'il soit utilisable pour les enfants du primaire. Chacun a son rôle à jouer et seuls, un engagement total et une collaboration franche, peuvent permettre d'atteindre les objectifs fixés. Au fur et à mesure de son écriture, le module est soumis à expérimentation continue dans des classes afin de le rendre plus fonctionnel au moment de sa diffusion. Un test de l'ensemble du module en conditions réelles dans une classe permet de le valider.

Enfin, le module créé doit être diffusé et mis en œuvre dans les classes auxquelles il est destiné. Pour cela des moyens humains, logistiques et financiers suffisants doivent être déployés pour lui assurer une bonne utilisation. La communauté scientifique peut être mise à contribution pour l'accompagnement de l'enseignant et de sa classe.

III-3 Structure du module réalisé

Compte tenu de ce qui a été développé précédemment, nous avons décidé de construire notre

module autour de 6 séquences principales, plus une autre facultative. Suivant l'objectif visé, chaque séquence peut être faite en une ou deux séances, mais l'ensemble de ces séquences pédagogiques se décline en deux grandes parties : la première traite des déchets et des problèmes que posent leur quantité et leur avenir, et la deuxième propose une valorisation artisanale ou artistique des déchets tels que le papier ou la cire de bougie. Cette partie pédagogique s'appuie en outre sur des fiches de travail et des ressources documentaires que nous avons élaborées et sur un document contenant des compléments scientifiques pour permettre à l'enseignant de mieux s'approprier la dimension scientifique de son sujet et de se préparer à quelques questions des enfants. L'ensemble de ces trois parties, les séquences pédagogiques, les documents de travail et le document d'accompagnement scientifique forment notre module qui a pour titre « Une nouvelle vie pour les déchets » et que nous mettons à la disposition de l'école élémentaire sénégalaise.

III-3-1 Les séquences pédagogiques

Comme il est précisé plus haut, les séquences pédagogiques du module se déclinent en deux grandes parties comme le résume le tableau 4-1.

1^{ère} PARTIE

La première partie comporte trois séquences d'une séance chacune.

Séquence n°1 : L'objectif de cette séquence introductive est de faire le point sur la notion de déchet et de sensibiliser les élèves aux problèmes et nuisances qu'ils causent. Ils répondent individuellement à un questionnaire et arrêtent une définition commune au terme de déchet. Les réponses et les échanges accompagnant cette mise en commun doivent leur permettre de faire le point sur l'état de leurs connaissances en la matière.

Séquence n°2 : Elle amène les enfants à prendre conscience de la quantité, et de la diversité et les conduit à la notion de classement des déchets. Dans ce but, ils collectent les déchets qu'ils trouvent dans la cour de l'école. Ils procèdent ensuite à leur identification (éventuellement à un calcul de volume selon le niveau). Puis ils proposent des critères pour les classer en plusieurs familles.

Séquence n°3 : Une fois les déchets identifiés et classés, les élèves s'intéressent à la dégradation et aux moyens de transformation des déchets. Ils s'aident pour cela d'un document que nous avons conçu : « Document illustré sur le recyclage ». Les différentes hypothèses proposées par les enfants sur le comportement des déchets dans le temps sont explorées et si besoin est, vérifiées par exemple en enfouissant des déchets. La synthèse de cette séquence peut ainsi se faire plusieurs mois après la fin du module. Ce sera l'occasion de voir, avec le temps, ce que les élèves ont retenu de ce module. On pourra aussi revenir sur la nécessité de s'occuper des déchets puisque certains d'entre eux n'auront pas encore disparu (matières plastiques, etc.). Cette séquence met fin à la première partie du module.

2^{ème} PARTIE

La deuxième partie est en rapport avec la transformation des déchets. Elle comporte quatre séquences dont une facultative. Il est possible de choisir de ne réaliser que la séquence n°4 ou la séquence n° 5, ou les deux, en fonction du temps disponible pour mettre en œuvre le module.

Les séquences n°4 et n°5 ont le même objectif : montrer comment un déchet peut avoir une deuxième vie moyennant une transformation. Avec la maîtrise du processus de transformation d'un déchet en un objet utile, les élèves apprennent à apprécier les ressemblances et les différences entre un travail artisanal (le leur) et un travail industriel.

Séquence n°4 (2 séances) : Elle traite du recyclage du papier. Compte tenu de la banalisation de cet outil, un support visuel retraçant l'histoire du papier, « La petite histoire du papier », est proposé aux enfants. L'expérimentation consiste ici à fabriquer de nouvelles feuilles de papier à partir de déchets de papier que les enfants ont collectés. Ils comparent ensuite leur papier à un papier industriel.

Séquence n°5 (2 séances) : Dans cette séquence, on s'intéresse au recyclage de la cire de bougie par la technique de fonderie au sable. Cette technique est la même que celle utilisée par les fondeurs artisanaux d'aluminium pour fabriquer des marmites. C'est pourquoi, la première partie de cette séquence sera consacrée à la lecture d'un support visuel intitulé « Histoire de la canette qui rêvait de devenir une marmite ». Les enfants s'en inspirent pour réaliser une bougie par moulage. Ils comparent enfin leur bougie avec une bougie industrielle. Le choix de la bougie s'explique d'abord par sa basse température de fusion (70°C au maximum), et ensuite par le fait que la distribution d'électricité au Sénégal est souvent interrompue, d'où une grande consommation de bougies, dont la cire une fois brûlée, est généralement inutile.

Séquence n°6 (1 séance) : Cette séquence est réalisée en partie en dehors de la classe et vise à stimuler l'imagination et l'esprit de création artistique des enfants. Il s'agit de créer des objets décoratifs, à partir de déchets collectés par les enfants, ceci avec un minimum de règles de base. Par exemple : « créer un objet avec au minimum trois matériaux de récupération ». Ce travail personnel réalisé en partie en dehors de la classe, est un moyen intéressant de faire participer les familles des élèves aux activités scolaires. Il donne aussi au module l'occasion de s'ouvrir à la culture artistique sénégalaise. L'enseignant peut mettre à profit l'une des interruptions du calendrier scolaire pour faire travailler les enfants à la maison sur le sujet. Les créations peuvent ensuite être exposées lors d'une rencontre avec les parents d'élèves ou lors de la fête de l'école à la fin de l'année.

Séquence n°7 (1 séance) : La dernière séquence est une conclusion de ce qui a été fait, à travers un bilan des activités et des connaissances acquises tout le long du module. Elle conduira à la réalisation d'une fiche. La comparaison de cette fiche avec la première (1^{ère} séance) permet à l'enseignant d'évaluer les acquis de ses élèves au cours du module.

Séquence	Durée	Résumé	Actions	Objectifs
1 Introduction Que savons-nous sur les déchets ?	2h	- Présentation du sujet - Répondre individuellement à un questionnaire - Débat collectif		Faire prendre conscience du problème des déchets
2 Quels déchets trouve-t-on dans notre école ?	2h	- Collecte - Tri - Classement	Organiser et réaliser une collecte dans l'école	Prendre conscience de leur quantité et de leur diversité Se confronter aux classements
3 Que deviennent les déchets ?	2h	-Faire des hypothèses -Recherche de l'information -Vérifier les hypothèses	Production individuelle des hypothèses Lecture de documents	Comprendre la nécessité de s'occuper des déchets
4 Recyclons notre papier	2h + 2h	- Approche du recyclage - Découverte de l'histoire du papier	Réaliser des feuilles de papier à partir de vieux papiers et cartons	Comprendre et maîtriser la transformation du déchet en objet utile
5 Réalisons la réplique d'un objet par la technique du moulage au sable	2h + 2h	- Recyclage artisanal de l'aluminium au Sénégal (travail sur document) - Comprendre la transformation et la mise en œuvre des matériaux	Réaliser des moules avec des matériaux simples Fabrication d'objets moulés (réalisation de bougies à partir de résidus de cire)	Sensibilisation et initiation aux techniques artisanales de fonderie (fabrication des marmites) Maîtriser la transformation du déchet en objet utile
6 Créons avec les déchets	Temps libre + 2h	- Réaliser une œuvre individuelle - Organisation d'une exposition	Action autonome pour collecter, transformer et créer un objet à soi qui sera exposé	Stimuler et développer l'imagination et la pratique de création Ouverture à la culture sénégalaise
7 Évaluation Conclusions	2h	- Synthèse générale du module - Dégager des perspectives pour le comportement à avoir à l'avenir		Faire naître une « posture » active face aux questions d'environnement

Tableau 4-1 : Séquences du module avec leurs résumés et leurs objectifs.

III-3-2 Les documents de travail du module

En dehors des compléments indispensables tels que les fiches de travail, nous avons conçu des documents dans le but d'aider les élèves à comprendre les thèmes développés ou de leur fournir des compléments d'informations sur lesquels ils peuvent s'appuyer pour étayer leur argumentaire. Ces documents sont au nombre de trois :

Le premier document intitulé « *Dossier illustré sur le recyclage* » est utilisé lors de la troisième séquence du module et traite du cycle de vie des déchets (que les enfants ont déjà classés par « famille » lors de la deuxième séquence), de leur transformation, des décharges, etc.

Le deuxième document intitulé « *La petite histoire du papier* » est utilisé à la quatrième séquence du module et retrace l'histoire des supports de l'écriture, depuis les peintures rupestres jusqu'au papier tel que nous le connaissons aujourd'hui.

Enfin, le troisième document : « *Histoire de la canette qui rêvait de devenir une marmite* » est utilisé pendant la cinquième séquence et emmène les élèves chez un artisan « fondeur de marmites » d'un quartier de Dakar (Colobane). Il a été conçu grâce à la collaboration initiée dans le cadre de cette thèse avec l'association nationale des fondeurs artisanaux du Sénégal. Les enfants découvrent, à travers un reportage photos, toutes les étapes de la fabrication de la marmite artisanale sénégalaise et le principe de la technique de la fonderie, qu'ils utilisent ensuite pour la réalisation d'une bougie à partir de cire de récupération.

A coté de ces documents destinés aux élèves, un fascicule destiné à l'enseignant complète le module. Il comprend une explication plus détaillée des principes et phénomènes scientifiques sous-jacents aux expérimentations faites en classe (techniques de moulage, fonctionnement de la bougie, fabrication du papier, etc.) ainsi que les définitions de certains termes techniques utilisés, dans le but de faciliter une utilisation autonome du module et de fournir des éléments pour répondre aux questions des enfants.

III-3-3 L'accompagnement du module

Le module a donc été élaboré de manière à être mis en œuvre par l'enseignant de façon autonome. Le déroulement des séquences, les objectifs à atteindre et le cheminement d'accès sont exposés de manière explicite pour faciliter son utilisation. Différents supports pédagogiques complémentaires ont été réalisés pour les élèves et l'enseignant afin d'augmenter l'autonomie et la fonctionnalité de ce module. Ainsi, comme les autres modules développés dans le cadre de la méthode de « La main à la pâte », il peut être mis en œuvre par l'enseignant sans la présence obligatoire d'un tuteur scientifique. Toutefois, il faudrait que des échanges entre les enseignants et les scientifiques puissent avoir lieu pour répondre à d'éventuelles interrogations spécifiques qui peuvent naître des questionnements et des discussions des élèves dans les classes.

Cependant, il ne faut pas perdre de vue une spécificité de l'école sénégalaise qui est l'effectif des classes. Nous avons constaté que, pour un effectif dépassant 50 enfants, l'enseignant peut être débordé et tenté de se réfugier vers une séance de travaux pratiques en occultant l'investigation raisonnée des enfants, qui est le fondement de la démarche. Pour éviter de dénaturer l'esprit de cette méthode, un accompagnement sous forme de tutorat, peut être proposé pour ces enseignants confrontés à cette situation. Ce tuteur, sous la direction de l'enseignant, participera à la mise en œuvre du module. Il peut être de formation scientifique et renseignera l'enseignant, à la demande expresse de ce dernier, sur certains concepts scientifiques. Les limites de son rôle dans la classe seront clairement précisées. L'enseignant reste le seul responsable de sa classe et le seul habilité à diriger les séances. Des étudiants en filières scientifiques peuvent très bien jouer ce rôle utile. Le partenariat initié entre l'École Supérieure Polytechnique et la D.E.E. devrait permettre de trouver facilement des tuteurs potentiels

dans un cadre qui reste à définir.

Conclusion

Dans le traitement global de la problématique de l'environnement, l'éducation tient une place de choix. La diffusion de nos résultats scientifiques pour participer au meilleur devenir de l'environnement s'intègre parfaitement dans les actions engagées parallèlement au Sénégal par le M.E.N. d'une part et la D.E.E. d'autre part pour la rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie à l'école. Le choix de la méthode de cette rénovation s'est porté sur « La main à la pâte » qui se met en place grâce au partenariat avec la France.

L'application de cette méthode passe par la mise à disposition, pour la communauté éducative, d'outils pédagogiques performants dénommés modules, adaptés aux contextes sociaux et éducatifs. Notre participation à cette rénovation s'inscrit dans ce cadre. Le travail accompli scientifiquement sur la valorisation artisanale ou artistique des déchets est réinvesti pour l'éducation et la formation de citoyens conscients de leurs responsabilités vis à vis de la nature, respectueux de l'environnement et sensibilisés à la valeur des déchets. Dans le but d'obtenir un module fonctionnel en conformité avec le système éducatif sénégalais, son élaboration a nécessité l'investissement des communautés scientifiques et pédagogiques de la France et du Sénégal.

La création de ce module sur la problématique de l'environnement est un premier exemple de collaboration concrète entre les communautés scientifiques et éducatives du Sénégal, dans le sens de la rénovation de l'enseignement des sciences. Pour aller plus loin, outre la mobilisation des enseignants, ce type de coopération entre les communautés scientifiques et pédagogiques est à développer pour la mise à disposition d'équipements et de documents pédagogiques. Cela passe par la production d'autres modules afin d'aider le Sénégal à réussir son pari de la rénovation de l'enseignement des sciences. Il faut donc pérenniser ce type de partenariat (E.S.P., E.C.L., D.E.E. et INNOPÔLE), de manière à faire naître d'autres initiatives qui peuvent aboutir à la création de nouveaux modules ou d'autres supports pédagogiques à imaginer (courts métrages, bandes dessinées, etc.).

Une nouvelle vie pour les déchets

Sujet d'étude pour le cycle 3
de l'école primaire sénégalaise

Document de travail pour le maître
Outils pour la classe

Document élaboré dans le cadre d'une thèse en Génie des Matériaux
effectuée en cotutelle entre l'École Centrale de Lyon et
l'École Supérieure Polytechnique de Dakar par Mamadou Babacar NDIAYE

SOMMAIRE

PRÉAMBULE.....	M - 3
MISE EN ŒUVRE DU MODULE.....	M - 5
DÉROULEMENT DES SÉQUENCES DU MODULE	M - 9
MATÉRIEL NÉCESSAIRE A LA MISE EN ŒUVRE	M - 10
SÉQUENCE 1 : QUE SAVONS-NOUS SUR LES DÉCHETS ?.....	M - 11
SÉQUENCE 2 : QUELS DÉCHETS TROUVE-T-ON DANS NOTRE ÉCOLE ?.....	M - 15
SÉQUENCE 3 : QUE DEVIENNENT LES DÉCHETS ?.....	M - 21
DOSSIER ILLUSTRÉ SUR LE RECYCLAGE.....	M - 25
SÉQUENCE 4 : RECYCLONS NOTRE PAPIER	M - 29
REMARQUES SUR LA FABRICATION DU PAPIER	M - 33
FABRIQUER DU PAPIER RECYCLÉ DE MANIÈRE ARTISANALE	M - 39
LA PETITE HISTOIRE DU PAPIER	M - 41
SÉQUENCE 5 : RÉALISONS UNE RÉPLIQUE D'UN OBJET PAR LA TECHNIQUE DU MOULAGE AU SABLE	M - 43
TRUCS ET ASTUCES POUR FABRIQUER UNE BOUGIE	M - 49
HISTOIRE DE LA CANETTE QUI RÊVAIT DE DEVENIR UNE MARMITE	M - 51
PRÉCISIONS SUR LE SUPPORT VISUEL : « HISTOIRE DE LA CANETTE QUI RÊVAIT DE DEVENIR UNE MARMITE ».....	M - 56
SÉQUENCE 6 : CRÉONS AVEC DES DÉCHETS.....	M - 61
SÉQUENCE 7 : ÉVALUATION FINALE	M - 65
COMPLÉMENTS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES.....	M - 69
LE RECYCLAGE – DEFINITIONS.....	M - 69
LA FONDERIE.....	M - 70
LA BOUGIE	M - 77
LE PAPIER	M - 79
LETTRE AUX PARENTS	M - 82
REMERCIEMENTS	M - 83

Remerciements

Ce document est le fruit d'un travail de coopération entre la Direction de l'Enseignement Élémentaire du Sénégal (DEE), l'École Supérieure Polytechnique de Dakar, l'École Centrale de Lyon, INNÔPOLE qui est une association française très active dans le domaine pédagogique et l'association des fondeurs du Sénégal.

Il a été élaboré spécialement pour l'école primaire sénégalaise dans le cadre de la rénovation de l'enseignement des sciences initiée par la Direction de l'Enseignement Élémentaire.

Pour la validation du module en conditions réelles, les tests en classe ont été réalisés au Sénégal dans la classe de Mme Oulimata AW à l'école médina Gounass de Guédiawaye (Directeur M. NDIAYE), et dans la classe de M. THIOBANE à l'école Point E II de Dakar (Directrice Mme DIOP).

PRÉAMBULE

Éduquer à l'environnement est aujourd'hui un véritable enjeu de société et le sujet proposé, « une nouvelle vie pour les déchets », s'inscrit pleinement dans cette perspective. En même temps, en proposant une démarche nouvelle : la démarche d'investigation, il s'inscrit également dans une perspective de rénovation des méthodes d'apprentissage.

1. Éduquer à l'environnement : un enjeu de société

Même si le problème se pose de manières différentes selon les pays, la préoccupation est aujourd'hui universelle : la protection de l'environnement fait partie des grands défis que le monde aura à relever au cours du troisième millénaire.

Le sujet d'étude proposé est à la fois ambitieux et pragmatique, visant simultanément **l'éducation**, qui doit aboutir à un changement immédiat des représentations et des habitudes, et la **sensibilisation** qui doit installer une attitude de curiosité et de vigilance dans la durée.

- **Le premier objectif d'éducation** est de faire comprendre aux élèves les dangers de la décharge sauvage, en terme de respect de l'environnement mais aussi d'hygiène et de santé publique, et de les amener à considérer comme naturel et obligatoire l'usage de la poubelle et le recours à la décharge contrôlée.
- **Le deuxième objectif d'éducation** est de montrer que les déchets peuvent avoir une nouvelle vie, et d'appréhender les concepts essentiels de l'environnement : la réutilisation, le recyclage, le compostage, etc.
- **L'objectif de sensibilisation** vise à sensibiliser les élèves sur les grands enjeux de l'environnement, et plus particulièrement pour le Sénégal mais surtout à mettre en évidence le fait que les solutions actuelles (décharges aériennes) ne sont pas viables à long terme et ne pourront faire face à l'augmentation inévitable de la quantité de déchets (la décharge principale de Mbeubeuss est pleine et elle est rattrapée par l'urbanisation de Dakar).

2. Notions sous jacentes à la réalisation du sujet

Ces notions relèvent de plusieurs domaines disciplinaires, et trouvent leur place dans les programmes scolaires. Les principales sont :

- **Sciences et technologie** : Notion de cycle, transformation de la matière, structuration de la matière (pâte à papier liquide et papier solide), propriétés de quelques matériaux, compréhension et suivi d'un mode opératoire.
- **Maîtrise de la langue** : Expression orale et écrite sous des formes multiples et toujours en situation fonctionnelle.
- **Histoire** : Relation espace temps, compréhension des facteurs de changement dans les savoirs et les pratiques.
- **Culture** : Ouverture sur la culture artistique en lien avec des enjeux économiques (économie populaire, artisanat, création).

3. Une nouvelle approche éducative : la démarche d'investigation

Une « nouvelle vie pour les déchets » s'inscrit résolument dans cette nouvelle approche, offrant pour la classe un outil concret et opérationnel de mise en œuvre de la démarche d'investigation.

- **Une pédagogie active** : La démarche se caractérise par une mise en situation active de l'élève, placé en position de chercheur dans un contexte social (la classe) et accompagné (le maître). En ce sens, cette approche rompt avec une pédagogie fondée sur la transmission des connaissances pour favoriser une pédagogie de la compréhension qui s'appuie sur le questionnement actif et la recherche. La démarche suscite une interaction permanente entre l'action, la réflexion, la formalisation, la communication, et fait alterner travail individuel, travail en petit ou grand groupe, travail autonome et travail guidé.
- **Une pédagogie sociale** : Elle donne une très large place à la communication et à la coéducation entre pairs. Elle offre aussi des échanges avec le monde extérieur.
- **Une pédagogie citoyenne** : Cette démarche participe activement à la construction de ce que nous conviendrons d'appeler « la règle d'or » : *respecter les autres, se faire respecter, se respecter soi même* contribuant ainsi à la construction d'une personnalité solide et solidaire où confiance rime avec exigence, curiosité avec efficacité, rigueur avec imagination. Cette règle représente sans aucun doute un enjeu éducatif fort.

MISE EN ŒUVRE DU MODULE

1. Planification

Ce module est conçu pour le cycle 3 de l'enseignement élémentaire sénégalais. Il comporte 7 séquences qui représentent environ 9 séances d'environ 2 heures chacune.

Pour assurer une continuité dans la construction des connaissances et plutôt que d'étaler les séances dans le temps, nous préconisons un rythme soutenu de deux séances hebdomadaires. Ainsi, on pourra partager chaque trimestre en deux parties et ne proposer par exemple des activités scientifiques qu'en première partie.

2. Le rôle du maître

L'objectif principal du maître est d'aider les élèves dans la construction d'une attitude scientifique et l'acquisition progressive d'une démarche : se poser des questions, émettre des hypothèses, faire des expériences, relever des données, discuter des résultats et des conclusions possibles. Le travail de groupe et les échanges constituent une base essentielle à la construction des connaissances des élèves. Il n'est pas nécessaire d'agir en expert scientifique pour diriger les séances. Faire acquérir cette démarche signifie plutôt :

- l'avoir acquise soi-même ;
- se permettre et permettre aux élèves de tâtonner, voire de faire des erreurs et montrer comment elles peuvent être utiles ;
- accepter de ne pas tout connaître et habituer les élèves à chercher une information auprès d'autres personnes, de livres, à reprendre des explorations ;
- poser des questions et accepter de prendre en compte toutes les réponses ;
- remettre en question sa propre représentation si nécessaire.

Chaque séquence est organisée sensiblement de la même manière :

- **Travail en groupe classe**

Rappeler le fil conducteur du sujet d'étude, les réponses déjà apportées, les questions en suspens, poser le problème du jour.

- **Travail en petits groupes**

Les élèves cherchent et découvrent des solutions possibles au problème proposé. Ils discutent de leurs idées, confrontent leurs représentations à la réalité, essaient de se mettre d'accord pour proposer à la classe un compte rendu commun.

Le maître veille au partage des tâches : il peut proposer aux élèves des rôles définis au sein du groupe. Il veille aussi à la sécurité des enfants au cours des manipulations (ramassage des déchets, utilisation d'outils, de sources de chaleur...).

Au cours de l'activité, le maître observe les enfants, facilite les échanges et relance le travail par le questionnement. Il permet à chaque groupe d'aller jusqu'au bout de ses investigations en gardant à l'esprit le sens de l'activité.

Lors du travail de groupe, le maître gardera en mémoire les réflexions des élèves susceptibles de construire et structurer la synthèse. En effet, nombreux sont les enfants, qui au moment du bilan, ont oublié comment ils en sont arrivés à leur conclusion et les arguments qu'ils avaient proposés pour convaincre.

- **Synthèse collective**

Les comptes rendus de groupe et les discussions qui en résultent ont pour rôle d'aider les élèves à identifier les concepts scientifiques et les articuler entre eux. En tant qu'animateur du débat, le rôle du maître est de guider les élèves pour clarifier leurs idées, organiser leur pensée et comparer les différentes solutions, analyser et interpréter les résultats.

3. Le cahier d'expériences

Le cahier d'expériences est une mémoire individuelle de l'enfant ; c'est pourquoi chacun d'eux a son propre cahier dont le contenu varie d'un élève à l'autre. Son but premier est d'aider à une expression spontanée des idées de l'enfant et à la construction de son argumentation. C'est pour cela que les fautes de français y sont tolérées. Cependant, lors des synthèses collectives, le maître insistera sur l'orthographe correcte des mots et mettra au besoin dans un coin du tableau un lexique comprenant la liste des mots les plus fréquents du module, de manière à ce que les élèves puissent s'y référer ultérieurement. Il est souvent constaté, au bout de quelques séances, que les enfants prennent l'habitude de demander l'orthographe des mots au maître afin de les écrire correctement.

3.1. Quel contenu possible ?

- Des comptes-rendus d'expériences élaborés par l'élève avec ou sans trame : problème posé, hypothèses émises, schémas ou explications des expériences, conclusions intermédiaires, nouvelles questions ...
- Des bilans de classe différenciés des traces individuelles (par la couleur par exemple) qui sont le résultat de la synthèse collective. Ces synthèses pourront également donner lieu à l'élaboration d'affiches et/ou d'un cahier de classe.
- Un lexique individuel.

3.2. A quoi sert-il ?

Pour l'enfant, il l'aide à :

- **se souvenir** (pour poursuivre son exploration, pour communiquer avec ses pairs ou sa famille ;
- **structurer** sa pensée ;
- **comprendre** l'importance de la trace écrite et de son utilité dans d'autres domaines que celui de la langue.

Pour le maître, c'est :

- un regard permanent sur le cheminement de l'enfant ;
- un outil d'aide à l'évaluation au niveau de la maîtrise de la langue, des connaissances scientifiques, du raisonnement ;
- une ressource pour l'élaboration des écrits collectifs.

3.3. Comment le faire évoluer ?

- Inciter les enfants à s'y référer (pour poursuivre le travail, pour communiquer...).
- Mettre en valeur les notes importantes et pertinentes.
- Laisser assez de temps à l'enfant ou lui ménager un moment personnel pour écrire, parfaire ses notes, faire le bilan écrit de ce qu'il a appris.

- Aider à l'orthographe et à la syntaxe. On pourra afficher en classe des supports (lexique, ...) ou tout outil de référence qui semblera approprié.

4. Le travail à la maison

Proposé de manière régulière, le travail à la maison a pour objectifs :

- d'assurer une continuité avec le travail effectué en classe (recherches, réinvestissement...) ;
- de favoriser les liens école-familles ; l'aspect universel des sujets proposés suscite souvent beaucoup d'intérêt chez les parents, intérêt qui apporte une motivation supplémentaire aux enfants pour le travail scolaire. A ce titre, une lettre est proposée à la fin du document, qu'il est possible de distribuer aux familles pour les informer de ce qui va être fait et éventuellement obtenir leur aide pour l'organisation matérielle de la classe.

5. L'évaluation

L'évaluation aborde trois domaines, celui de l'acquisition de la démarche scientifique, celui des connaissances assimilées et celui des interactions éducatives dans la classe.

5.1. Au cours des séances

La structure des séquences permet un travail approfondi de certaines compétences transversales et de compétences relevant de la maîtrise de la langue. On pourra observer leur évolution tout au long du travail : l'enfant s'inscrit-il dans l'activité ? Trouve-t-il sa place dans le groupe ? Produit-il un écrit ? Est-il capable de communiquer (qualité d'expression, prise de parole...) ?

Plus spécifiquement, le maître sera en mesure d'apprécier si les élèves tendent vers l'acquisition d'une véritable attitude scientifique.

5.2. L'évaluation finale

Elle permet d'évaluer de façon formelle les connaissances et d'apprécier le niveau de développement de la démarche scientifique de chaque élève.

DÉROULEMENT DES SÉQUENCES DU MODULE

Séquence	Durée	Résumé	Actions	Objectifs
1 Introduction Que savons-nous sur les déchets ? Fiches 1 et 2	2h	- Présentation du sujet - Répondre individuellement à un questionnaire - Débat collectif		Faire prendre conscience du problème des déchets
2 Quels déchets trouve-t-on dans notre école ? Fiches 3 et 4	2h	- Collecte - Tri - Classement	Organiser et réaliser une collecte dans l'école	Prendre conscience de leur quantité et de leur diversité Se confronter aux classements
3 Que deviennent les déchets ? Fiches 5 et 6	2h	- Faire des hypothèses - Recherche de l'information - Vérifier les hypothèses	Production individuelle des hypothèses Lecture de documents	Comprendre la nécessité de s'occuper des déchets
4 Recyclons notre papier Fiches 7, 8, 9 et 10	2h + 2h	- Approche du recyclage - Découverte de l'histoire du papier	Réaliser des feuilles de papier à partir de vieux papiers et cartons	Comprendre et maîtriser la transformation du déchet en objet utile
5 Réalisons la réplique d'un objet par la technique du moulage en sable Fiches 11, 12, 13	2h + 2h	- Recyclage artisanal de l'aluminium au Sénégal (travail sur document) - Comprendre la transformation et la mise en œuvre des matériaux.	Réaliser des moules avec des matériaux simples Fabrication d'objets moulés (réalisation de bougies à partir de résidus de cire)	Sensibilisation et initiation aux techniques artisanales de fonderie (fabrication des marmites) Maîtriser la transformation du déchet en objet utile
6 Créons avec les déchets Fiche 14	Temps libre + 2h	- Réaliser une œuvre individuelle - Organisation d'une exposition	Action autonome pour collecter, transformer et créer un objet à soi qui sera exposé	Stimuler et développer l'imagination et la pratique de création Ouverture à la culture sénégalaise
7 Évaluation Conclusions Fiche 15 et 16	2h	- Synthèse générale du module. - Dégager des perspectives pour le comportement à avoir dans l'avenir		Faire naître une « posture » active face aux questions d'environnement

MATÉRIEL NÉCESSAIRE A LA MISE EN ŒUVRE

MATÉRIEL CONSOMMABLE			
Matériel	Qté / Dim.	N° séquence	Observations
Du fil de coton (fil pour le tricot)		5	Les besoins de toute la classe (65 élèves) ne dépassent pas 2 m. Il est absolument indispensable que le fil soit 100% en coton.
Grillage en plastique de type moustiquaire	3 m	4	Largement suffisant pour une classe de 65 élèves
MATÉRIEL DE RÉCUPÉRATION			
Matériel	Qté / Dim.	N° séquence	Observations
Sac poubelle	1 par groupe	2	Récupérer des sacs plastiques dans l'école ou au domicile des enfants
Paires de gants	1 par groupe	2	Pour ramasser et trier les déchets. Il est possible d'utiliser des petits sachets en plastiques comme gants.
Papiers usés (journaux, etc.)		4	Tous les journaux sont bons, en couleurs ou noir et blanc
Râpe	1 par groupe	4	Râpe à fruits ou à légumes en métal
Petits bouts de bois	1 par groupe	4	De n'importe quel bois. Ils servent à éviter que les enfants se blessent avec la râpe.
Morceau d'étoffe	2 par groupe 50cmx25cm	4	Un tissu absorbant de préférence, type coton.
Planches en bois	2	4	De n'importe quel bois
Des cuillères	1 par groupe	4	Grandes de préférences
Des récipients	1 par groupe	4	Seau ou baignoire non perforés
Cire de bougie	maximum	5	Aucune discrimination de couleurs
Des restes de bougies commerciales	maximum	5	Elles serviront à la comparaison avec la bougie artisanale
Sable	Autant qu'il en faut	5	Éviter du sable de plage. Privilégier un sable de dune, à défaut d'avoir un sable plus argileux.
Pot en métal	1 par groupe	5	Pot de conserve usuel. Enlever le couvercle et le fond. En prévoir un avec le fond pour faire fondre la cire.
Un modèle rigide	1 par groupe	5	Pour définir la future forme de la bougie. Les modèles peuvent avoir été fabriqués par les élèves (cube, etc.)
De la craie de couleur (facultatif)		5	Ces différentes couleurs peuvent servir à colorer la bougie.
Une source de chaleur	1	5	Récupérer une source de chaleur dans l'école (gaz) pour faire fondre la cire.

SÉQUENCE 1 : QUE SAVONS-NOUS SUR LES DÉCHETS ?

Temps estimé 2 heures

Résumé

En guise d'introduction au module, l'état des connaissances des enfants sur le sujet est évalué grâce un questionnaire individuel. Les différentes réponses sont discutées en groupe..

Objectifs

- Éveiller la curiosité des enfants sur le sujet
- Evaluer ce que chaque enfant sait ou croit savoir sur les déchets pour apprécier ce qu'il aura appris à la fin du module de l'étude de ce module

Matériel

- Du papier ou du carton fin, récupéré pour que chaque élève puisse faire une pochette pour ranger ses fiches de travail qui pourront être reliées à la fin du projet.
- La fiche 1 contenant le questionnaire individuel pour chaque élève et la fiche 2 de la synthèse collective pour chaque groupe. Si les moyens manquent, prendre le temps de faire recopier à la classe les tableaux directement dans leur cahier d'expériences.

Déroulement

Informez les élèves que vous allez commencer une étude sur les déchets qui durera plusieurs semaines. Donner quelques indications sur la manière dont se déroulera le travail (travail individuel, en petits et grands groupes, lectures diverses, écrits et dessins réguliers sur des feuilles de travail fournies à chaque séance ou sur les cahiers d'expériences, ...).

Faire réaliser la pochette avec le nom de l'élève en expliquant à quoi elle va servir.

Distribuer la fiche 1 en donnant quelques explications. Préciser que le questionnaire ne sera pas noté : « on écrit ce que l'on sait », à la fin du sujet d'étude, il servira à voir ce que l'on aura appris.

Faire remplir d'abord le questionnaire individuellement puis organiser une discussion avec toute la classe, pour faire émerger ce que les élèves savent, ou croient savoir sur les déchets et les questions qu'ils se posent. Pour cela, poser vous-même quelques questions et favoriser les échanges entre eux. Noter les réponses au tableau.

Synthèse

En fonction des idées émises par les élèves et notées au tableau, faire un tableau récapitulatif en 2 points à l'image de la fiche 2 :

- ce que nous pensons savoir sur les déchets ;
- les questions que nous nous posons.

Remarque : à ce moment du travail, il s'agit de mettre de l'ordre dans les idées qui naissent de la discussion et non pas d'introduire a priori des réponses.

Faire copier à chaque élève le tableau récapitulatif sur la fiche 2 qu'il collera dans son cahier d'expériences.

Fiche 1 - Questionnaire introductif :	
Travail individuel	Date : 5-janvier-06 Nom : Batoumata V. Diaye CE1

Qu'est-ce qu'un déchet ? quelque chose dont on n'a pas besoin quelque chose qu'on jette dans la poubelle.
Cite trois déchets que tu as jeté récemment : des peaux de banane du papier des sachets en plastique.
Que deviennent les déchets que tu jettes sur la plage, dans la rue, dans la nature ? les déchets disparaissent
Que deviennent les déchets que tu jettes à la poubelle ? les déchets sont ramassés par le camion à ordures

Exemple de questionnaire

Fiche 1 – Questionnaire introductif <i>Travail individuel</i>	Date : _____ Nom : _____
<p>Qu'est-ce qu'un déchet ?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Cite trois déchets que tu as jetés récemment :</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Que deviennent les déchets que tu jettes dans la cour de l'école, dans la rue, à la plage ?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Que deviennent les déchets que tu jettes dans la poubelle ?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	

Fiche 2 – Premières conclusions <i>Travail collectif</i>	Date : _____
<p>Ce que nous pensons savoir sur les déchets :</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Les questions que nous nous posons :</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	

SÉQUENCE 2 : QUELS DÉCHETS TROUVE-T-ON DANS NOTRE ÉCOLE ?

Temps estimé 2 heures

Remarque: Avant cette séance, penser à prévenir le directeur de l'école et les collègues de votre projet de ramassage (lieu, heure, modalités).

Résumé

Les élèves collectent les déchets présents dans l'école (classe, cour, cantine), font une estimation du volume des déchets collectés, puis trient et classent les déchets en fonction de critères qu'ils détermineront (par exemple en fonction de leur nature, de leur origine etc.).

Objectifs

- Identifier et nommer les déchets de la vie quotidienne.
- Prendre conscience de la quantité de déchets produits.
- Apprendre à faire un classement.

Matériel

- 1 sac plastique par groupe pour recueillir les déchets.
- Des gants ou des petits sacs plastique, pour protéger les mains.
- Un ou deux bâtons de 1 m pour faire des mesures (un calcul du volume des déchets sera proposé).
- Fiches de travail 3 et 4 pour chaque élève. Si les moyens manquent, faire recopier à l'avance les tableaux aux élèves dans leur cahier d'expériences.

Déroulement

Constituer des groupes de cinq à sept élèves au maximum.

Fournir à chaque groupe un sac poubelle pour ramasser **sans distinction** les déchets « naturels » (végétaux, alimentaires) et les déchets « industriels » (papiers, fer, plastiques) en utilisant des gants ou des petits sacs plastique pour protéger les mains.

Répartir les groupes sur les espaces de l'école, nommer un responsable de groupe et donner une indication du temps imparti. Préciser les consignes de sécurité.

De retour en classe, rassembler tous les sacs et demander aux élèves de faire une estimation du volume global de la collecte, garder le chiffre obtenu pour faire plus tard un petit problème.

Distribuer la fiche 3. Faire identifier et organiser le tri. Après avoir protégé une surface au sol ou sur une table, chaque groupe met un nom sur chacun de ses déchets et procède à leur tri. L'objectif est de classer les déchets en plusieurs familles selon un critère qu'ils définiront. A l'issue de ce premier essai de classement, organiser un échange.

Synthèse

- **Débat collectif** : on procède à une comparaison des différents types de classements réalisés et des différents critères utilisés. Amener les enfants à prendre conscience des difficultés que l'on rencontre lorsque l'on veut classer (nombre de critères, choix des critères en fonction de l'objectif à atteindre, ...), puis se mettre d'accord sur un classement commun, l'écrire au tableau, et le faire recopier par chacun sur la fiche 4 qu'il collera dans son cahier d'expériences.
- **Fin de séance** : pour enrichir la réflexion, on demandera aux élèves de regarder ce qui se trouve dans la poubelle familiale pour en reparler à la prochaine séance.

Exemples de petits problèmes sur la quantité des déchets :

L'objectif est de faire prendre conscience de la quantité de déchets et des problèmes engendrés si les déchets ne sont pas ramassés.

A : Imaginer une population comme celle de Dakar, avec 3 millions d'habitants. Si chaque habitant produit le nombre de kilos de déchets (que nous avons estimé plus haut) par semaine, quelle quantité sera produite par an par tous les habitants de Dakar ?

B : Calculer le volume approximatif de la classe (longueur*largeur*hauteur).

Calculer le volume approximatif des ordures collectées.

Si cette quantité de déchets était produite tous les jours et si les déchets n'étaient pas ramassés, combien de jours faudrait-il pour que la classe soit pleine ?

Le problème peut être plus ou moins compliqué en fonction du niveau des élèves.

Fiche 4 : Classement des déchets collectés dans l'école

Travail collectif

Date 9 janvier 06
Nom :
fatou gueye
Dacosta CEM

- on peut classer les déchets en 8 groupes:
- 1°) le groupe des papiers
 - 2°) le groupe des plastiques
 - 3°) le groupe des bois
 - 4°) le groupe des fruits
 - 5°) le groupe des feuilles d'arbre
 - 6°) le groupe des restes d'aliment
 - 7°) le groupe des pierres
 - 8°) le groupe des morceaux de fer

Exemple de fiche remplie

Fiche 3 – Nommer et classer les déchets <i>Travail en groupe</i>	Date : _____
<p>Nommez les déchets que vous avez trouvés dans votre école :</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Regroupez les déchets en familles selon leur nature et trouvez un nom pour chacune d'elle :</p> <p>Famille : _____</p> <p>_____</p> <p>Famille : _____</p> <p>_____</p> <p>Famille : _____</p> <p>_____</p> <p>Famille : _____</p> <p>_____</p> <p>Famille : _____</p> <p>_____</p>	

Fiche 4 – Classer les déchets <i>Travail collectif</i>	Date : _____
<p>Regroupez les déchets en familles selon leur nature et trouvez un nom pour chacune d'elle :</p> <p>Famille Nom : _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Famille Nom : _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Famille Nom : _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Famille Nom : _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Famille Nom : _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	

SÉQUENCE 3 : QUE DEVIENNENT LES DÉCHETS ?

Temps estimé 2 heures

Préalable : Rappel de la séance précédente puis échanges et conclusions sur l'observation des poubelles de la maison.

Résumé

On interroge les élèves sur ce que deviennent les déchets et en particulier sur le temps qu'ils estiment nécessaire pour que ceux-ci disparaissent d'eux-mêmes. Ils remplissent un tableau à partir de leurs hypothèses, puis procèdent à une recherche documentaire qui permet de valider ou infirmer leurs hypothèses.

Objectifs

- Découvrir le caractère dégradable de la matière.
- Prendre conscience du temps que mettent les choses à disparaître naturellement et des problèmes que cela pose : esthétique, pollution de l'air ou de l'eau, danger pour les hommes ou les animaux etc.

Matériel

Fiches de travail 5 et 6 pour chaque élève et un support écrit et illustré (document illustré sur le recyclage) par groupe. Si les moyens manquent, faire recopier à l'avance les tableaux vides aux élèves dans leur cahier d'expérience.

Déroulement

Demander aux élèves, à partir de leurs observations personnelles, de faire des hypothèses sur le temps nécessaire aux différents déchets pour disparaître naturellement.

Remplir la colonne : « Ce que je pense » de la fiche 5.

Puis leur demander de rechercher dans le document dont ils disposent (document illustré sur le recyclage) des informations qui leur permettront de compléter la colonne « ce que j'ai appris ».

Synthèse

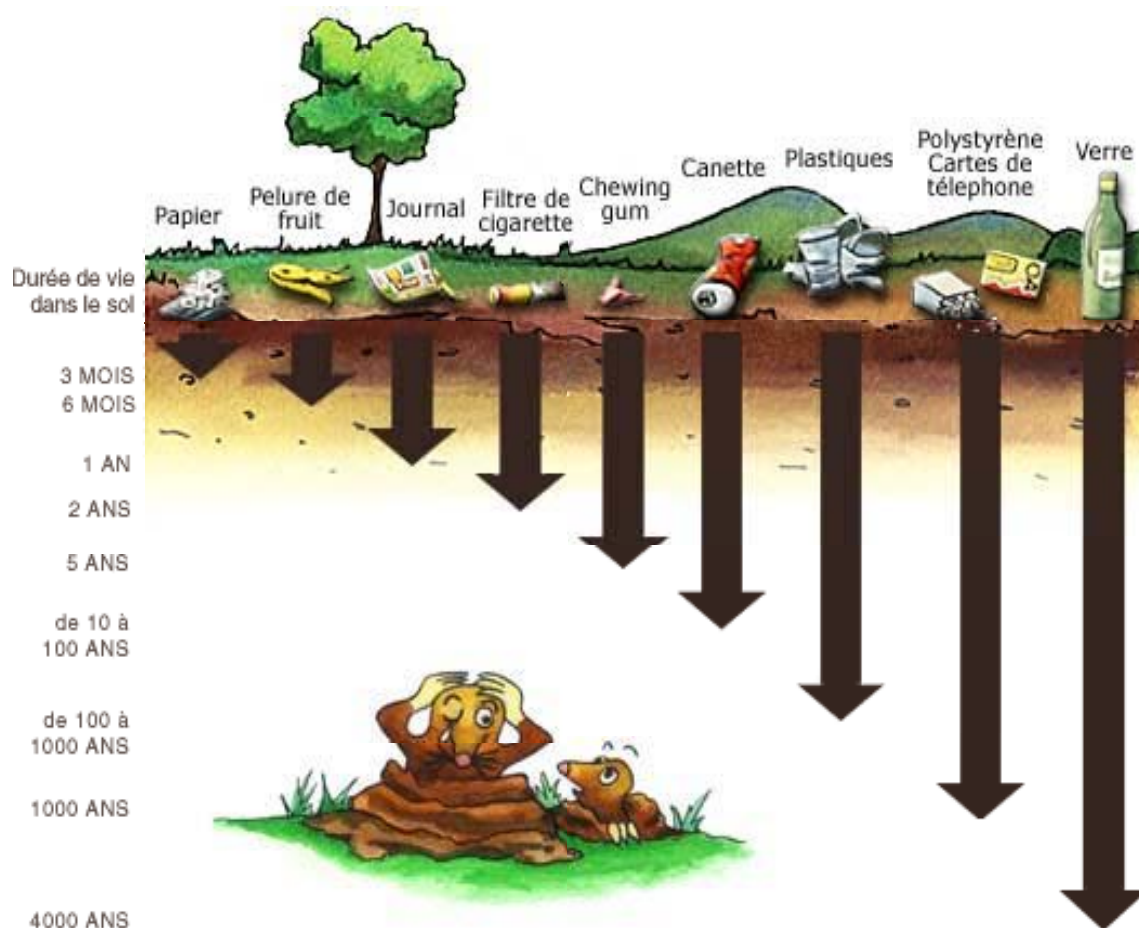
- Discussion en grand groupe : commenter les écarts entre hypothèses et résultats.
- Réfléchir aux différents problèmes et au danger que représentent les déchets lorsqu'ils ne sont pas pris en charge.
- **Introduire la question : que peut-on faire des déchets ?**
- A partir des connaissances du groupe et des informations trouvées dans les documents, organiser un échange en grand groupe et essayer d'identifier différentes façons pour transformer les déchets en réfléchissant à leurs avantages et à leurs inconvénients.
- Élaborer en commun, au tableau, une synthèse du travail sous une forme qui permettra de remplir la fiche 6.
- En prenant l'exemple du papier ou de la bougie, réfléchir collectivement pour trouver des moyens de les recycler.
- Une fois les réponses arrêtées et notées au tableau, remplir la fiche 6.

Fiche 6 – Les solutions auxquelles nous avons pensé pour transformer les déchets <i>Travail collectif</i>		Date : _____
Type de déchets _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____	Solution proposée _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____	Avantages et inconvénients _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____
Proposez des moyens pour recycler du papier et de la bougie Le papier : _____ _____ _____ _____ La bougie : _____ _____ _____ _____ _____		

DOSSIER ILLUSTRÉ SUR LE RECYCLAGE

Suivant leur nature, les matériaux se dégradent à des vitesses très différentes, et si certains peuvent disparaître, d'autres présentent un vrai danger pour l'environnement ou pour notre santé.

Abandonnés dans la nature, les déchets d'origine animale ou végétale (os, épluchures, papier...) vont disparaître assez rapidement sous l'effet de la pluie, du soleil, mais aussi des insectes, des vers, etc., mais les matériaux comme le plastique, le métal ou le verre vont mettre beaucoup de temps pour disparaître. Voici quelques exemples ¹.



¹ www.lettri.com

D'autres déchets comme les huiles de moteur, les piles, les peintures, contiennent des produits très dangereux (poisons) pour le sol, l'air et l'eau mais aussi pour l'homme et les animaux.

1. Les décharges sauvages

Une décharge est sauvage lorsque les déchets sont déposés sans tri et sans surveillance. Elle n'est pas jolie à voir et est dangereuse car elle peut causer de graves pollutions.



Bord de mer à Djiffer² (Sénégal)



Corniche ouest à Dakar³ (Sénégal)

2. Les décharges contrôlées

Dans une décharge contrôlée, les déchets sont triés et surveillés. Même s'ils sont enterrés, les déchets sont toujours surveillés pour que l'eau de pluie qui les traverse ne se mélange pas avec l'eau des puits².



Le tri manuel des déchets au Caire (Égypte)²

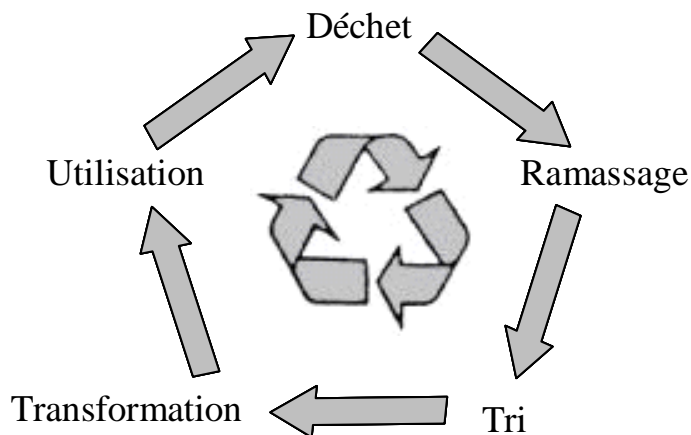


² Photo Renée MIDOL

³ Photo Sandrine BEC

3. Le recyclage

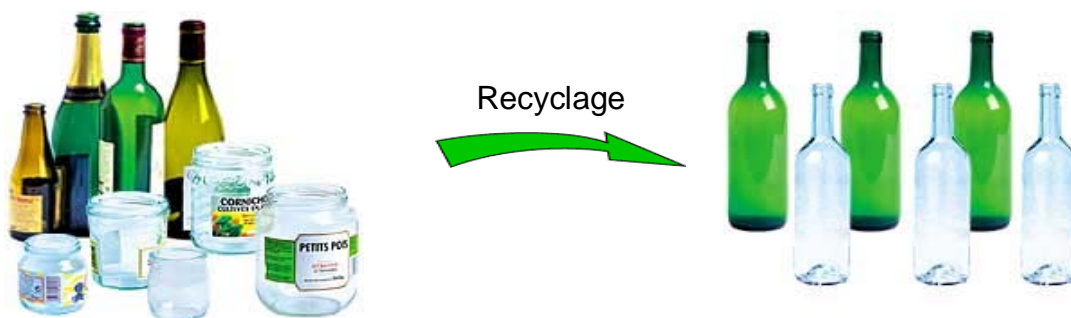
On parle de recyclage d'un déchet lorsque ce déchet est ramassé et transformé pour être réutilisé.



4. Comment peut-on recycler les déchets ?

LE VERRE

Il est cassé puis fondu, on peut alors fabriquer de nouvelles bouteilles en verre¹.



LES BOUTEILLES EN PLASTIQUE

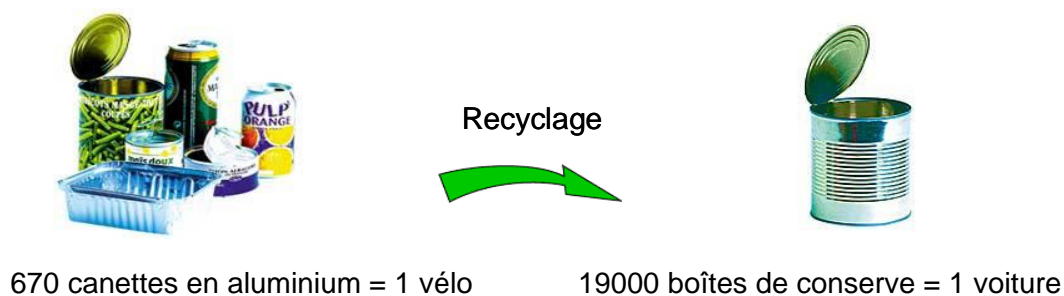
Elles sont broyées, lavées et séchées. Certaines serviront à la fabrication de tissus et d'autres à fabriquer de nouvelles bouteilles en plastique, des tuyaux, des couettes des arrosoirs...

¹ www.lettri.com



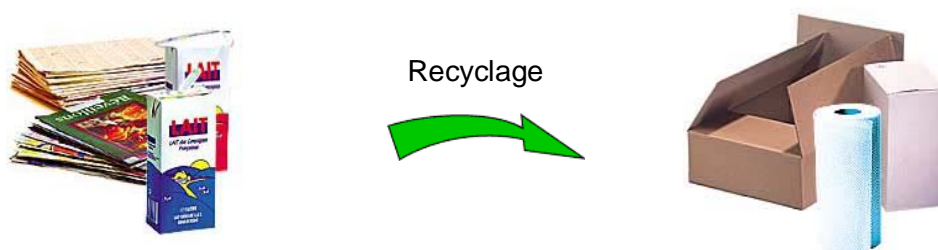
LES EMBALLAGES EN MÉTAL

Le métal est fondu et pourra servir à fabriquer de nouvelles boîtes en métal, des voitures...



LE PAPIER, LE CARTON et LES JOURNAUX

Ils sont broyés et retransformés en papier et carton¹



Avec 100 tonnes de papier usé, on peut obtenir 90 tonnes de papier recyclé.

SÉQUENCE 4 : RECYCLONS NOTRE PAPIER

Remarque : on aura pris soin de faire tremper à l'avance (au moins deux jours pour le carton) le papier que l'on veut recycler (coupé en petits morceaux) dans des bassines ou des seaux d'eau. Pour le papier journal, quelques minutes suffisent. On pourra aussi faire sécher des pétales de fleurs que l'on pourra mettre dans la pâte pour décorer le papier.

Cette séquence est divisée en deux séances de 2h.

1^{ère} SÉANCE

Temps estimé 2 heures

Résumé

Après lecture du mode opératoire de fabrication artisanale du papier et inventaire du matériel disponible, les élèves s'organisent par groupe pour fabriquer du papier à partir de papiers usés. On réalisera, dans la mesure du possible, une feuille par élève qui peut être utilisée par exemple pour écrire un poème lors de la fête des mères ou des pères.

Objectifs

- Savoir lire un mode d'emploi.
- S'organiser à plusieurs et planifier les tâches. Être patient et méticuleux.
- Faire une analyse comparative entre un produit artisanal et un produit industriel.

Matériel

Prévoir pour chaque groupe :

- une bassine ou un seau pour tremper le papier ;
- une râpe et un morceau de bois de forme parallélépipédique de préférence. **Astuce** : Vous pouvez fabriquer vous-même une râpe en perçant une tôle en fer avec un clou. Cette tôle peut-être celle d'un pot de lait, de tomate, etc ;
- un tamis (grillage moustiquaire à 50 cm x 25 cm) et des morceaux de tissu (d'une taille comparable ou légèrement supérieure) ;
- une éponge et une cuillère (ou petit contenant) ;
- deux planches d'une taille légèrement supérieure à celle du tamis pour presser le papier lors du séchage ;
- document sur l'histoire du papier.

Par élève :

Fiches de travail 7, 8, 9 et 10. Si les moyens manquent, faire recopier à l'avance les tableaux vides par les élèves dans leur cahier d'expériences.

Avant de commencer cette séance, chaque élève répondra, sur sa fiche, à la question suivante : Comment (couleur, résistance, texture, etc.) sera le papier que nous allons fabriquer ? (Fiche 7).

Ces hypothèses seront vérifiées lors de la séance de synthèse des réponses de la fiche 9).

Déroulement

S'assurer que les élèves ont lu et compris le déroulement du mode opératoire avant de démarrer la manipulation (un problème de vocabulaire peut se poser).

Couper minutieusement le papier détrempé du bout des doigts pour faire des morceaux les plus petits possible (on doit arriver à une sorte de purée).

Pour affiner encore la pâte à papier obtenue, la râper en s'aidant du morceau de bois pour ne pas s'écorcher les mains. La pâte à papier est prête lorsqu'on n'arrive plus à distinguer le papier de l'eau. Le tout doit être homogène.

Rajouter éventuellement les pétales séchés et mis en miettes.

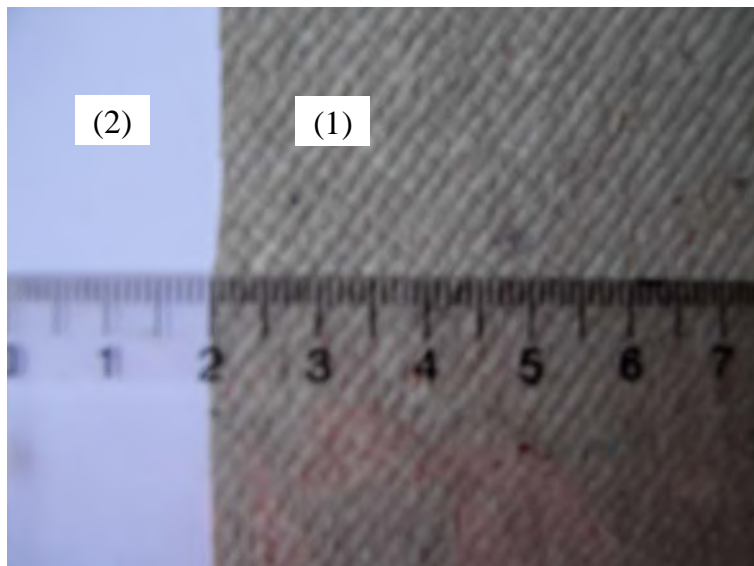
Puis étaler avec précaution la pâte sur le tamis avec la cuillère (pas trop épais mais pas de trou non plus).

Poser un tissu sur la pâte et éponger le maximum d'eau.

Retourner et mettre un tissu sur la deuxième face puis éponger.

Déposer la feuille avec ces deux tissus sur la planche en bois. La feuille suivante sera déposée à côté s'il y a de la place, sinon, il est possible de superposer 5 à 7 feuilles de papier en intercalant entre chaque « feuille » un morceau de tissu et en épongeant à chaque fois.

Pour finir, on posera la deuxième planche de bois, et on mettra un objet lourd par-dessus (voir document d'accompagnement du maître pour plus d'explications). Il faut laisser sécher un jour ou deux.



Exemple de feuille obtenue (1) à côté d'une feuille industrielle (2) (de part et d'autre de la graduation « 2 » de la règle).

2^{ème} SÉANCE

Temps estimé 2 heures

Synthèse

Fiche de travail 8 : chaque élève explique comment il a réalisé son papier.

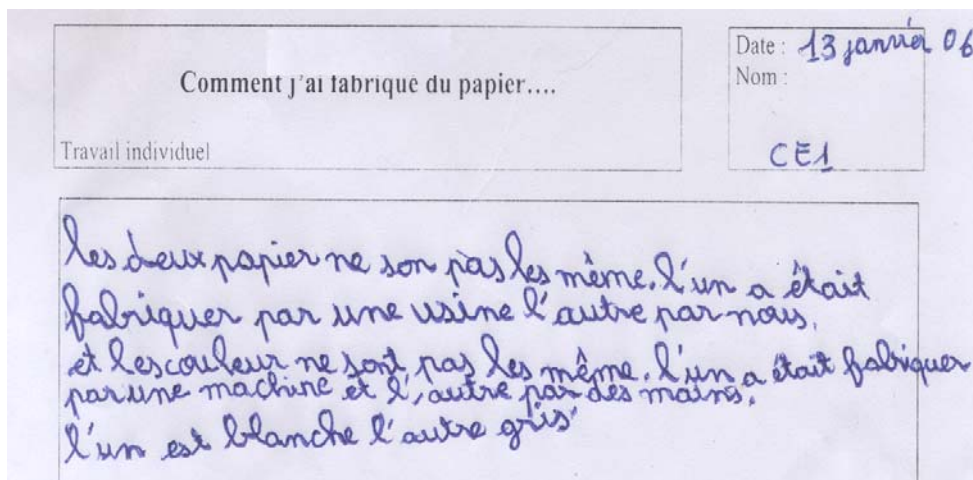
Fiche de travail 9 : Chaque groupe décrit le produit qu'il a obtenu et le compare à un papier industriel. Observer attentivement la couleur, la consistance, la solidité, etc. Le tableau de la fiche 9 va les aider dans cette voie en ne proposant que deux colonnes : ressemblances et différences. Faire rechercher aux enfants des explications sur les différences observées.

Collectivement, le maître pourra reprendre au tableau, avec l'aide des enfants, le remplissage de la fiche de compte rendu du produit obtenu (fiche 9). Cette nouvelle fiche sera recopiée par les élèves sur la page de synthèse collective de leur cahier d'expériences à côté de l'endroit où ils auront collé la fiche 9 issue de leur travail en groupe.

Histoire du papier

Prévoir 40 minutes environ

Lecture du document illustré retraçant l'histoire du papier puis discussion collective, chaque élève écrira une petite conclusion sur ce que lui inspire cette histoire et ce qu'il en a retenu (fiche 10).



Comment j'ai fabriqué du papier....

Travail individuel

Date : 13 janvier 06
Nom : CE1

les deux papier ne son pas les même. L'un a était fabriquer par une usine l'autre par nous, et les couleur ne sont pas les même. L'un a était fabriquer par une machine et l'autre par des mains, l'un est blanche l'autre gris

Exemple de fiche remplie

REMARQUES SUR LA FABRICATION DU PAPIER

Remarque 1 : utiliser la râpe aussi longtemps que nécessaire afin d'avoir une pâte fine.

Le processus utilisé pour fabriquer notre pâte à papier est un procédé mécanique. Il faut donc bien broyer le papier avec la râpe afin d'avoir la pâte la plus fine possible. Plus la pâte est fine, meilleure sera la qualité du papier. Lorsqu'il ne sera plus possible de distinguer le papier de l'eau, la pâte sera prête.

Remarque 2 : Mettre assez d'eau pour avoir une pâte fluide : on pourra obtenir des feuilles moins épaisses.

Le volume d'eau à ajouter au papier pour la formation de la pâte n'a pas d'importance. Mais plus y a de l'eau, plus nous aurons la possibilité d'avoir une pâte fluide, ce qui est essentiel pour avoir des feuilles de faible épaisseur, la pâte fluide étant plus facile à étaler sur la moustiquaire.

Remarque 3 : Étaler la pâte à papier en ayant une épaisseur homogène sur toute la surface de la moustiquaire.

La cuillère à soupe est utilisée pour étaler la pâte sur la moustiquaire. Mais tout autre objet pouvant assurer cette fonction peut également être utilisé. Cependant, il faut veiller à ne pas étaler deux fois de la pâte à papier au même endroit et essayer d'avoir la même quantité de pâte à papier sur toute l'étendue de la moustiquaire. Ceci aidera à avoir une feuille de papier avec une épaisseur homogène.

Remarque 4 : Mettre un objet lourd, au-dessus de la planche en bois qui recouvre les feuilles de papier enveloppées dans des tissus, pour augmenter leur densité et les aplanir.

Industriellement le papier est pressé pour augmenter sa densité. Il devient ainsi plus solide et plus résistant. Pour faire office de presse dans notre procédé artisanal, il faudra poser

sur la planche qui recouvre les feuilles de papier des enfants, un objet lourd qui aplanira le papier par la même occasion.

Remarque 5 : *Faire attention à ne pas déchirer le papier séché lorsqu'on le décolle de la moustiquaire.*

La moustiquaire sèche avec le papier et peut être enlevée facilement une fois que ce dernier est sec. Cependant il faudra faire attention, en détachant la moustiquaire du papier, à ne pas le déchirer ce dernier. Notre papier, contrairement au papier industriel, n'est pas traité pour augmenter sa résistance à la déchirure, il se déchire donc facilement.

Quelques petites remarques supplémentaires sur le papier artisanal produit :

Notre procédé artisanal permet d'avoir une pâte mécanique mais elle ne peut pas être aussi fine que la pâte industrielle.

Nous n'avons pas de « pulpeurs » pour séparer les fibres. Donc toutes les fibres ne sont pas détachées les unes des autres.

Nous n'avons pas de « presse » de plusieurs tonnes (comme les industries) pour compacter notre papier.

Nous n'avons pas ajouté de produits chimiques pour améliorer la résistance de notre papier et ses propriétés pour l'écriture et l'impression.

Notre papier n'est pas enduit pour améliorer la texture, la porosité, l'écriture, etc.

Tous ces éléments font que ***notre papier est épais*** (plus il est épais, plus il aura tendance à casser lorsqu'on le plie comme c'est le cas du papier carton), ***poreux et rugueux au toucher***. De plus, ***sa propriété d'écriture est limitée et il se déchire facilement*** (les liaisons entre les fibres de papier ne sont pas très fortes car ces dernières ne sont pas bien enchevêtrées les unes aux autres).

Fiche 7 – Comment sera le papier que nous allons fabriquer ? <i>Travail individuel</i>	Date : _____ Nom : _____
<p>Comment sera le papier que tu vas fabriquer ? Décris-le (forme de la feuille, couleur, solidité...)</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Comment sera sa surface : lisse, rugueuse... ?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Pourras-tu écrire dessus ? Essaie d'expliquer ta réponse.</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	

Fiche 8 – Comment j’ai fabriqué du papier <i>Travail individuel</i>	Date : _____ Nom : _____
<p>Raconte comment tu as fabriqué du papier (tu peux ajouter un dessin)</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Dessine le papier que tu as fabriqué</p>	

<p>Fiche 9 – Comment est le papier que nous avons fabriqué ?</p> <p><i>Travail en groupe</i></p>	<p>Date : _____</p>
<p>Décrivez le papier obtenu (forme de la feuille, couleur, solidité, surface lisse ou non...)</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	
<p>Comparez-le avec du papier industriel : forme, couleur, solidité, écriture, surface, ...etc.</p>	
<p>Ressemblances</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	<p>Différences</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>

Fiche 10 – Ce que j’ai retenu de l’histoire du papier <i>Travail individuel</i>	Date : _____ Nom : _____
<p>Explique ce que tu as appris en lisant la petite histoire du papier :</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Que penses-tu de cette histoire ?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	

FABRIQUER DU PAPIER RECYCLÉ DE MANIÈRE ARTISANALE

Matériel

- Du papier journal ou du carton
- Une bassine ou un seau
- 2 morceaux de tissu par feuille de papier fabriquée
- Un morceau de grillage de type moustiquaire de taille plus petite qu'un morceau de tissu
- Une éponge
- Une grosse cuillère
- Une râpe et un morceau de bois

Fabrication

1. Découper le papier en petits morceaux et les faire tremper dans la bassine ou le seau d'eau.



2. Lorsque le papier est bien trempé, le déchirer en petits morceaux avec les ongles.
3. Mettre un peu de papier sur la râpe et l'écraser avec le morceau de bois. Continuer jusqu'à avoir une purée.



4. Lorsque nous avons une purée, étendre la moustiquaire au-dessus de la bassine ou du seau.
5. Deux élèves tiennent la moustiquaire et un autre verse doucement la purée de papier avec la grande cuillère. Verser cuillère après cuillère jusqu'à recouvrir toute la moustiquaire. Ne pas verser deux fois au même endroit et ne pas laisser de trous.



6. Ensuite, pendant que les camarades tiennent encore la moustiquaire, éponger l'eau qui goutte.



7. Lorsqu'il n'y a plus d'eau qui goutte, mettre un tissu sur une planche en bois que vous indiquera le maître.
8. Déposer la moustiquaire sur ce morceau de tissu.
9. Mettre un autre morceau de tissu au-dessus de la moustiquaire.
10. Éponger l'eau sur le tissu.
11. Lorsque tous les camarades auront déposé leur feuille, le maître posera une planche en bois par-dessus.
12. Laisser sécher deux jours.



13. Deux jours plus tard, récupérer les moustiquaires et enlever le papier. Faire doucement pour ne pas le déchirer.

LA PETITE HISTOIRE DU PAPIER

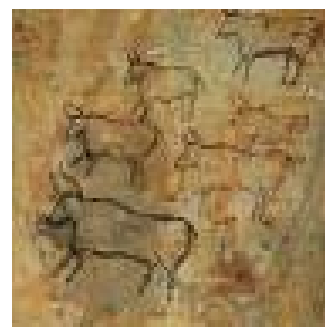
L'homme existe sur la terre depuis environ soixante millions d'années,

Il écrit depuis environ 6000 ans

Mais il y a seulement 2000 ans qu'il a inventé le papier !

L'homme préhistorique, (il y a environ. 30000 ans) est le premier à avoir laissé des traces écrites. Il s'agit surtout de dessins peints sur les murs des cavernes.

*Dessins d'animaux dans une grotte*⁴ →



*Tablette d'argile gravée*⁵

C'est en Mésopotamie, il y a 5000 ans qu'apparaît la première écriture, c'est-à-dire l'utilisation du signe. Les Sumériens fabriquent de *petites tablettes d'argile* qu'ils gravent avec des bâtonnets puis font cuire leurs tablettes pour les conserver. Ces tablettes sont lourdes et il faut beaucoup de temps pour les fabriquer.

Mille ans après, les Égyptiens inventent *le papyrus*. C'est une feuille réalisée en tressant des bandelettes d'une plante appelée papyrus. C'est un matériau facile à réaliser et léger. Il se conserve bien. C'est du mot papyrus que viendra plus tard le mot « papier ». Ils fabriquent aussi des encres (mélange de sels et de noix) qui vont beaucoup faciliter l'écriture⁶.

⁴ www.lyceepasteur-ceb-ccslf.com.br

⁵ www.huntzinger.celeonet.fr

⁶ www.aly.abbara.com



Plante de papyrus



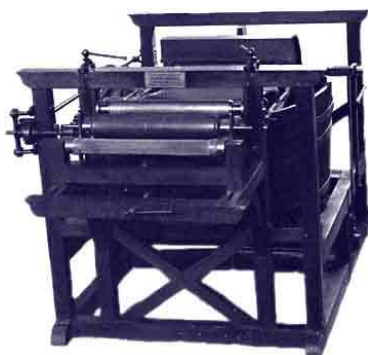
Feuille de papyrus



Mais il n'est pas facile d'avoir du papyrus en dehors de l'Égypte. Les hommes décident alors d'utiliser les peaux des animaux. Les peaux sont nettoyées et travaillées. C'est la naissance du **parchemin**⁷. Le parchemin sera largement utilisé en Europe pendant 15 siècles.

Parchemin

Il y a environ 2000 ans, les Chinois inventent **le papier**. Ils utilisent le bambou, le mûrier, le lin, le blé et la paille de riz pour sa fabrication. Mais il faudra mille ans pour que cette découverte soit connue et le papier ne sera pas utilisé en Europe avant les années 1300. Le papier a été longtemps cher et rare car les machines ne permettaient de fabriquer qu'une feuille à la fois. C'est avec l'invention de l'imprimerie par Gutenberg en 1450 que le papier va connaître un grand développement⁸.



Machine à papier ancienne



Machine à papier moderne

⁷ www.crevettesofi.free.fr

⁸ www.cerig.efpg.inpg.fr

SÉQUENCE 5 : RÉALISONS UNE RÉPLIQUE D'UN OBJET PAR LA TECHNIQUE DU MOULAGE AU SABLE

Remarque : cette séquence est découpée en deux séances de deux heures. L'enseignant devra se montrer vigilant en veillant au temps qu'il accordera pour la réalisation de chaque étape de la première séance, sinon, il risque de dépasser le temps prévu.

1^{ère} SÉANCE

Temps estimé 2 heures

Résumé

Après lecture attentive et discussions du reportage photo sur le recyclage artisanal de l'aluminium (30mn environ), les élèves vont s'essayer au moulage. Dans chaque groupe, ils vont réaliser une bougie à partir de restes de cire récupérés à la maison.

Objectifs

- Comprendre la reproduction d'un objet par la technique de moulage à partir d'un modèle.
- Rédiger la notice de fabrication et la valider par la réalisation
- S'organiser à plusieurs et planifier les tâches. Être patient et méticuleux.
- Faire une analyse comparative entre un produit artisanal et un produit industriel.

Matériel

Pour la classe :

Une source de chaleur (gaz) à la seule disposition de l'adulte pour faire fondre la cire.

Pour chaque groupe :

- un petit récipient pour recueillir la cire (qui sera fondue par le maître) ;
- du sable s'il ne peut pas être récupéré sur place ;
- un pot de métal vide dont les enfants auront préalablement enlevé les deux fonds. Ce travail peut être fait à la maison, avant la séance de moulage ;
- un modèle (voir les spécifications minimales d'un bon modèle dans la partie accompagnement scientifique) pour la forme de la bougie. Il doit être plus petit que le pot en métal ;
- du fil de tricot ou n'importe quel fil de coton pour faire la mèche (voir pourquoi le coton dans la partie accompagnement scientifique).

Par élève :

Fiches de travail 11, 12 et 13 pour retracer le mode opératoire et garder des notes de la synthèse collective. Si les moyens manquent, faire recopier aux élèves les fiches vides dans leur cahier d'expériences.

Déroulement

Lecture du document d'accompagnement sur l'histoire de la canette par les élèves, suivie d'une discussion afin de garantir la compréhension du vocabulaire et des différentes étapes nécessaires à la réalisation d'un objet par la technique du moulage avec du sable.

Le maître présente ensuite à la classe le matériel mis à sa disposition et demande à chaque groupe de réfléchir à la manière de réaliser une bougie et de mettre ses idées par écrit. Il guide la rédaction du protocole opératoire en posant des questions aux enfants, comme celle de la mise en place de la mèche (qui n'est pas évoquée dans le document photo), jusqu'à arriver à des propositions qui garantissent un niveau acceptable de réalisation. Après avoir élaboré leur mode opératoire, les élèves font des hypothèses sur les caractéristiques de leur produit (texture ... fiche 11) avant de passer à la réalisation de la bougie.

En cas de difficulté, le maître pourra guider les enfants pour les aider à définir un mode opératoire suivant le modèle ci-après.

MODE OPÉRATOIRE DE FABRICATION D'UNE BOUGIE

1. Tamiser le sable s'il est mélangé avec des morceaux de bois ou des cailloux.
2. Mélanger le sable avec un peu d'eau.
3. Prendre un peu de sable mouillé et le tasser avec la règle. Former un carré de 10 à 15 centimètres de côté.



Tamisage du sable avec la moustiquaire



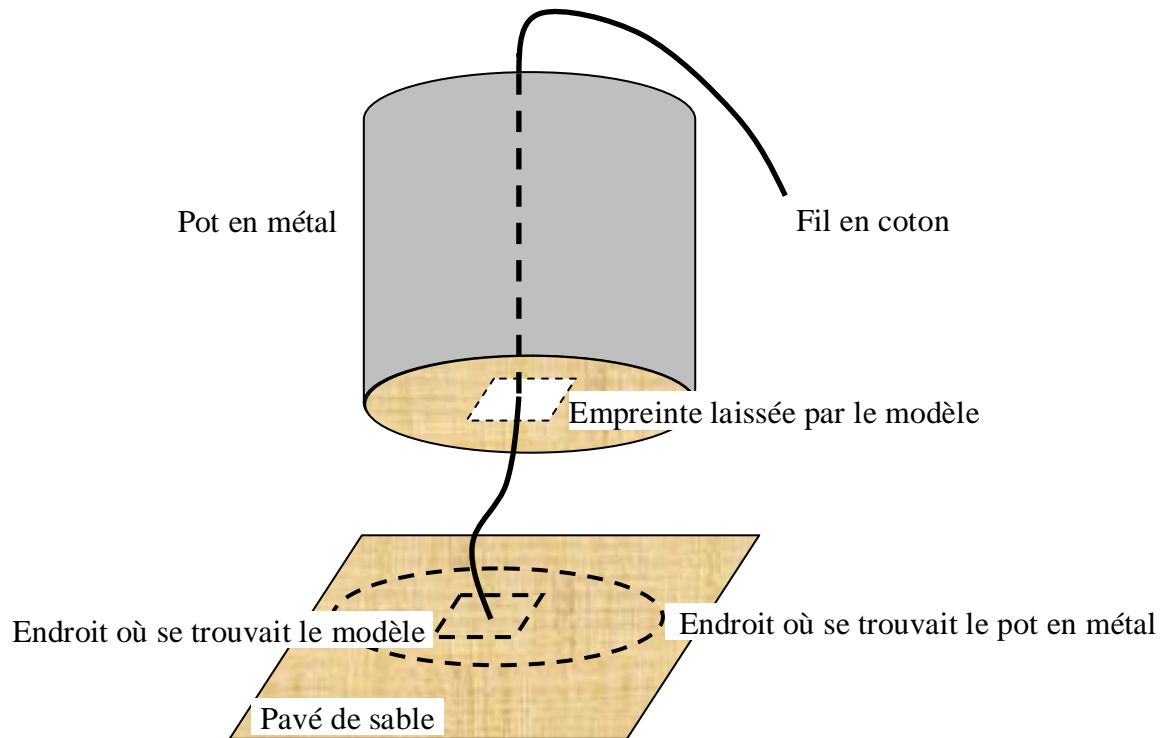
Formation du pavé de sable

4. Saupoudrer la surface avec un peu de sable sec ou de la poudre de craie.
5. Déposer ensuite le modèle au centre du carré.
6. Mettre le pot en métal sans couvercle et sans fond autour du modèle.



7. Mettre du sable mouillé autour du modèle jusqu'à remplir le pot. Tasser le sable avec vos doigts pour que le pot soit bien rempli. Ajouter du sable s'il le faut.
8. Faire un petit trou dans le sable au centre du pot jusqu'à voir le modèle.
9. Après avoir fait le trou, soulever doucement le pot en métal et le retourner un peu, vous allez voir le modèle et du sable.
10. Retirer le modèle sans abîmer le sable situé tout autour. Vous pouvez utiliser un crayon pour faire bouger un peu le modèle de gauche à droite pour qu'il soit plus facile à retirer.

11. Mettre de la poudre de craie sur les cotés de la forme laissée par le modèle dans le sable.
12. Prendre le fil en coton. Enterrer une extrémité dans le carré de sable exactement au milieu de l'endroit où se trouvait le modèle et faire passer l'autre extrémité du fil à travers le pot en métal dans le trou au milieu du sable (voir figure suivante).



13. Reposer le pot en métal à la place où il était. Faire attention à maintenir le fil en place.
14. Faire chauffer la cire avec l'aide du maître. Pour colorer, mettre un peu de poudre de craie de couleur dans la cire et remuer avec un morceau de bois. Si la cire devient dure, repartir voir le maître pour la faire chauffer à nouveau.
15. Verser la cire fondue dans le trou en tenant le fil pour qu'il ne tombe pas dans le trou. Si le trou n'est pas plein, faire fondre encore de la cire et, si vous le souhaitez, mettre une autre couleur pour avoir une bougie avec plusieurs couleurs.



16. Lorsque le trou est plein attendre 5 minutes et soulever le pot en métal
17. Enlever le sable et récupérer la bougie.

Votre bougie est maintenant prête.

Moules et modelage	
Travail de groupe	Date : 25 janvier 06 Nom : CÉY

<p>Comment fabriquer des bougies ? ils nous font :</p> <p>du sable - un gaz - une mèche - du papier - la cannette ou pot vide - la cire - l'ont dois fondre du feu - ont prend la cire & après ont prend les restes de bougies et ont et mets dans la gaz ont prend les restes de bougies ont la mets dans les pots de cannette ont prend du sable et de l'aluminium</p>

Exemple de protocole établi par un groupe d'enfants

2^{ème} SÉANCE

Temps estimé 2 heures

Synthèse

Une fois que les bougies auront été démoulées et récupérées, chaque élève expliquera comment il a fabriqué la bougie et les difficultés qu'il a rencontrées fiche 12.

Faire décrire le produit obtenu : est-il conforme aux prévisions ? Comparer le produit obtenu avec une bougie industrielle. Les élèves sont aidés en cela par la fiche 13. Essayer de leur faire trouver les raisons des différences observées.

Collectivement : le maître pourra, avec l'aide des enfants, faire une synthèse collective que les enfants pourront recopier dans leur cahier d'expériences.

Moules et modelage		Date : 25 janvier 0
Travail de groupe		Nom : CEA
Comparaison des bougies artisanales et industrielles		
Ressemblances	Différences	
toute les deux bougies sont alumer avec une alumette. par ce que la petite, bougies est fabriqué avec de la cire.	ce n'ai pas la même couleur par ce que l'autre est blanche et l'un est bleu la bougies bleu est fabriqué avec de la cire et du sable maron par ce que l'un est toute blanche et l'autre et toute bleu et petite les deux bougies non pas les même chose	

Exemple de comparaison de bougies faite par les enfants

TRUCS ET ASTUCES POUR FABRIQUER UNE BOUGIE

Dans le module, nous utilisons la technique de la fonderie au sable pour le moulage de la bougie. Voici donc quelques remarques à prendre en compte pour réaliser correctement une bougie par cette méthode.

Remarque 1 : Éviter le sable de plage et la latérite.

La technique de fonderie utilisée par les fondeurs pour la fabrication des marmites et par les élèves pour la bougie tient son nom du sable (fonderie au sable) à cause de l'importance qu'il représente pour cette technique. Pour que le sable ait de bonnes propriétés de fonderie, il doit comporter un liant (en général de l'argile). Le sable à utiliser doit donc être composé de grains de sable enrobés d'argile. Vous pouvez utiliser tous les types de sables qui comportent un peu d'argile comme les sables de dunes. Il faut éviter les sables qui ne comportent pas du tout d'argile (sable de plage) ou beaucoup d'argile.

Remarque 2 : Il faut veiller à ce que les enfants choisissent des modèles avec des dépouilles sinon ils ne pourront pas les enlever (voir compléments scientifiques).

Le modèle donne la forme et la dimension de la bougie. Mais pour cela il faut d'abord pouvoir faire une empreinte du modèle dans le sable. Un bon modèle doit présenter au moins une **dépouille** sur une position qui permette de le retirer aisément (voir compléments scientifiques).

Astuce : Vous pouvez utiliser comme modèle, un stylo, une gomme, une barre de craie ou bien tailler une forme dans un morceau de bois. Vous pouvez aussi faire faire aux enfants des maquettes de cubes, prismes, etc. avec du papier cartonné qu'ils utiliseront ensuite comme modèle. Dans ce dernier cas, il faut recouvrir la surface externe des modèles de rubans plastiques adhésifs type scotch, pour éviter qu'ils ne soient déformés par le sable mouillé.

Remarque 3 : Éviter que la cire soit fumante.

Utiliser des pots de lait coupés en deux pour chauffer la cire de chaque groupe. Elle ne doit pas être trop chauffée, il faut juste qu'elle soit liquide. Lors de l'expérimentation avec les

enfants, si votre cire est fumante, elle est beaucoup trop chaude et risque de prendre feu. Les cires de bougies commerciales au Sénégal sont faites de paraffine fouettée. De plus, les fumées de cire de paraffine peuvent causer une irritation des yeux, des voies respiratoires et des nausées chez les sujets sensibles.

Astuce : La cire peut accessoirement être colorée avec de la poudre de craie de couleur. Lorsque la cire est fondue mettre un peu de poudre de craie et remuer avec une brindille jusqu'à changement de couleur. Vous pouvez la réchauffer si nécessaire.

Remarque 4 : Toutes les bougies artisanales qui ont été préparées lors de la création de ce module se sont allumées et ont brûlé aussi bien que les bougies neuves, même dans le cas où elles étaient colorées avec de la craie de couleur.

HISTOIRE DE LA CANETTE QUI RÊVAIT DE DEVENIR UNE MARMITE

Au fond d'une poubelle, une canette se plaignait...



Ah ! Si je pouvais me
transformer en marmite...



...Je serais sûrement plus utile et on ne me jetterait
pas dans la poubelle après m'avoir utilisée ...



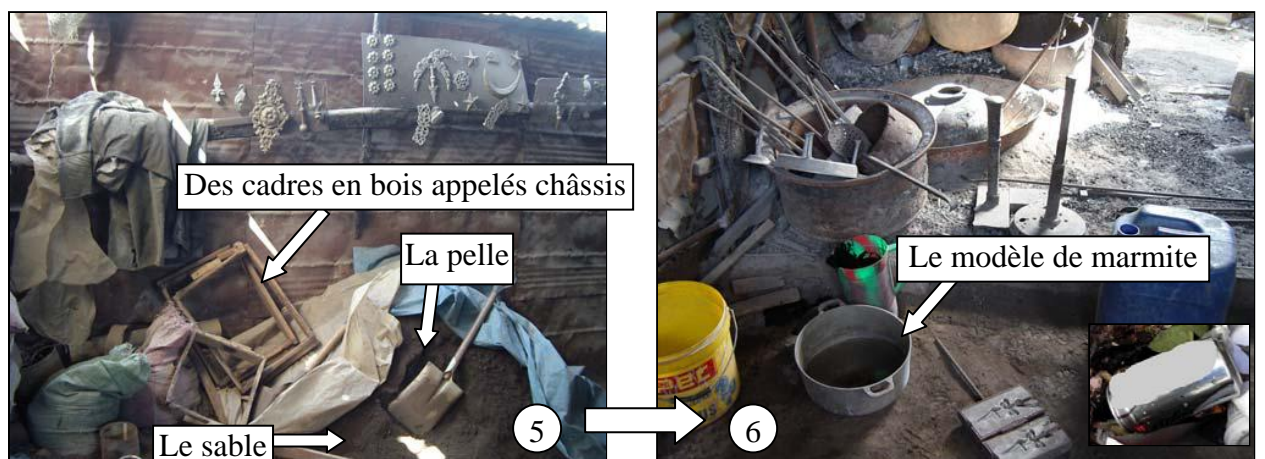
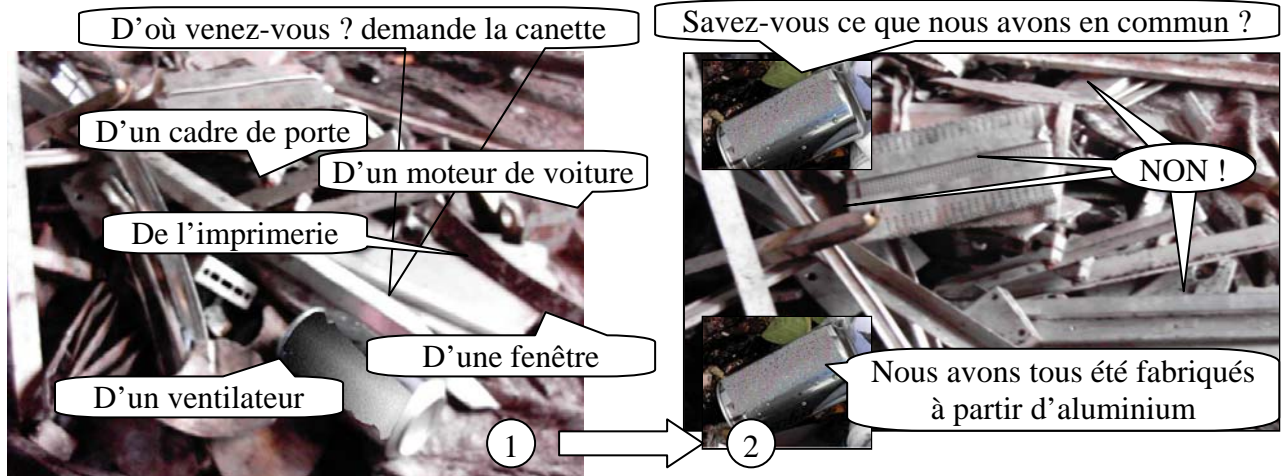
Mais savez-vous d'où viennent les marmites ?
Venez, je vais vous raconter leur histoire...

Allons voir ce qui se passe dans
cette cabane

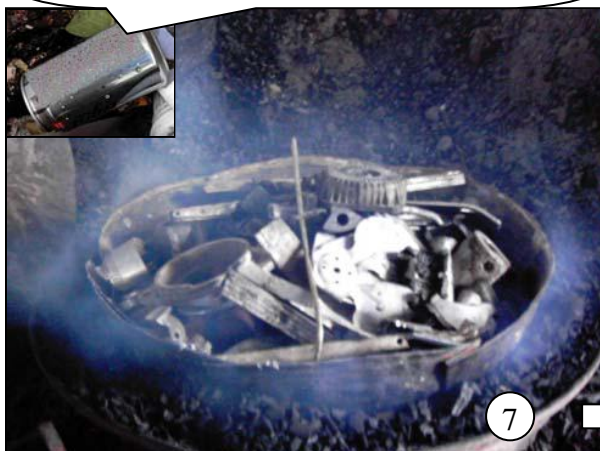


(1)

Cette cabane se trouve dans le quartier de Colobane. Nous sommes chez un artisan fondeur



Pour fabriquer des marmites, l'artisan réunit nos amis rencontrés tout à l'heure dans le creuset chauffé au charbon de bois.



Et pendant ce temps, il fabrique le moule. Pour cela, il met du sable dans le modèle et le compacte avec un bâton.



Puis il prépare un carré de sable bien plat ...



...sur lequel il retourne le modèle rempli de sable



Il met ensuite le cadre en bois autour du modèle et le remplit de sable

Il tasse le sable avec un bâton ou en sautant dessus



Ensuite, il creuse un trou dans le sable



Et fait des marques sur le châssis dont il se servira plus tard...



Il soulève le châssis et met un peu de cendre sur le tas de sable en forme de marmite qui est resté sur le sol



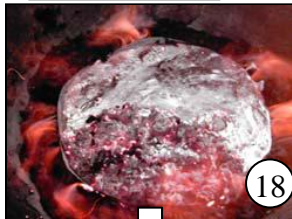
Il retourne ensuite le châssis et enlève le modèle



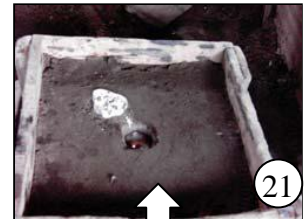
Il remet le châssis à sa place en respectant les marques qu'il avait faites. Le moule est prêt. L'espace qu'occupait la marmite est maintenant vide.



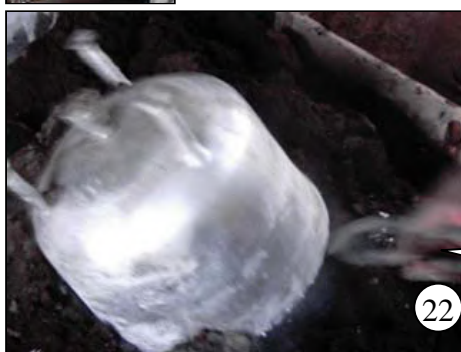
Pendant ce temps, nos amis réunis tout à l'heure dans le creuset ont fondu et se sont transformés en un liquide rouge : le métal fondu. Mais, il y a de la saleté au-dessus du liquide.



L'artisan enlève cette saleté avec une écumoire. Puis il prend du métal fondu avec une louche et remplit le moule en utilisant le trou qu'il avait fait tout à l'heure



Quelques minutes après, le liquide est devenu solide. L'artisan casse alors le moule et sort la marmite. Il utilise une pince ou une barre de fer pour éviter de se brûler car la marmite est chaude.



Barre de fer

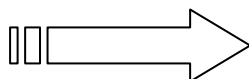




Il nettoie la marmite et l'amène au marché pour la vendre.



24



25

(2)



C'est ainsi que la canette et ses amies sont devenues une belle marmite.



400 canettes



1 kilo de charbon
de bois



2 heures
de
travail



Marmite de 5 kilos

(1) (2) Rapport final « opération pilote » artisanat de production au Sénégal ACTIF/juin 2003

Document pédagogique réalisé pour la direction de l'enseignement élémentaire du Sénégal par : Mamadou Babacar NDIAYE avec l'aide de tous les artisans fondeurs de Colobane (Youssoupha THIOMBANE, Mbaye, Lamine SAGNA ...) sous la tutelle de Bernard COQUILLET, Sandrine BEC, Renée MIDOL, Ibrahima CISSÉ et Abdoulaye MBODJ.

PRÉCISIONS SUR LE SUPPORT VISUEL : « HISTOIRE DE LA CANETTE QUI RÊVAIT DE DEVENIR UNE MARMITE »

Malgré nos efforts pour simplifier les phrases et leur contenu, il reste quelques termes de *vocabulaire* qu'il faudra expliquer aux enfants. Ce sont des mots du genre : imprimerie, aluminium, compacter, tasser, modèle, moule, châssis, etc.

Il nous paraît aussi important de préciser que les *saletés sur le liquide rouge* (photos 18 et 19) sont en réalité *des scories sur le métal en fusion*.

La *couleur rouge* (photo 18) de l'alliage contenu dans le creuset est caractéristique d'un métal en fusion, mais cette couleur peut aller jusqu'au blanc si on augmente la température. Les alliages d'aluminium fondent entre 580 °C et 660°C. Mais les fondeurs coulent en général les marmites autour de 700°C.

Les scories (photo 19) sont formées principalement d'oxyde d'aluminium et de résidus de la carbonisation de quelques produits introduits volontairement ou non dans la solution (charbon de bois, etc.)

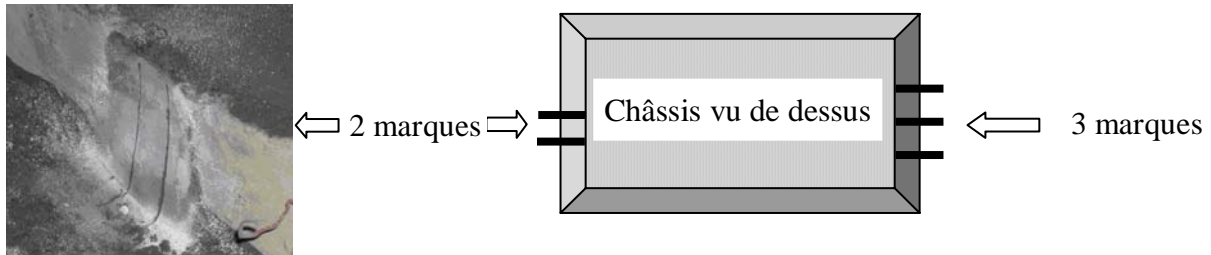
La *cendre* de charbon de bois utilisée lors du moulage par les artisans (photo 15) sert à éviter que le métal ne soit pollué par le sable lorsque le fondeur remplit le moule. Elle joue le rôle du matériel réfractaire (voir « technique de fonderie lost foam »).

Dans le document, nous avons présenté tous *les éléments qui entrent dans la fabrication de nos marmites en aluminium* (pièces de moteur, cadre de porte, etc.). Cependant il est important de savoir que les marmites artisanales du Sénégal sont faites, dans 90% des cas, avec des éléments de moteurs (culasses, pistons, carburateurs, etc.). Pourquoi ? Simplement à cause de la disponibilité des pièces de moteur usées dont la plupart sont en aluminium (culasses, pistons, carburateur, etc.). Les autres déchets d'aluminium (canettes, pièces d'imprimerie, etc.) ne sont pas aussi faciles à trouver sur le marché en quantité suffisante. La consommation de *canettes au Sénégal* s'est beaucoup développée ces dernières années. Mais il ne faut pas pour autant penser que les canettes représentent une grande quantité d'aluminium. Elles ne pèsent qu'une quinzaine de grammes l'unité⁹. Ainsi, pour

⁹ www.terra-economica.info

fondre les 6 kg d'alliage d'aluminium nécessaires à la fabrication d'une marmite de contenance 5 kg, il faut 400 canettes.

Les *marques* (photo 14) faites par le fondeur sur le châssis lui permettent de le replacer exactement au même endroit après avoir retiré le modèle. Ces marques sont au nombre de 5, réparties de part et d'autre du châssis : 2 d'un côté et 3 de l'autre.



Il n'y a *pas le même nombre de marques de part et d'autre* du châssis pour ne pas les confondre lorsqu'il faudra replacer ce dernier.

Pourquoi 2 et 3 marques et non pas 1 et 2 marques de part et d'autre du châssis, puisque avec cette dernière méthode il ne les confondra pas non plus ? Parce qu'en augmentant les points de repères, les fondeurs augmentent la précision de la détermination de la position du châssis. Ils peuvent ainsi le remettre au même endroit avec une marge d'erreur plus faible.

Pourquoi les marmites n'ont-elles que trois pieds ?

Le scientifique répondrait que le minimum de points pour déterminer un plan est 3. Autrement dit le minimum de points d'appui pour que la marmite soit stable est de trois. Ayant remarqué cela, les artisans ne voient pas l'intérêt de faire plus de pieds d'appui qu'il ne faut, il gaspillerait de l'aluminium pour rien.

Cependant une *légende* dit que ces pieds sont une matérialisation des trois touffes de cheveux qui ornaient la tête de notre grand penseur et philosophe **Kocc Barma FALL** qui a vécu au KAJOOR (royaume wolof du Sénégal) au XVIIe siècle. Il est l'auteur de plusieurs aphorismes très connus des sénégalais.

Fiche 11 – Comment fabriquer la bougie ? <i>Travail individuel</i>	Date : _____ Nom : _____
<p>Quel matériel te faut-il pour fabriquer la bougie ?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Comment vas-tu fabriquer la bougie ? Décris les différentes étapes que tu imagines</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Décris comment sera, à ton avis, la bougie que tu vas fabriquer. Va-t-elle s'allumer ? Si elle s'allume, comment sera la flamme ? Va-t-elle brûler plus vite que la bougie du boutiquier ?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	

Fiche 12 – Comment j’ai fabriqué la bougie <i>Travail individuel</i>	Date : _____ Nom : _____
<p>Raconte comment tu as fabriqué la bougie et les problèmes que tu as rencontrés. Tu peux ajouter un dessin qui explique ce que tu as fait.</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Dessine la bougie que tu as fabriquée</p>	

Fiche 13 – Comment est la bougie que nous avons fabriquée <i>Travail en groupe</i>	Date : _____
<p>Décrivez la bougie obtenue (couleur, forme, surface lisse ou non...). S'allume-t-elle ?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	
<p>Comparez-la avec une bougie achetée dans une boutique (bougie industrielle) : couleur, solidité, lumière, flamme, ...</p>	
<p>Ressemblances</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	<p>Différences, pourquoi</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>

SÉQUENCE 6 : CRÉONS AVEC DES DÉCHETS

Temps estimé 2 heures

Résumé

Il est demandé aux enfants de produire une œuvre artistique sur la base d'un thème commun défini pour toute la classe. Le travail, qui peut se faire hors de la classe, sera suivi d'une séance de synthèse et d'une exposition des œuvres dans l'école.

Objectif

Mobiliser l'imagination des élèves et leur habileté manuelle. Ouvrir leur regard sur une dimension contemporaine de l'art.

Présentation du travail

Le maître peut présenter le travail à faire en ces termes : « Vous allez créer un objet avec des matériaux récupérés, puis nous ferons une exposition dans l'école. Nous allons choisir un thème commun et je vous donnerai des consignes précises pour la réalisation ».

Exemple de thèmes qui peuvent être proposés : les animaux, le corps en mouvement...

Consignes : « Votre œuvre doit utiliser au moins trois matériaux de familles différentes (rappel du travail antérieur : tri en familles), la taille maximum est 30 cm, elle doit tenir debout, éventuellement fixée sur un socle ».

Le thème peut être plus ou moins difficile en fonction du niveau. Pour les plus jeunes (CE2), créer avec trois matériaux de récupération de familles différentes est déjà une difficulté en soi.

Matériel

- Petit matériel si la création se fait en classe.
- Fiche 14 pour la synthèse pour chaque élève. S'il n'y a pas de possibilité de disposer d'assez de feuilles pour toute la classe, relever les questions de la fiche 14 et faire répondre les élèves dans leur cahier d'expériences.

Déroulement

Introduire le travail en se référant à toute la culture créatrice et artistique du Sénégal dans ce domaine : (ex : recyclage des boîtes de conserve en jouets ou objets divers d'artistes Sénégalais de la récupération, peintres, sculpteurs, etc.). Pour cela, il serait intéressant de montrer des photos ou articles de journaux témoignant de cette activité¹⁰. Plusieurs sites internet peuvent être consultés pour la base documentaire.

www.taftaf.com (boutique/recycleurs),

www.salysenegal.net/senegalais/objets.html (menu déroulant...en bas)

www.enda.sn/ecopole (ingénieuse Afrique) etc.



Exemples d'objets décoratifs réalisés avec des objets recyclés

Le travail peut s'envisager de deux manières :

Première possibilité :

Le maître donne les consignes, fixe un délai (8 à 10 jours) et les élèves sont autonomes pour effectuer leur recherche de matériaux récupérés et pour réaliser leur projet. Le travail se fait en dehors du temps scolaire. Il est rendu à la date fixée, pour faire l'exposition dans l'école.

Deuxième possibilité : Temps estimé : 2h

Le maître donne les consignes, les élèves disposent de quelques jours pour penser leur projet, récupérer les matériaux nécessaires et les apporter à l'école à la date fixée. La réalisation proprement dite se fait en classe. On mettra à disposition : colle, scotch, ficelle, fil de fer et autres accessoires utiles pour le montage, ciseaux, pince, etc.

¹⁰ www.taftaf.com/boutique/recycleurs

Dans les deux cas prévoir une séance de synthèse.

Synthèse

Les élèves font un croquis de l'objet qu'ils ont créé. Prendre la peine d'expliquer aux enfants que ce croquis peut être annoté. Chacun raconte comment il a fabriqué son objet et relève les difficultés qu'il a rencontrées.

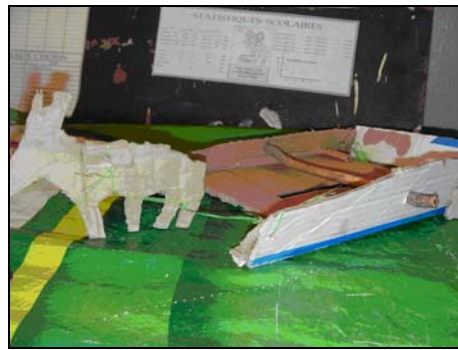
L'exposition

Chercher un titre avec les élèves : « Déchets d'œuvres », « l'Art des Déchets », « Récup'Art »... Déterminer le lieu, inviter les autres classes à visiter l'exposition.

Avec les élèves de la classe, on procédera à une observation fine des œuvres réalisées : choix des matériaux, techniques d'assemblages, effets obtenus ...

Si cela est possible, une rencontre sera organisée avec un créateur local.

Pour les écoles de Dakar, il pourrait être très intéressant d'aller visiter l'exposition itinérante « ingénieuse Afrique » consacrée à l'art de la récupération et du recyclage, au musée d'ÉCOPOLE », une structure de l'ONG ENDA, dans le quartier Xadim Rasul.



Exemple de création d'enfants (poupée de chiffon et charrette)

SÉQUENCE 7 : ÉVALUATION FINALE

Temps estimé 2 heures

Résumé

A travers une série de questions, nous allons évaluer ce que les enfants ont appris de ce module, puis nous essayerons de dégager une position commune de la classe face aux problèmes de l'environnement.

Objectif

Cette séquence met fin au module. Elle permet de résumer ce que nous avons appris et aide les enfants à adopter une posture active pour la défense de l'environnement.

Matériel

Fiche 15 pour chaque élève. A défaut d'avoir assez de fiches, faire recopier aux élèves la fiche dans le cahier d'expériences.

Déroulement

Le maître informe les élèves de la fin du module sur lequel ils ont travaillé ces dernières semaines. Afin de vérifier ce que les enfants ont retenu de ce module, il va les laisser répondre d'abord individuellement aux questions de la fiche 15. Ensuite, dans un dernier travail collectif, les réponses seront rassemblées et discutées afin de déterminer une position commune de la classe face aux problèmes d'environnement (fiche 16).

Fiche 15

La première question « Quelles sont les différentes familles de déchets que tu connais ? » permet de vérifier si l'enfant se souvient du tri et de la classification faite en début de module. L'important n'est pas qu'il retienne les noms des familles, mais qu'il se souvienne qu'il faut des critères pour faire un tri. Si les critères utilisés lui reviennent en mémoire, il trouvera ses propres mots pour nommer les différentes familles.

La deuxième question « Que deviennent les déchets qui ont été ramassés ? » sert à rappeler que tous les déchets ne disparaissent pas (comme certains ont pu le répondre lors de la séance introductive), et à faire prendre conscience qu'il faut faire quelque chose.

La troisième question « Que peut-on faire avec les déchets ? » est à la suite de la précédente. Elle permet de rappeler toutes les choses que l'on peut faire avec les déchets, d'ailleurs chaque enfant, avec sa propre imagination, est arrivé à réaliser quelque chose avec les déchets (séquence 6).

La quatrième question « Comment peux-tu utiliser le produit que tu as fabriqué avec les déchets ? » est formulée ainsi pour lui rappeler qu'il ne s'agit pas seulement de créer avec les déchets, encore faut-il créer des choses qui soient utiles et utilisables. La bougie a une forme non conventionnelle mais c'est une vraie bougie, elle peut servir en cas de coupure de courant. Le papier n'est certes pas aussi solide que le papier industriel, mais on peut écrire dessus. Les objets que les enfants ont créés, en général des jouets (poupées) ou des objets décoratifs (oiseaux), sont utiles. Relever qu'on peut faire des choses utiles et fonctionnelles avec les déchets.

La cinquième question « Que se passe-t-il si les déchets sont jetés dans la rue et ne sont pas ramassés ? » doit aider à comprendre que les déchets vont s'accumuler dans les rues et peuvent causer des maladies.

Fiche 16

La première question « Que faut-il faire pour que notre école et nos rues soient plus propres ? » doit aider à relever le fait que ce sont les gens qui jettent par terre qui rendent sales les rues ou la cour de l'école. Si ces déchets ne sont pas ramassés, nous retournons aux conclusions de la question précédente. Le maître peut, avec l'accord des élèves instituer une attitude de la classe vis à vis de la saleté (prix de la rangée la plus propre, etc.).

La deuxième question « Que peut-on dire à quelqu'un pour lui apprendre quelque chose sur les déchets ? » se veut ouverte pour permettre à chaque élève de s'exprimer librement en fonction de son niveau de compréhension du module. Il s'agit de retenir les idées les plus pertinentes exprimées par les enfants pour diffuser leurs acquis ou pour alerter leur entourage sur les problèmes d'environnement posés par une mauvaise prise en charge des déchets.

Fiche 15 – Ce que j’ai appris sur les déchets : Évaluation <i>Travail individuel</i>	Date : _____ Nom : _____
<p>Quelles sont les différentes familles de déchets que tu connais ?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Que deviennent les déchets qui ne sont pas ramassés ?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Que peut-on faire avec les déchets (par exemple la cire, le papier, d’autres déchets...) ?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Comment peux-tu utiliser le produit que tu as fabriqué avec des déchets ?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Que se passe-t-il si les déchets sont jetés dans les rues et ne sont pas ramassés ?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	

Fiche 16 – Conclusions <i>Travail collectif</i>	Date : _____ Nom : _____
<p>Que faut-il faire pour que notre école et nos rues soient plus propres ?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Que pouvons nous dire à quelqu'un pour lui apprendre quelque chose sur les déchets ? (qu'est ce qu'un déchet ? que peut-on faire avec les déchets ? que deviennent les déchets ?)</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	

COMPLÉMENTS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

LE RECYCLAGE – DEFINITIONS

L'habitude est de désigner par « recyclage » toute opération visant à réintroduire des déchets dans un circuit de transformation. Toutefois, la grande diversité des situations de recyclage fait qu'un vocabulaire adapté a vu le jour.

Le « recyclage », selon l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME, France), est la réintroduction directe d'un déchet dans le cycle de production dont il est issu, en remplacement total ou partiel d'une matière neuve.

La « valorisation », apparue pour la première fois dans les textes en 1989¹¹, est définie par la loi française du 13 juillet 1992 comme le réemploi, le recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir de déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie¹².

La « valorisation énergétique » est l'exploitation du gisement énergétique que contiennent les déchets.

Ces définitions nous permettent de conclure que la valorisation englobe ainsi plusieurs opérations, dont le recyclage, qui visent à donner de la valeur à un déchet.

Sur un plan technologique, on distingue deux situations de recyclage :

- dans la première, on réintroduit le déchet dans la chaîne de transformation pour donner un produit identique, c'est le recyclage en « boucle fermée » ;
- dans la seconde, la transformation conduit à la fabrication de produits différents, on parle alors de recyclage en « boucle ouverte ».

Les anglo-saxons qualifient les opérations de recyclage en intégrant la notion de valeur ou de fonctionnalité du produit élaboré par rapport à celle de l'objet initial. Par « recycling », ils désignent le procédé par lequel le déchet est transformé en un produit de même valeur. Le « downcycling » (décyclage, ou dévalorisation) est le mode de traitement suivant lequel le déchet est transformé en un produit de moindre valeur (transformation des moquettes en résine par exemple) et le « upcycling », le mode de traitement qui confère au produit une valeur supérieure au déchet (par exemple transformation des bouteilles d'eau minérale en tissu).

Ainsi, la réintroduction des objets arrivés en fin de vie dans un nouveau circuit de production et de distribution peut être envisagée sous différents aspects.

¹¹ Communication de la commission européenne au conseil et au parlement européen du 18 septembre 1989 sur la stratégie communautaire en matière de gestion des déchets.

¹² Loi n°92-646 du 13 juillet 1992, titre premier, Article 1, (I-3°).

LA FONDERIE

La technique utilisée pour la fabrication des marmites artisanales (« histoire de la petite canette qui rêvait de devenir une marmite ») est la fonderie. Au cours du module, elle est utilisée par les enfants pour mouler des bougies à partir de la cire de récupération. Nous présentons dans ce qui suit quelques informations historiques et techniques qui permettent une meilleure compréhension de ce mode de fabrication.

1. Histoire de la fonderie ¹³

Il y a environ 250 000 ans, l'homme fit la découverte du feu. Il s'agissait d'un pas significatif dans le développement de l'humanité. Presque simultanément, l'homme découvrit l'utilité du silex dans la fabrication d'outils.

Il est généralement admis par le monde scientifique que l'or fut le premier métal à obtenir l'attention de l'homme. Ce qui était en soi naturel puisque l'homme a toujours été attiré par ce qui brillait. L'homme primitif était habitué à travailler avec du silex. Il fut déçu de ne pas trouver dans l'or toutes les caractéristiques qu'il retrouvait dans le silex. Dans l'esprit de l'homme primitif, l'or devenait inutilisable. Dès lors, on ne se servait de ce métal que pour fabriquer les ornements et les parures. L'or n'a été fondu qu'après la découverte du cuivre.

La légende veut qu'un aborigène entoura son feu de pierres contenant du minerai de cuivre. À son réveil, il remarqua quelque chose qui brillait à travers les cendres. Il s'agissait en fait du métal (cuivre) fondu durant la nuit. On estime que cette découverte fut faite il y a environ 4500 ans avant Jésus-Christ. Dès lors, la fonderie était née.

Au fil des années, l'homme découvrit qu'il pouvait donner une forme au métal fondu en le déposant dans des moules ouverts et destructibles faits en sable et même dans des moules "permanents" en pierre. C'est le développement de ces connaissances qui a conduit à la naissance de toutes les techniques de fonderie connues aujourd'hui.

2. Principe général de la fonderie ¹⁴

La fonderie permet la réalisation de pièces mécaniques ou décoratives par remplissage d'une empreinte avec un alliage (généralement métallique) en fusion. Pour réaliser un objet par fonderie, il faut :

1. Élaborer un alliage métallique : fusion + ajout d'éléments (pour les éléments à ajouter, voir « Propriétés des alliages d'aluminium de fonderie » page 79 de ce document).
2. Concevoir et fabriquer un moule (voir « Les différentes techniques de fonderie » page 75).
3. Couler l'alliage dans le moule. Après solidification, sortir le produit obtenu et enlever toutes les appendices de coulée (carotte de coulée, etc.), voir définitions ci-après.
4. Contrôler, pendant toute la phase d'élaboration du produit, l'alliage (composition température, etc.), le moule (matériaux, assemblages, etc.) et la qualité du produit final.
5. Traiter les produits finis : suivant la technique de moulage employée et les caractéristiques du produit à obtenir, la pièce moulée peut subir des traitements le plus souvent thermiques (traitements où on fait varier la température de la pièce et le temps où il garde cette température) dans le but d'améliorer ses propriétés.

¹³ www.cfdm.qc.ca/historique

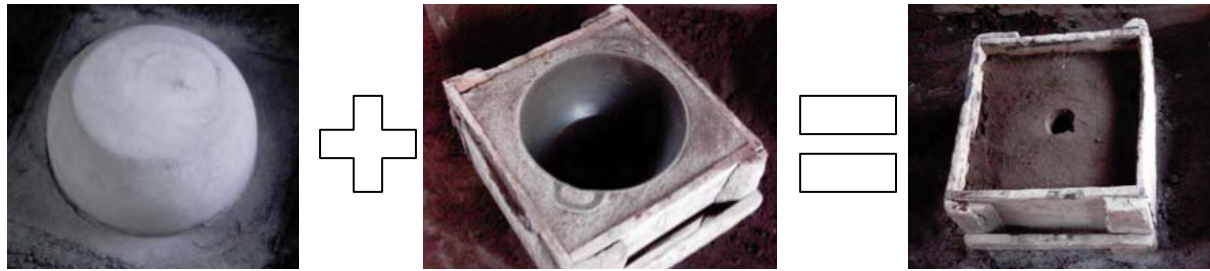
¹⁴ G. FACY, M. POMPIDOU, *Précis de fonderie, méthodologie, production et normalisation*, AFNOR (1983)

3. Définitions de quelques termes techniques de la fonderie

La fonderie : Le terme lui-même fait penser au verbe fondre. La fonderie est l'ensemble des opérations destinées à fabriquer un objet à parti d'un matériau liquide versé dans un moule.

Le moule : Il s'agit de l'ensemble du dispositif dans lequel le matériau liquide est coulé. Il comporte l'empreinte de l'objet à réaliser ainsi que le système d'attaque, c'est-à-dire le canal par lequel le matériau liquide est acheminé depuis le trou de coulée jusqu'à l'empreinte.

En reprenant l'exemple de la marmite :



Empreinte intérieure

Empreinte extérieure

Moule

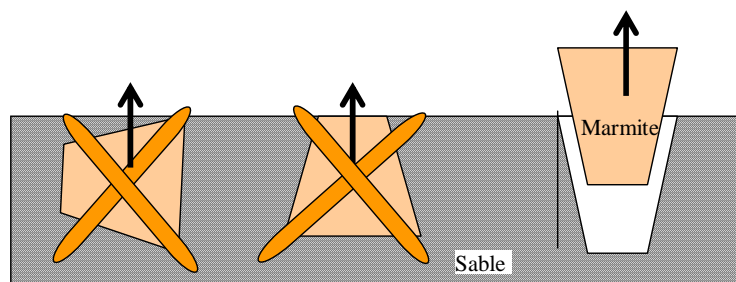
Si le moule est détruit après solidification du métal pour extraire la pièce fabriquée, on parle de **moule non-permanent**. C'est le cas des moules faits avec du sable par les artisans qui fabriquent les marmites.

Si le moule sert plusieurs fois, on parle de **moule permanent**. Il est réalisé en métal et cette technique permet de reproduire un grand nombre d'exemplaires de la pièce à dupliquer sans avoir à construire un nouveau moule. La fabrication d'un moule permanent a un coût et n'est rentable qu'à partir de 1000 exemplaires. Mais ce moule a un inconvénient car il ne permet de produire qu'un seul et même objet contrairement au moule en sable. Son coût plus élevé et son manque de polyvalence font qu'il n'est pas utilisé par les artisans fondeurs sénégalais.

L'empreinte : C'est la cavité dans laquelle est coulé le matériau en fusion pour donner, après solidification, la pièce à fabriquer. La forme et les dimensions de l'empreinte sont données par le modèle.

Le modèle : Il s'agit de l'objet que l'on désire reproduire. Il peut être fabriqué (en bois par exemple) pour les objets moulés la première fois ou être une copie de la pièce à dupliquer (comme dans le cas des marmites). Sa forme et l'état de surface que l'on désire obtenir (sur le produit fini) détermineront la technique à utiliser pour faire le moule (voir techniques de fonderie page 75). Puisqu'en général le modèle doit être retiré du moule avant le remplissage, il faut veiller, en faisant le moule, à ce que le modèle présente une **dépouille** dans la position où nous désirons le retirer.

La dépouille : Si le schéma ci-après représente une marmite, il n'y a qu'une seule position où il est possible de la retirer en laissant son empreinte intacte dans le sable. On dit qu'elle présente une dépouille dans cette position.



Contre dépouille : pièce indémoulable

Dépouille

Le châssis : Il s'agit généralement d'un cadre en bois ou en métal destiné à contenir le sable de fonderie pour que ce dernier soit compacté et puisse épouser ainsi les formes du modèle. Il doit être rigide et solide. Pour les élèves, le pot en métal a servi de châssis.

Le trou de coulée : Il s'agit d'un trou qui est fait au-dessus du moule pour permettre l'introduction de l'alliage liquide (voir la dernière photo de la définition du moule). Sa taille varie en fonction de celle du modèle. Le trou doit être assez large pour permettre au matériau fondu de remplir la totalité du moule avant de se solidifier. Il doit aussi avoir une bonne hauteur pour compenser la contraction du métal au moment de la solidification.

La fusion : Cette opération consiste à faire fondre le matériau dont sera fait le produit pour atteindre la température de coulée.

La température de coulée : C'est la température idéale à laquelle le métal liquide doit être porté pour faire le meilleur moulage possible. Si la température est trop basse, le métal se solidifiera avant d'avoir rempli entièrement le moule conduisant à des « manques » (des parties de moule non remplies). Si en revanche la coulée a lieu à une température trop élevée, le métal peut perdre ses propriétés et conduire à une mauvaise formation de la pièce. De plus, l'artisan aura utilisé plus de charbon de bois qu'il n'en faut et perd ainsi de l'énergie et de l'argent.

La coulée : C'est l'opération qui consiste à remplir le moule avec le métal en fusion. Ce dernier se solidifie au bout de quelques minutes. Les artisans fondeurs sénégalais utilisent la coulée par chute où le matériau liquide remplit le moule sous l'effet de son propre poids.

Le décochage : C'est l'opération au cours de laquelle le moule est détruit (moule non-permanent) afin de récupérer la pièce fabriquée après solidification du métal en fusion.

La carotte de coulée : Après solidification et décochage, la pièce fabriquée présente une partie proéminente ayant la forme du trou de coulée : c'est la carotte de coulée. Cette partie est généralement sciée.

Les finitions : Nous avons vu qu'il a fallu créer une entrée pour le matériau liquide (le trou de coulée). Cette partie solidifiée (la carotte de coulée) qui se rattache au produit n'en fait pas partie. Le but de la fonderie étant de produire à l'identique un objet, les finitions regroupent donc l'ensemble des opérations qui seront menées (polissages, découpage de la carotte de coulée etc.) afin que le produit final soit identique à l'objet de départ (identique en forme, dimensions et aspect de surface).

4. Différentes techniques de fonderie et matériaux utilisés

Suivant la forme du modèle, le nombre de copies ou l'aspect final du produit, différentes techniques de fonderie peuvent être utilisées :

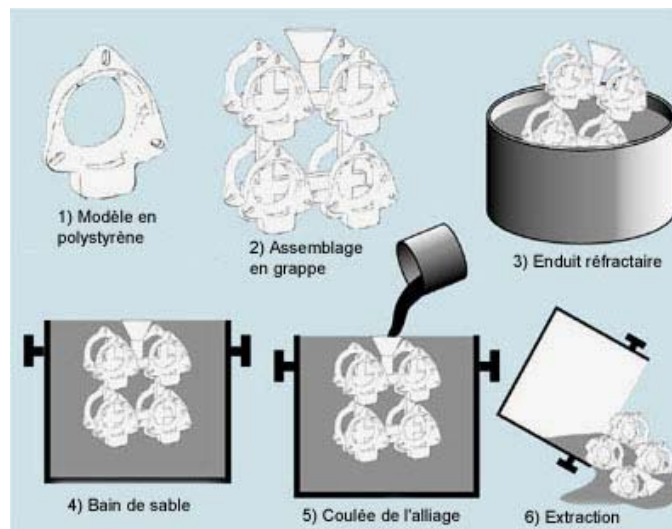
Fonderie au sable : Le moule est réalisé en sable. Le sable peut être naturel ou synthétique. L'essentiel est qu'il comporte un liant. Dans le sable naturel, le liant est généralement l'argile (auquel on ajoute un peu d'eau) et dans le sable synthétique, il est constitué d'additifs chimiques, c'est pourquoi ce sable est aussi connu sous le nom de « sable lié chimiquement ». La précision des pièces obtenues suivant cette technique varie de moyenne à bonne. Sa productivité (nombre de pièces moulées par unité de temps) n'est pas très bonne mais ses principaux avantages restent la polyvalence du moulage (elle permet la fabrication de pièces de formes et de dimensions très variées l'une après l'autre), le taux de récupération du sable est très élevé et le coût est faible.

La fonderie au plâtre : Les moules sont fabriqués en plâtre. Cette technique permet d'obtenir des pièces complexes et minces avec une très bonne précision dimensionnelle (meilleure que le sable). Malheureusement, le plâtre ne pourra pas être réutilisé.

La fonderie en moule métallique : le moule est fait avec du métal. La coulée peut se faire par gravité (comme le sable ou le plâtre) ou sous pression. La coulée par chute est rapide et donne un produit avec un très beau fini de surface et une bonne précision dimensionnelle. La coulée sous pression (le métal est injecté avec une certaine pression dans le moule) est aussi très rapide et permet de réaliser des pièces plus complexes et plus minces, avec en plus, une très bonne précision dimensionnelle.

La fonderie à la cire perdue : Pour fabriquer le moule, il faut d'abord réaliser un modèle en cire qui sera recouvert par la suite d'un enduit de céramique. En cuisant la céramique pour la faire durcir, la cire fond sous l'effet de la chaleur, faisant ainsi apparaître l'empreinte de la pièce à réaliser. Il ne reste plus qu'à couler le métal dans le moule en céramique. Le moule est à usage unique et la technique n'est, certes pas très rapide, cependant sa précision est excellente et la cire est récupérable.

La fonderie à la mousse perdue : Encore connue sous le nom de « lost foam », cette technique est très voisine de la précédente. Le modèle n'est plus en cire mais en mousse de polystyrène expansé (emballage blanc des matériels électroniques neufs, images 1 et 2). Il est enduit d'un produit réfractaire (image 3) puis est placé dans un bac dans lequel on vient tasser du sable (image 4). Ce produit réfractaire permettra au métal liquide de ne pas se mélanger avec le sable lors de la coulée. La coulée du métal liquide dans le moule sublime le modèle (sublimation = transformation d'un solide en gaz) permettant ainsi le remplissage du moule (image 5). Le produit est récupéré après sa solidification. La méthode est rapide et sa précision est excellente.



Fonderie à la mousse perdue¹⁵

5. Principe du moulage au sable

Après avoir choisi ou fabriqué le modèle (1), le fondeur prend son empreinte intérieure en compactant du sable (2). Le modèle avec le sable est ensuite retourné sur un lit de sable plan (pavé de sable) que le fondeur a préalablement confectionné et qui constitue le plan de joint du moule (3).

¹⁵ www.forum-peugeot.com/lost-foam

Un châssis de dimensions convenables est placé autour de cet ensemble de manière aussi centrée que possible. Il est ensuite rempli de sable que le fondeur tasse pour avoir l’empreinte extérieure du modèle (4).

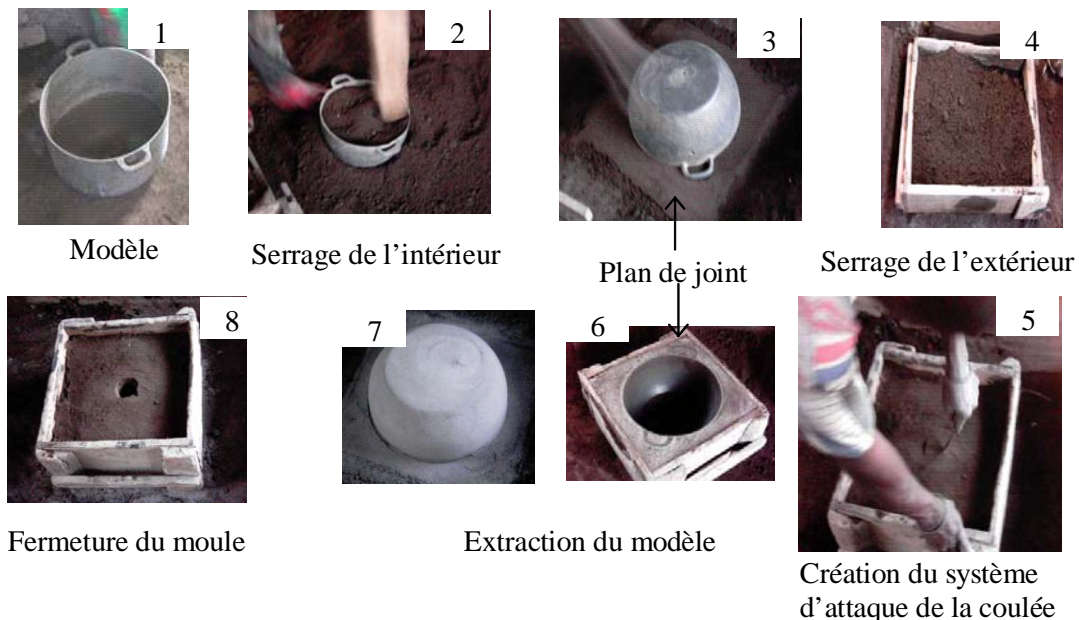
A l’aide d’une spatule, l’artisan réalise une cheminée circulaire débouchant au fond de la marmite servant de modèle (5). C’est le système d’attaque, ou trou de coulée par où le métal en fusion sera introduit pour remplir le moule. Suivant la terminologie consacrée en fonderie, cette méthode d’alimentation du moule est appelée « coulée en chute ». Le diamètre de cet orifice est calibré de telle sorte que le métal en fusion remplisse le moule le plus rapidement possible avant de se solidifier. Par exemple pour une marmite de 1kg de contenance respectivement 30 kg, le diamètre du système d’attaque est d’environ 25 mm, respectivement 40 mm.

Le modèle est ensuite retiré du châssis en évitant d’endommager le moule. Pour ce faire l’artisan fait quelques repères de positionnement sur le châssis avant de le soulever. Ce dernier retient prisonnier le modèle et laisse sur place l’empreinte intérieure du modèle (6).

Les empreintes intérieure et extérieure du modèle sont saupoudrées de cendre de charbon de bois tamisée destinée à améliorer l’état de surface de la marmite fabriquée (7). C’est aussi un moyen simple d’éviter « l’abreuvement » du moule c’est-à-dire la pénétration du métal liquide entre les grains de sable du moule dans la zone de contact proche de la surface.

Vient ensuite la reconstitution de moule, une opération délicate dont la réussite conditionne la qualité de l’objet réalisé (8). Dans cette opération, il faut replacer la partie supérieure du moule (le châssis avec le sable) exactement à la place qu’il occupait lors de la réalisation de l’empreinte extérieure du modèle en s’aidant des marques préalablement faites sur le châssis. Un mauvais positionnement du châssis va décentrer l’empreinte intérieure par rapport à l’empreinte extérieure, amenant un défaut sur l’épaisseur de la paroi de la marmite.

Après cette opération, le moule est maintenant prêt à recevoir le métal liquide ou la cire fondue dans le cas des élèves.



6. Propriétés du sable de fonderie¹⁶

Un sable de fonderie doit satisfaire deux exigences fondamentales :

La plasticité : C'est l'aptitude à la mise en forme du sable au contact du modèle afin d'épouser tous les détails de sa forme. Pour arriver à ce résultat, le sable est serré soit par simple gravité, soit par un effort mécanique (pression, secousse, vibration, projection mécanique, etc.).

La cohésion : C'est la conservation de cette forme (acquise précédemment) jusqu'à la solidification complète du métal coulé. Cela sous-entend des caractéristiques mécaniques du sable suffisantes pour résister à la pression statique du métal liquide (pression exercée par le poids du métal qui n'est plus en mouvement) ainsi qu'à la pression dynamique (pression exercée par le métal sur les parois lors du mouvement de remplissage du moule) afin d'éviter les phénomènes d'érosion et d'entraînement du sable.

D'autres propriétés sont aussi demandées au sable de moulage. Ce dernier doit être :

Réfractaire : Le sable ne doit pas changer d'état physique (solide vers liquide ou gaz) au contact du métal liquide. Pour cela, il doit présenter une température de fusion très supérieure à celle de l'alliage considéré.

Perméable : Il faut que le sable permette l'évacuation des gaz contenus dans l'empreinte du moule ou générés pendant la coulée.

Inerte chimiquement : Il ne faut pas qu'il y ait de réaction chimique entre le moule et le métal car si le métal est susceptible de réagir avec le moule, cela entraînera des défauts sur le produit.

De décochage facile : afin de pouvoir séparer facilement les pièces moulées de leur moule.

7. Propriétés des alliages de fonderie

Les principales qualités recherchées pour les alliages de fonderie sont principalement :

- la **coulabilité** (aptitude du métal liquide à bien remplir le moule) ;
- une **basse température de fusion**, (pour diminuer le coût de la fusion) ;
- l'**absence de formation de criques** (fissurations causées par le retrait du métal au cours de son refroidissement) ;
- **à défaut de son absence, une bonne répartition de la porosité** (trous) due au retrait qui accompagne la solidification ou au dégazage du métal liquide en cours de solidification.

Les alliages d'aluminium destinés à la fonderie contiennent des éléments tels que le silicium, le cuivre, le magnésium, etc., qui améliorent leurs propriétés de fonderie et d'usage.

Au Sénégal, les artisans utilisent des déchets d'alliage d'aluminium (pièces de moteurs d'automobiles hors d'usage, emballages, matériaux du génie civil, etc.) dans lesquels se trouvent déjà une partie ou tous les éléments d'alliage (cuivre, silicium, etc.) Cependant, suivant leur origine et leur utilisation, ces alliages n'ont pas les mêmes compositions (ne contiennent pas tous les mêmes éléments en quantité identique). Pour cette raison, les fondeurs sont amenés à faire des mélanges pour élaborer des alliages ayant de bonnes propriétés pour la fonderie.

¹⁶ www.wikipedia.org/wiki/fonderie

8. Intérêt des alliages d'aluminium pour la fonderie artisanale

La fonderie pratiquée au Sénégal a un caractère artisanal. Cette activité se caractérise par l'utilisation d'une technologie rudimentaire liée au manque de moyens des artisans. Celle-ci est tout à fait compatible avec l'utilisation des alliages d'aluminium pour les raisons suivantes :

Les alliages d'aluminium ont une température de fusion basse (entre 580°C et 660°C selon les alliages) et peuvent être fondus avec du charbon de bois dont le pouvoir calorifique est faible comparé à d'autres sources d'énergie telles que les hydrocarbures.

Le prix du charbon de bois n'est pas très élevé et sa combustion ne nécessite pas l'utilisation d'appareils compliqués et coûteux (contrairement au gaz ou à l'électricité par exemple).

Leur disponibilité : il est facile de se procurer des déchets d'alliages d'aluminium au Sénégal tant les objets à base d'aluminium sont nombreux et variés.

Les déchets d'alliages d'aluminium ont un prix d'achat à la portée des ressources des artisans entre 300F CFA, (45 centimes d'euro) et 500 F CFA (75 centimes d'euro le kilo)

Les alliages d'aluminium récupérés par les artisans sont généralement déjà traités pour la fonderie. Il n'y a donc aucun traitement supplémentaire à faire. De plus, ils peuvent être mélangés entre eux.

Les domaines d'application de l'aluminium sont nombreux. Ainsi les possibilités de fabrication des artisans sont nombreuses et variées, permettant une diversification de leur production (ustensiles culinaires, accessoires décoratifs, pièces de moteur...).

Le prix de vente des produits peut-être quelque fois assez substantiel (pièces de rechange de moteur par exemple).

LA BOUGIE

1. Histoire de la bougie¹⁷

Durant des siècles, le jonc (une plante herbacée) a été utilisé pour faire des chandelles. Fendu avec précaution pour ne pas en abîmer la moelle, il était trempé dans de la graisse végétale ou animale qu'on laissait ensuite durcir. On le faisait brûler dans des brûle-joncs.

En Europe, au moyen âge, la chandelle devient une mèche entourée de suif (de bœuf ou de mouton) ou de cire d'abeille. Le suif (produit résiduel résultant de la fonte de graisses animales) était réservé aux pauvres tandis que le clergé et la noblesse se réservaient la cire d'abeille plus chère. Le mot **bougie** n'est apparu dans la langue française qu'au XIV^e siècle, tiré de **Bugaya**, une ville d'Algérie qui fournissait une grande quantité de cire d'abeille pour la fabrication des chandelles. La bougie fut développée au milieu du XIX^e siècle. Elle est formée d'un bloc de **cire** (différente de la cire des chandelles) dont le centre est traversé par une **mèche** en coton (ou une autre matière fibreuse).

2. La cire

La cire de la bougie moderne est composée d'un mélange variable de deux produits chimiques : paraffine et stéarine. La paraffine est issue de la distillation du pétrole et la stéarine est un extrait de graisse animale ou végétale. Les bougies sont composées en grande majorité de 90% de paraffine additionnée de 10% de stéarine. Par l'addition de stéarine, la bougie accuse un retrait lorsqu'elle se solidifie, brûle plus longtemps et ne coule pas. Cependant, les bougies bon marché du commerce sont faites uniquement de paraffine fouettée, elles coulent et brûlent très vite. Suivant leur composition, les bougies fondent entre 40 et 70°C.

3. La mèche

La mèche est chargée d'amener à la flamme la quantité de cire juste nécessaire à son fonctionnement. Son diamètre joue donc un rôle très important. Il est généralement proportionnel au diamètre de la bougie. Pour de grosses bougies, il devient alors nécessaire de tresser les fils pour avoir un diamètre de mèche convenable. La tresse la plus répandue est la tresse plate (tresse de coiffure « mèche » au Sénégal). Le tableau suivant donne le nombre de fils à tresser en fonction du diamètre de la bougie.

Attention : le tableau parle de **brin**. Le « fil » de tricot en coton que l'on achète est constitué de plusieurs brins torsadés sur eux-mêmes. Ce sont ces brins qu'il faut compter.

¹⁷ www.wikipedia.org/wiki/bougie

Taille	Utiliser pour	Taille	Utiliser pour
12 brins	fines chandelles entre 7.5 et 20 mm de diamètre	27 brins	chandelles entre 75 et 83 mm de diamètre
15 brins	fines chandelles entre 12 et 25 mm de diamètre	30 brins	chandelles entre 83 et 100 mm de diamètre
18 brins	chandelles entre 25 et 50 mm de diamètre	36 brins	chandelles entre 100 et 115 mm de diamètre
21 brins	chandelles entre 50 et 62 mm de diamètre	45 brins	chandelles entre 115 et 125 mm de diamètre
24 brins	chandelles entre 62 et 75 mm de diamètre	60 brins	chandelle entre 125 et 150 mm de diamètre

Taille de la mèche des bougies¹⁸

4. Le fonctionnement de la bougie¹⁹

Le principe du fonctionnement de la bougie repose sur le phénomène d'autoalimentation. Lorsque nous allumons la mèche de la bougie, l'air surchauffé fait fondre la paraffine tout autour d'elle. Cette paraffine fondue monte le long de la mèche par capillarité (c'est à dire du fait de l'espace très réduit entre chaque fibre composant la mèche). Cette paraffine fluide s'évapore et certaines de ses molécules forment un gaz combustible qui va brûler en présence d'air dans la partie la plus chaude, d'où la présence de la flamme. La combustion de la paraffine dégage de la chaleur. L'air environnant ainsi surchauffé fait fondre à nouveau de la paraffine qui va remonter le long de la mèche par capillarité.

Au moment où la cire prend cette forme gazeuse, de la suie se forme. Les particules de suie en brûlant, libèrent une lumière jaune très nettement visible au cœur de la flamme. S'il n'y a pas assez d'oxygène ou bien trop de cire au niveau de la flamme (lorsque le diamètre de la mèche est trop important par exemple), les suies créées ne seront pas entièrement brûlées et la bougie dégagera des fumées et d'autres résidus à base de carbone. Ceux-ci se déposeront sur la mèche produisant une sorte de champignon noir.

Il faut donc amener à la flamme une quantité de cire juste nécessaire à son alimentation et c'est le rôle de la mèche.

La flamme est éteinte lorsqu'on souffle suffisamment fort dessus pour créer un courant d'air qui refroidit l'environnement de la flamme. La cire en refroidissant ne monte plus par capillarité vers la flamme qui s'éteint faute d'alimentation en cire. La flamme peut aussi être éteinte faute d'alimentation en oxygène (en empêchant l'air d'entrer en contact avec elle en l'étouffant avec les doigts par exemple). Privée de l'oxygène, un des éléments essentiels à la combustion, la flamme s'éteint.

¹⁸ www.candlewic.com

¹⁹ <http://fr.wikipedia.org>

LE PAPIER

Le papier est formé d'une couche de fibres de bois emmêlées les unes avec les autres de manière désordonnée. C'est cet enchevêtrement qui lui donne sa cohésion. Ainsi une fois solide, il est presque impossible de détacher individuellement les fibres du papier. Pour visualiser un enchevêtrement, regarder un tissu : les fils y sont enchevêtrés les uns avec les autres mais d'une manière ordonnée, et là on peut les détacher. Pour détacher une à une les fibres de papier, on utilise généralement de l'eau qui va les gonfler et permettre ainsi de les séparer. Dans le module nous avons utilisé une râpe pour séparer les fibres de papier.

1. Histoire du papier (Voir « la petite histoire du papier » page 43)

2. Fabrication industrielle du papier²⁰

De nos jours, le papier est fait essentiellement à partir du bois. Le bois est constitué entre autres, de fibres de cellulose, de longueur variable, reliées entre elles par une substance appelée lignine. La préparation de la pâte consiste à récupérer les fibres cellulosiques contenues dans le bois tout en conservant au mieux toutes leurs propriétés. La pâte à papier est donc la solution contenant les fibres de cellulose en suspension. Il existe deux sortes de procédés pour fabriquer de la pâte à papier.

2.1. La pâte mécanique

Par procédé mécanique, il est entendu que les fibres sont séparées par action mécanique d'une meule. Le procédé a un bon rendement (plus de 90 %) car il utilise tout le rondin du bois à l'exception de l'écorce (il est relativement gourmand en énergie).

2.2. La pâte chimique

Dans le procédé chimique, le bois subit une cuisson assurant la dissolution chimique de ses constituants et la séparation des fibres. Ce mode de défibrage a un rendement inférieur au raffinage mécanique (environ 50 %) parce qu'il élimine une partie de la matière caractéristique du bois (la cellulose).

2.3. La préparation de la pâte et le raffinage (Figure 1)

Les balles de pâte à papier sont mises en suspension dans l'eau à l'intérieur de vastes récipients cylindriques tournant à grandes vitesses appelés **pulpeurs**, pour séparer les fibres les unes des autres. Après épuration, la pâte subit une opération dite de **raffinage**, dont le but est d'hydrater, donc de gonfler les fibres, de manière à permettre, plus tard, leur enchevêtrement. C'est alors que l'on ajoute à la pâte les charges minérales (carbonate de calcium, kaolin, talc, dioxyde de titane) et les adjuvants (colles, agents de rétention, antimousse, antislimes, colorants, nuanceurs, azurants...), destinés à améliorer les caractéristiques du papier. La pâte est ensuite épurée, diluée et désaérée.

²⁰<http://w3.upm-kymmene.com>

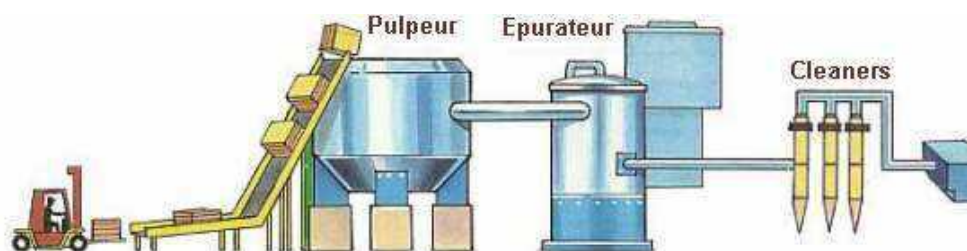


Figure 1 : 1^{ère} partie des étapes de fabrication industrielle du papier²¹

2.4. La partie humide (Figure 2)

Par le biais de la **caisse de tête** (appelée **cleaners** sur la figure 1), la pâte est distribuée sous forme de **jet** sur toute la largeur d'une toile sans fin, élément essentiel d'un ensemble mécanique appelé **la table de formation**. Cette toile est soumise à un mouvement saccadé de va-et-vient latéral qui facilite la formation homogène d'une couche de pâte à papier et son égouttage. Les fibres s'enchevêtrent et ont tout naturellement tendance à s'aligner d'elles-mêmes dans le sens de déplacement du flot de pâte. La feuille de papier contient de 75 à 85% d'eau à sa sortie de la **table**.

Toutes les étapes suivantes : presses, sécherie, enduction et apprêts ont lieu dans ce qui est appelé **machine à papier** sur la figure 2.



Figure 2 : 2^{ème} partie fabrication industrielle du papier

Les presses

Le pourcentage d'eau dans la feuille de papier est réduit à 60 ou 70% dans la section des **presses**. Le pressage consiste en effet à comprimer la feuille entre deux cylindres recouverts d'un feutre absorbant. Si elle a pour but de réduire la teneur en eau, cette opération permet aussi d'augmenter la compacité et d'améliorer l'état de surface par action mécanique des cylindres sur la feuille encore très malléable.

La sécherie

La feuille de papier pénètre ensuite dans la partie sèche ou **sécherie**. Les sécheurs sont des tambours de fonte chauffés intérieurement avec de la vapeur d'eau. La feuille est maintenue contre les sécheurs par un feutre lourd de coton ou une toile de séchage composée de coton et de fibres artificielles.

L'enduction

Afin d'améliorer le lissé, l'imperméabilité et les caractéristiques optiques de la surface du papier, on procède ensuite à une enduction ou un **couchage** de la feuille de papier. Ceci revient à déposer à sa surface, à l'aide d'une **size-press** (ou presse encolleuse), un **mélange** composé d'amidon et éventuellement d'autres matières : pigments minéraux (carbonate, talc...), colorants, azurants, nuanceurs et dispersants. Cette étape est primordiale pour les papiers d'impression et d'écriture.

²¹ www.copacel.fr

Les apprêts

Une dernière opération peut être effectuée, sur machine, avant que le papier ne soit mis en bobines. Il s'agit du passage à la **lisse**, constituée de rouleaux d'acier poli placés les uns contre les autres. Le papier ainsi traité subit une égalisation de sa surface par compression : il est dit **apprêté** ou **satiné**. Les papiers d'écriture (cahiers d'écoliers, blocs correspondance) sont satinés et collés.

2.5. La finition

En fin de chaîne, la feuille est enroulée (**bobinage** sur la figure 2). Les bobines sont ensuite découpées et emballées en rames de 500 feuilles ou bien refendues en bobines plus petites adaptées à des utilisations ultérieures (rotatives d'imprimerie, machines de transformation, etc.). La présentation du papier en rames est dénommée **Papier en format** par opposition au **Papier en bobines**. Quelques jours après sa fabrication, le papier est expédié par voie fluviale, ferroviaire ou routière.

2.6. Les contrôles

Aujourd'hui une machine à papier moderne peut produire, à plus de 100 km/h, une feuille de 10 mètres de large. Pour cela, il faut maîtriser les multiples variables de sa fabrication. La machine à papier et ses annexes sont de plus en plus surveillées par un réseau de capteurs. Des ordinateurs dits **de procédés** surveillent, vérifient et stabilisent à chaque instant les paramètres suivants : concentration, débit, niveau, vitesse, pression, glissement, poids au m², humidité, couleur, résistance, opacité, impuretés, etc. A ces tests en continu, s'ajoute le contrôle de qualité qui, avant emballage et livraison, vérifie et garantit la conformité aux normes et aux cahiers des charges.

3. Le recyclage industriel du papier

Les pâtes (en général mécaniques) faites de papiers recyclés sont mises en suspension dans l'eau à l'intérieur d'un **pulpeur** et brassées pour séparer les fibres. En passant par l'**épurateur**, elles sont ensuite débarrassées des substances indésirables (agrafes, plastique...). Quant au blanchissement et au désencrage (qui consiste à séparer l'encre des fibres), il s'agit d'opérations facultatives qui ne sont mises en œuvre que lorsque la qualité du produit fini l'exige. Enfin, la pâte **recyclée**, obtenue à la sortie du **raffineur**, intègre le circuit traditionnel de la machine à papier c'est-à-dire la partie humide.

LETTRE AUX PARENTS D'ELEVES

Chers parents,

Dans le cadre de ses activités scolaires, votre enfant débute, et ce pour une durée de 6 à 8 semaines, une étude sur le thème des déchets et du recyclage. Cette activité lui permettra de transformer des déchets de papier et de cire de bougie en papier et en bougie. Au-delà de l'expérimentation, la démarche utilisée vise à inculquer aux enfants un esprit critique, d'analyse et de synthèse. Il ne faudra donc pas vous étonner de le voir vous poser des questions à propos des déchets et de leur devenir. Il lui sera aussi proposé de confectionner une œuvre d'art à partir des déchets et pour cela, il pourrait avoir besoin de votre aide.

L'école peut aussi avoir besoin de votre concours pour la mise en œuvre, dans les classes, de cette activité sur les déchets. Nous vous demandons donc de vous approcher de l'enseignant de votre enfant, si vous pouvez, en fonction de votre disponibilité, lui apporter votre soutien pour la surveillance des élèves.

Très cordialement

REMERCIEMENTS

Mme AW enseignante à l'école médina gounass (Guédiawaye, Sénégal)

Mme BEC chercheur au CNRS à l'École Centrale de Lyon (France)

Mme DIOP Directrice de l'école point E II (Dakar, Sénégal)

Mme MIDOL Inspectrice de l'Éducation Nationale (Vaulx en Velin, France)

Mme ROCHON responsable des sciences à l'École des Sablons (Décines, France)

M. CISSÉ enseignant chercheur à l'École Supérieure Polytechnique (Sénégal)

M. COQUILLET enseignant chercheur à l'École Centrale de Lyon (France)

M. CRÉDEVILLE de la coopération française à la D.E.E. (Sénégal)

M. GARASSINO de l'association INNOPÔLE (France)

M. MANTE enseignant à l'école H. Wallon (Vaulx en Velin, France)

M. MBAYE artisan fondeur d'aluminium à Colobane (Sénégal)

M. MBODJ de la Direction de l'Enseignement Élémentaire (Sénégal)

M. NDIAYE Directeur de l'école médina Gounass (Guédiawaye, Sénégal)

M. NOVELLA directeur de l'École des Sablons (Décines, France)

M. POUSSIELGUE de la coopération française à la D.E.E. (Sénégal)

M. SAGNA artisan fondeur d'aluminium à Colobane (Sénégal)

M. SALL, Directeur de l'Enseignement Élémentaire D.E.E. (Sénégal)

M. SEGUY directeur de l'École H. Wallon (Vaulx en Velin, France)

M. THIOBANE enseignant à l'école point E (Dakar, Sénégal)

M. THIOMBANE Président de l'association des fondeurs (Sénégal)

CONCLUSION GENERALE

Cette thèse réalisée en co-tutelle entre l'École Centrale de Lyon et l'École Supérieure Polytechnique de Dakar, est une contribution à l'amélioration de la qualité de produits fabriqués à partir du recyclage de déchets métalliques d'origine industrielle au Sénégal, problème étroitement lié aux politiques de développement menées dans de nombreux bon nombre de pays, surtout depuis les sommets de Rio et Kyoto.

La récupération de déchets d'acier ou d'aluminium est à l'origine de la fabrication d'armatures pour béton armé, production assurée par une société disposant de moyens de fabrication industriels (SOSETRA), et d'ustensiles de cuisine réalisés par des artisans grâce à la technique de la fonderie au sable, activité traditionnelle en Afrique.

Compte tenu des moyens déployés et du contexte dans lequel ces productions se situent, des problèmes de qualité sont susceptibles de mettre en jeu la sécurité des biens et des personnes. Les armatures n'ont pas toujours les caractéristiques voulues (en particulier leur limite d'élasticité garantie doit être de 400 MPa) ; elles se rompent parfois lors de leur mise en forme par pliage. Les ustensiles de cuisine fabriqués à partir d'alliages issus de l'automobile posent le problème de leur compatibilité avec les aliments. En effet, la corrosion de ces matériaux consécutive au contact plus ou moins agressif avec les denrées alimentaires est à l'origine d'un transfert des éléments chimiques constituant l'alliage vers l'aliment. Des problèmes toxicologiques liés à la nature et à la quantité des éléments transférés peuvent apparaître.

Dans ce contexte environnemental, nous avons aussi voulu donner à ce travail de recherche une dimension sociétale par un prolongement vers les Sciences Humaines et Sociales est proposé par le biais d'une action pédagogique au niveau de jeunes enfants. Ceci constitue une grande innovation et apporte un caractère original à cette recherche avant tout scientifique.

Ce travail dont nous présentons ici les conclusions les plus pertinentes est aussi une contribution à un ensemble d'actions inscrites dans le programme de développement du Sénégal.

L'étude documentaire préalable nous a permis de faire le point sur la notion de déchet et sur les différents modes de recyclage et de valorisation des matériaux métalliques dans les sociétés industrialisées. Nous montrons que les lois incitent fortement les détenteurs de déchets à valoriser les matériaux ou l'énergie contenus dans les objets arrivés en fin de vie, que ce soit en Afrique ou en Europe. Au Sénégal, ces lois inscrites dans le code de l'environnement, encouragent même les actions de formation pour sensibiliser les populations aux problèmes de gestion des déchets et de protection de l'environnement. D'où un intérêt supplémentaire pour un prolongement éducatif à notre recherche scientifique.

Pour bien situer le contexte de notre étude expérimentale, nous avons fait un état des ressources de matières premières métalliques recyclables au Sénégal et de leur acheminement vers les deux filières de traitement choisies. Nous montrons que la ressource de nature métallique, issue exclusivement de

l'importation de produits de consommation est très inégale en qualité et quantité, facteur défavorable pour la fabrication de produits de qualité constante dans le temps.

Dans le deuxième chapitre relatif à l'étude de la qualité de fabrication d'armatures métalliques pour béton armé, nous montrons qu'indépendamment du problème de soudabilité qui n'entraîne pas dans notre champ d'investigation, la seule caractéristique de résistance mécanique, la limite d'élasticité garantie de 400 MPa que le fabricant est tenu de respecter n'est pas suffisante, notamment au regard des normes en vigueur en Europe dans lesquelles figurent des critères de fragilité et des critères dimensionnels.

La caractérisation mécanique en traction nous montre que 4 échantillons sur les 14 testés ne remplissent pas le cahier des charges. Les facteurs à l'origine de cette situation ont été identifiés :

- une teneur en carbone non stabilisée et, de façon générale trop importante, rend l'acier de construction trop résistant. ;
- une réduction du diamètre des armatures systématique et excessive.

L'analyse des caractéristiques mécaniques et chimiques des aciers de construction, croisées avec les caractéristiques dimensionnelles des armatures, montrent en effet que pour « compenser » la résistance excessive des aciers, une diminution de la section permet de ramener la limite d'élasticité garantie des armatures vers des valeurs plus proches de 400 MPa. Une analyse micrographique montre qu'une mauvaise maîtrise de la microstructure couplée avec un mauvais contrôle des conditions de refroidissement des armatures après laminage des aciers, introduit un facteur de dispersion supplémentaire de la qualité des produits. Les pistes avancées pour parvenir à un meilleur niveau de qualité des produits passent par une régulation de la qualité des déchets traités imposant un meilleur tri en amont des opérations de transformation, une diminution de la teneur en carbone des aciers élaborés et la maîtrise de leur microstructure, c'est à dire une optimisation des conditions de laminage et du refroidissement final des armatures.

Nous proposons un outil d'aide à la fabrication permettant, à partir d'un essai de dureté réalisé sur un échantillon de l'acier élaboré, de définir le diamètre d'armature à atteindre en respectant une limite d'élasticité garantie donnée, une tolérance sur le diamètre fixée et un allongement à rupture de 14%, garantissant une mise en forme des armatures par pliage sans risque de rupture.

Dans cette partie de l'étude nous avons montré que les aciers considérés vérifient la relation proposée par Tabor : $H \approx 3 Y$ liant leur limite d'élasticité à leur dureté ;

Le troisième chapitre développe nos investigations concernant l'évaluation de la qualité des ustensiles de cuisine fabriqués artisanalement à partir de déchets d'alliages d'aluminium. La méthode de la fonderie en moule destructible silico-argileux utilisée par les artisans a été analysée au moyen d'enquêtes sur le terrain. La bonne maîtrise de la technique par les artisans alliée à l'utilisation d'alliages Al/Si à bas point de fusion, leur permet de produire des objets de forme élaborée tels les marmites dont l'épaisseur de paroi approche les 3 mm. Une étude de la qualité du sable utilisé nous a

conduit à recommander un renouvellement partiel trimestriel de ce matériau pour garantir une qualité de fabrication constante dans le temps.

Afin d'évaluer la qualité alimentaire des alliages produits, nous nous sommes tout d'abord intéressés à leur composition chimique que nous avons comparée à celle préconisée par les normes françaises et européennes qui réglementent ce secteur, ainsi qu'à leur microstructure pour identifier les mécanismes de dégradation des matériaux sous l'effet de la corrosion alimentaire. En parallèle, un échantillon témoin prélevé sur un produit semblable de fabrication européenne a été étudié.

Les résultats d'analyse d'une quinzaine d'échantillons montrent que les alliages produits contiennent tous du silicium dans des proportions comprises entre 2 et 10% en masse, d'importantes quantités de fer (environ 0,7%) de cuivre (jusqu'à 4 %) et de zinc (jusqu'à 0,9 %). Ces deux derniers éléments dépassent les limites autorisées par la norme européenne. On trouve parfois du plomb et de l'étain en quantités significatives.

Cette variabilité de composition est la conséquence de l'absence de tri des déchets et d'un approvisionnement incertain en quantité et qualité.

La microstructure, classique pour des alliages aluminium/silicium hypoeutectiques, est formée de cristaux d'aluminium primaires et de l'agrégat eutectique Al/Si dans lequel se trouvent aussi des composés intermétalliques dont l'origine est essentiellement liée à la présence de cuivre, de fer et de magnésium. Le témoin est un alliage d'aluminium faiblement chargé en éléments d'addition dont la microstructure est constituée d'une matrice d'aluminium dans laquelle se trouvent dispersés de petits cristaux de silicium et des composés intermétalliques riches en fer et magnésium.

La qualité alimentaire des alliages étudiés, a été évaluée par des tests dans lesquels les alliages choisis ont été placés au contact d'aliments et de milieux aqueux couramment utilisés dans la cuisine sénégalaise tels la tomate, le riz, l'huile d'arachide, l'eau salée, portés en température suivant un protocole que nous avons établi. Les pertes de masse, ainsi que la dégradation de la surface des échantillons d'alliage observée en microscopie optique et à balayage puis mesurée à l'aide du paramètre de rugosité R_q obtenu par profilométrie AFM, nous ont permis de tester la résistance et d'identifier les mécanismes de corrosion des matériaux. Des mesures de transfert des éléments de l'alliage vers les aliments ont été réalisées. L'ensemble des résultats collectés nous montrent que les alliages d'aluminium sont sensibles à la corrosion alimentaire et plus particulièrement lors de la cuisson du riz où une perte de masse de 0,2 mg/cm² de métal a été mesurée après 60 mn de test. La tomate et l'huile ont en revanche peu d'effets.

L'analyse des surfaces endommagées a montré un rôle important de la microstructure dans le mécanisme de corrosion. Les interfaces entre la matrice d'aluminium et les composés intermétalliques ou les aiguilles de silicium sont des sites privilégiés pour la formation de piqûres attribuées à la mise en solution par corrosion galvanique de la matrice d'aluminium. Un procédé de modification du silicium utilisant la soude a été mis en œuvre, améliorant la résistance à la corrosion des alliages riches en silicium.

Nous n'avons cependant pas détecté par l'analyse les éléments métalliques de l'alliage transférés dans l'aliment.

En faisant l'hypothèse d'un transfert intégral des éléments de l'alliage vers l'aliment, évalués à partir des mesures de perte de masse, en se référant au cas le plus défavorable (0,2 mg/cm²), nous montrons, par le calcul, que les alliages produits ne font courir aucun risque sanitaire et toxicologique aux utilisateurs compte tenu des doses admissibles par le corps humain et reconnues par la JEFCA, organisme de santé publique international.

Dans une réflexion élargie intégrant les moyens de fabrication et le comportement des alliages issus du recyclage des déchets d'aluminium, nous confortons les objectifs du projet mené par la Direction de l'Artisanat au Sénégal visant la fabrication, à une échelle industrielle, de lingots d'alliages titrés pour la fabrication, suivant le mode artisanal, d'objets de qualité, et en particulier d'ustensiles de cuisine. Cette réflexion met l'accent sur la nécessité d'un tri méthodique des déchets.

A travers l'étude de deux types de production très différents sur le plan des moyens, mais semblables pour ce qui concerne l'origine de la matière première, le recyclage des déchets, il apparaît que la qualité des produits n'est pas uniquement liée à la maîtrise des conditions de transformation de la matière. Dans le domaine particulier du recyclage qui constitue la spécificité de l'activité « métallurgique » développée au Sénégal, la partie du cycle situé en amont de la transformation revêt une importance capitale ; elle doit faire partie intégrante de la fabrication. A ce niveau, le tri méthodique devient nécessaire dès l'instant où les objectifs de production prennent en compte des critères de qualité. Il permet effectivement de réguler la composition des matériaux produits et de l'optimiser en fonction des besoins. C'est un objectif difficile à atteindre dans la mesure où le secteur de la collecte ne dispose d'aucun moyen de contrôle pour travailler efficacement. Le problème se trouve donc reporté au niveau des ateliers de transformation dans lesquels l'expérience et le savoir faire permettent d'opérer des corrections. Nous avons vu que ce n'est pas suffisant. Par ailleurs, faire un tri rigoureux écarterait certainement du cycle de transformation une masse de déchets dont la qualité serait incompatible avec la fabrication envisagée, ayant pour conséquence la diminution des flux des matières traitées et une augmentation du coût de ces dernières. Par conséquent, une diversification des débouchés pour des matériaux variés et contrôlés doit être faite. C'est aussi l'objectif du projet de restructuration du secteur artisanal de la fonderie.

Le dernier chapitre, consacré à la conception d'un module d'enseignement spécifiquement destiné à l'école élémentaire sénégalaise, est le fruit d'une collaboration étroite entre l'université (ESP / ECL), le Ministère de l'Education au Sénégal et un partenaire français spécialisé dans les problèmes de pédagogie (INNOPÔLE). Il répond aussi à une « commande » de la Direction de l'École Élémentaire au Sénégal. Faisant partie intégrante du travail de recherche, il constitue son prolongement. Nous avons cherché à participer au développement de la société en nous appuyant sur la thématique développée dans cette thèse. Située dans un contexte de développement durable, de protection de l'environnement, elle peut servir de support à une action éducative auprès des jeunes populations. Trouver une ébauche de solution aux problèmes environnementaux nécessite la prise en compte du problème dans sa globalité où l'éducation doit jouer un grand rôle.

La thématique des déchets, de leur devenir et de leur réutilisation s'est donc imposée. Nous l'avons développée à travers une méthode pédagogique active, dans laquelle l'enfant, placé en situation de recherche, acquiert les informations et les savoirs nécessaires pour répondre aux questions qu'il se pose. C'est l'investigation raisonnée.

Le module comporte sept séquences au cours desquelles les enfants sont amenés à s'interroger et à rechercher des informations sur les déchets, mais aussi à fabriquer de nouveaux objets au moyen d'opérations de transformation compatibles avec les moyens des écoles : recycler de vieux papiers et des déchets de cire de bougie sont les activités pratiques introduites auprès des élèves. Le réinvestissement des connaissances acquises à travers un travail de création artistique clôt ce module.

Un document d'accompagnement scientifique destiné à l'enseignant et trois supports documentaires pour les enfants permettent d'apporter des informations complémentaires aux activités pratiques.

En intervenant ainsi en amont et en aval sur la problématique de l'environnement, cette thèse innove avec un nouveau concept multidimensionnel qui allie Sciences de l'Ingénieur et Sciences de l'Homme et de la Société et qui se propose de traiter les problèmes dans leur globalité et leur complexité. Cette approche inhabituelle couplant dimensions scientifiques et sociétales, matérialisée par une thèse en cotutelle réalisée en alternance sur une thématique en liaison directe avec le développement du pays, nous paraît bien adaptée aux besoins et au contexte des pays du Sud qui, comme le Sénégal, sont impliqués dans une dynamique de croissance économique.

Les objectifs principaux de notre travail ont donc été atteints, cependant le temps imparti ne nous a pas permis d'apporter toutes les réponses aux problèmes et aux questions que notre recherche nous a permis de mettre à jour. Plusieurs perspectives pourraient être exploitées pour donner suite à cette étude :

- indépendamment de la diminution du taux de carbone dans les aciers pour armatures à béton qu'il faut opérer, le procédé de fabrication peut encore être amélioré. En particulier l'étagement des taux de laminage à l'origine de l'apparition des replis, cause possible de ruptures, doit être optimisé. Il permet par ailleurs un contrôle plus précis de la microstructure ;
- le transfert de l'alliage dans le milieu alimentaire et sa mise en relation avec les pertes de masse des échantillons que nous avons tenté de réaliser après corrosion est une voie qu'il est nécessaire de poursuivre pour cerner de plus près l'influence des nombreux facteurs à prendre en considération dans l'étude de l'alimentarité des matériaux ;
- sur le plan de la pédagogie, le module que nous avons élaboré est retenu comme outil pédagogique pour la phase expérimentale de la mise en place de la main à la pâte au Sénégal qui démarre à la rentrée 2006-2007. Cette utilisation permettra d'apprécier l'accueil que lui réserve les acteurs du système éducatif sénégalais.

Annexes

SOMMAIRE

ANNEXE I-1 Historique du partenariat ECL / INNOPÔLE / D.E.E / ESP.....	A - 1
ANNEXE II-1 Le spectromètre d'émission optique à source étincelle	A - 3
ANNEXE II-2 Le microscope électronique à balayage (MEB)	A - 5
ANNEXE III-1 La pratique artisanale de la fonderie au Sénégal	A - 7
ANNEXE III-2 Essai de granulométrie et d'équivalent de sable.....	A - 19
ANNEXE III-3 Réglementation.....	A - 25
ANNEXE III-4 Le microscope à force atomique (AFM).....	A - 27
ANNEXE III-5 La colorimétrie	A - 29
ANNEXE III-6 Le spectromètre d'émission à plasma induit (ICPMS).....	A - 31

ANNEXE I-1

Historique du partenariat ECL / INNOPÔLE / D.E.E / ESP

En 1996, avec le démarrage de l'opération « La main à la pâte » en France, est créé un site pilote national expérimental, INNOPÔLE, au sein de la circonscription de Vaulx en Velin, sous la responsabilité de Madame Renée MIDOL, Inspectrice de l'Education Nationale. Des aides ponctuelles apportées par des scientifiques lyonnais accompagnent cette initiative (visites dans des classes, échanges avec des enseignants, participation à des actions de formation, ...). En particulier, le Professeur Jean-Marie GEORGES, de l'Ecole Centrale de Lyon, s'implique fortement dans ces actions de parrainage. En trois ans, en même temps que l'opération « La main à la pâte » se généralise à Vaulx en Velin avec 95% des écoles engagées, ce parrainage évolue en un réel partenariat avec l'Ecole Centrale de Lyon, impliquant des étudiants par le biais de projets d'études (d'une durée de quinze mois), consacrés à la création de nouveaux outils pédagogiques respectant la démarche d'investigation raisonnée préconisée par « La main à la pâte ». Ainsi, depuis 1998, quatre modules ont été créés grâce à un encadrement des étudiants à la fois par des scientifiques et des membres de la communauté éducative, pour garantir la qualité scientifique et pédagogique des documents réalisés.

Parallèlement, en 1999, Madame Renée MIDOL est sollicitée par la Direction de l'Enseignement Élémentaire du Sénégal (D.E.E.) qui a la volonté de rénover l'enseignement des sciences à l'école élémentaire, avec le soutien de la coopération française. Après une phase d'essai de la mise en place de « La main à la pâte » au Sénégal entre 2000 et 2002 et la rédaction d'un guide provisoire de formation, la D.E.E. et ses partenaires français ont le souhait d'impliquer la communauté scientifique sénégalaise pour la suite de cette expérimentation.

De ce contexte de partenariat fort entre l'ECL et INNOPÔLE en France, et de projet de mobilisation de la communauté universitaire sénégalaise pour aider à la rénovation de l'enseignement des sciences, est née l'idée de réaliser une thèse, sur une problématique scientifique locale (le recyclage des déchets métalliques) avec un prolongement éducatif concrétisé par la création d'un module pédagogique spécifiquement destiné à l'école sénégalaise, traitant d'un thème en rapport avec le sujet scientifique. Un contact est pris avec le Professeur Ibrahima Khalil CISSE de l'Ecole Supérieure Polytechnique (ESP) pour le montage d'une thèse en cotutelle entre l'ECL et l'ESP, comprenant les deux volets, scientifique et éducatif. En 2003, le Professeur Ibrahima Khalil CISSE et Monsieur Aly SALL, directeur de la D.E.E. se rencontrent et recrutent un étudiant sénégalais motivé par ce projet de thèse innovant. Une convention est signée entre l'ECL et l'ESP. La thèse est financée par l'Agence Universitaire de la Francophonie, dans le cadre d'une bourse de mobilité.

C'est ainsi qu'est né ce partenariat nord-sud à quatre, impliquant les communautés scientifiques (ECL et ESP) et éducatives (INNOPÔLE et D.E.E.), françaises et sénégalaises, et qui aborde, de manière globale, une problématique liée à l'environnement et au développement durable, en réponse à des préoccupations locales scientifiques (qualité des produits issus du recyclage des métaux) et éducatives (rénovation de l'enseignement des sciences à l'école élémentaire et lien élémentaire/supérieur).

ANNEXE II-1

Le spectromètre d'émission optique à source étincelle

Le spectromètre à étincelle est un outil d'analyse des métaux ferreux, non ferreux et de leurs alliages. Il est spécialement conçu pour l'identification et le dosage des éléments présents dans des échantillons solides et conducteurs. Nous allons décrire sommairement le mode de fonctionnement d'un spectromètre à étincelle, appareillage le plus couramment utilisé pour déterminer les compositions chimiques des alliages de fonderie.

Dans une chambre sous vide, le haut niveau d'énergie contenu dans une étincelle amorcée par une haute tension entre une électrode de tungstène et l'échantillon à analyser sublime la matière située à la surface de ce dernier. Les atomes extraits du solide se trouvent dans un état quantique excité dès l'instant où le niveau d'énergie atteint est suffisant. Leur retour à leur état fondamental s'effectue au cours d'une phase de transition pendant laquelle les atomes émettent de la lumière.

Les caractéristiques de cette lumière (longueur d'onde et intensité) sont très étroitement liées à la nature de l'élément excité et au nombre d'atomes subissant la transition. L'analyse de cette lumière par spectrométrie optique permet d'identifier et de quantifier les éléments constituant la cible.

La quantification s'effectue par comparaison des signaux obtenus sur la cible avec ceux émis par des échantillons témoins contenant les éléments à analyser dans des proportions connues.

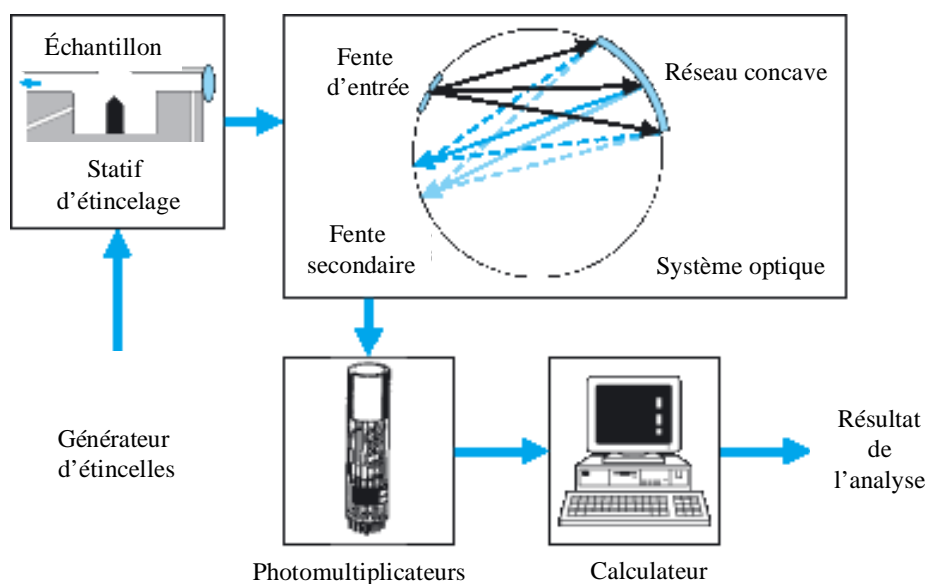


Figure 1: Schéma de fonctionnement d'un spectromètre d'émission optique à source étincelle¹.

¹ R. MEILLAND, dans *Techniques de l'Ingénieur, Spectrométrie d'émission optique à source étincelle (partie 1)*, dossier P 2755 (2005).

ANNEXE II-2

Le microscope électronique à balayage (MEB)

Comme le microscope optique, le MEB est un outil d'observation mais son principe de fonctionnement et de formation de l'image est très différent.

Dans un MEB, un faisceau d'électrons primaires, d'un diamètre pouvant varier de quelques nanomètres à un micromètre environ, est focalisé sur l'échantillon, et dévié suivant un mode de balayage TV à l'aide de lentilles électromagnétiques pour couvrir une surface de quelques μm^2 à quelques mm^2 . Le rayonnement émis par l'échantillon provenant de l'interaction entre les électrons incidents et la cible (l'échantillon observé) est collecté par un détecteur approprié et le signal électrique ainsi obtenu module, après amplification, l'intensité du faisceau d'électrons (spot) d'un écran cathodique. Dans le processus de construction de l'image, le faisceau d'électrons de l'écran cathodique se déplace de façon synchrone avec celui du faisceau incident. A chaque position du faisceau incident sur l'échantillon correspond une position homologue du spot sur l'écran cathodique. La brillance du spot est proportionnelle à l'intensité du signal d'électrons émis par le point de l'échantillon. On obtient ainsi, sur l'écran cathodique, une image reconstituée de la surface de l'échantillon (en contraste monochrome) à partir du signal détecté provenant de chaque point de la surface balayée par les électrons primaires.

Bombardé par un faisceau d'électrons incidents, un point de la surface du matériau réémet essentiellement des électrons rétrodiffusés, des électrons secondaires et des rayons X.

Les électrons rétrodiffusés sont des électrons primaires incidents ayant subi suffisamment d'interactions avec les atomes de l'échantillon pour ressortir de ce dernier. Ces électrons proviennent d'un volume d'interaction de l'échantillon qui a approximativement la forme d'une demi-sphère et dont le diamètre est d'autant plus grand que le numéro atomique Z des atomes cibles est petit : par exemple, pour des électrons incidents ayant une énergie de 20 KeV, le diamètre de la demi-sphère est égal à 4,2 μm pour l'aluminium ($Z=13$) et 0,9 μm pour l'or ($Z=79$).

Le coefficient de rétrodiffusion η , qui est le rapport du nombre d'électrons rétrodiffusés émis sur le nombre d'électrons primaires incidents, croît avec le numéro atomique Z des échantillons ($\eta=0,15$ pour l'aluminium et $\eta=0,5$ pour l'or).

De plus, le coefficient de rétrodiffusion η croît si l'angle α augmente (angle que forme le faisceau d'électrons primaires avec la normale à la surface de l'échantillon). Grâce à des détecteurs appropriés, il est possible de capter les électrons rétrodiffusés pour obtenir une image de l'échantillon qui met en évidence soit la topographie (le relief) de l'échantillon (variation de α), soit ses variations locales de composition chimique (variations de Z). Au niveau de notre étude, le signal des électrons rétrodiffusés a été essentiellement utilisé pour obtenir des images en contraste chimique (variations locales de Z).

Les électrons secondaires sont des électrons de faible énergie (inférieure ou égale à 50 eV) résultant de l'interaction des électrons primaires avec les électrons faiblement liés de la couche de

valence ou de conduction des atomes de l'échantillon. Le coefficient Δ d'émission en électrons secondaires dépend faiblement du numéro atomique Z des atomes cibles de l'échantillon. En revanche, il croît lorsque l'angle α entre le faisceau d'électrons primaires et la normale à la surface de l'échantillon augmente. Il s'en suit l'apparition d'un contraste topographique utilisé pour former une image de l'échantillon représentative de son relief. Dans notre étude, certaines images proviennent d'une analyse des électrons secondaires.

Pour l'observation au MEB, les échantillons ne requièrent aucune préparation spéciale dès l'instant où ils sont conducteurs. Les coupes métallographiques et les surfaces de rupture des matériaux métalliques peuvent donc être examinées sans aucune préparation.

La surface des échantillons des matériaux isolants est rendue conductrice par métallisation (couche d'or ou de carbone de 10 à 20 nm d'épaisseur, obtenue soit par vaporisation sous vide, soit par pulvérisation cathodique).

Le MEB utilisé dans notre étude (marque Philips, série XL20 avec le logiciel EDAX pour les analyses) est couplé à un spectromètre de rayons X, grâce auquel des analyses chimiques sur de très petits volumes de matière (ordre de grandeur de quelques micromètres cubes) peuvent être réalisées. Des images montrant la répartition spatiale des éléments, (cartographie X - images rayons X) peuvent aussi être réalisées. Notre MEB est donc un outil à double fonction puisqu'il permet d'avoir des images et la composition locale d'un échantillon.

ANNEXE III-1

La pratique artisanale de la fonderie au Sénégal

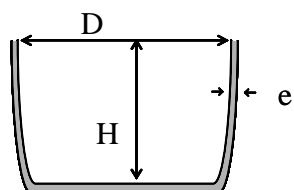
Au Sénégal, la technique de la fonderie d'aluminium produit essentiellement des ustensiles de cuisine dont le plus commun est la marmite. Un exemple de marmite de petite taille figure sur la photo ci-dessous (figure 1). Elle peut être fabriquée indifféremment avec ou sans « pieds ».



Figure 1 : Exemple de petite marmite sénégalaise.

Le fond est plat ou légèrement bombé, les flans sont droits ou galbés et l'épaisseur des parois est constante dans tout le volume de la marmite. Deux poignées complètent l'ensemble, auquel peuvent s'ajouter parfois des pieds prenant attache sur le dessous de la marmite et destinés à la surélever par rapport au lit de charbon de bois sur lequel elle est posée lors de la cuisson des aliments. A cet ensemble s'ajoute un couvercle fabriqué à partir du même alliage, qui comporte une petite poignée sur le dessus. Les dimensions de ces marmites sont assez communes (tableau 1).

Nom de la marmite	Dimensions: D x H x e (mm)	Nom de la marmite	Dimensions: D x H x e (mm)
30 kg	535 x 400 x 7	5 kg	328 x 220 x 5
20 kg	490 x 375 x 7	3 kg	305 x 190 x 5
15 kg	465 x 340 x 6	2 kg	268 x 180 x 4
10 kg	400 x 265 x 6	1,5 kg	250 x 160 x 4
7 kg	370 x 260 x 6	1 kg	210 x 120 x 4



D représente le diamètre intérieur du bord de la marmite.
H représente la hauteur mesurée à partir du centre de la marmite.
e représente l'épaisseur moyenne de la marmite.

Tableau 1 : Dimensions moyennes des marmites utilisées au Sénégal.

A cette production viennent s'ajouter des louches, écumeurs et autres ustensiles utilisés par les ménages de façon régulière.

I. Achat des déchets et élaboration de la charge

La première étape de la valorisation des déchets est la collecte. Nous avons vu dans le premier chapitre qu'au Sénégal, cette collecte des déchets d'aluminium se fait essentiellement au niveau des décharges publiques, des fourrières municipales et des garages de réparations automobiles. Dans ces déchets d'aluminium, les objets les plus fréquemment rencontrés (figure 2) sont constitués des nuances suivantes (désignations symboliques suivant la norme EN 1706)² :

- culasses de moteur et gèntes de voitures : nuances d'alliages normalisés de type EN AC-Al Si7Mg0,3 et EN AC-Al Si7Mg0,6 ;
- carters cylindres, carters de boîtes de vitesses ou d'embrayage, corps de pompes à eau, semelles de fer à repasser : alliages normalisés de type EN AC-Al Si9Cu3(Fe), EN AC-Al Si11Cu2(Fe) et EN AC-Al Si9Cu3(Fe)(Zn) ;
- pistons généralement réalisés à partir de l'alliage normalisé EN AC-Al Si12CuNiMg ;
- conducteurs électriques et canettes de boisson, chutes d'usine d'emboutissage, plaques d'imprimerie, profilés pour le bâtiment constitués d'aluminium pur à plus de 99%.



Alimentaire



Automobile



Bâtiment

Figure 2 : Exemples de déchets d'alliage d'aluminium.

Le prix de ces déchets ne dépend pas de leur composition chimique mais plutôt de l'offre et de la demande sur le marché. Il se situe actuellement entre 300 et 450 F CFA (46 et 69 centimes d'euros) le kilogramme.

Bien que la connaissance métallurgique précise des alliages utilisés dans la fabrication des marmites échappe à l'ensemble des artisans, ceux-ci ont une perception très pragmatique de cette matière première. En effet, il est ressorti de nos enquêtes que les artisans fondeurs, avec le temps, ont

²F. HERBULOT dans *Techniques de l'Ingénieur. Traité Matériaux métalliques, récupération et recyclage de l'aluminium, stratégie, dossier M 2 345* (2001).

établi de façon empirique un classement des alliages d'aluminium. Nous avons ainsi les alliages dits « mous », « durs » ou « normaux ».

Les alliages dits « mous » proviennent d'objets tels que les câbles conducteurs, les canettes ou les plaques d'aluminium pour l'imprimerie. Ils ne peuvent pas être utilisés seuls car ce sont des alliages à faibles propriétés mécaniques. Leur coulabilité est assez bonne mais les produits obtenus ont une grande ductilité et une charge à rupture faible, propriétés insuffisantes pour que les marmites résistent aux efforts auxquels elles sont soumises en cours d'utilisation.

Les alliages « durs » sont issus de produits tels que les pistons de moteurs ou les carters riches en magnésium ou les couvre-culasses de certains moteurs constitués d'alliages « aluminium magnésium » (de AlMg3 à AlMg9). Cette dernière catégorie d'alliages est appelée « très dure » ou « gaz ». Cette appellation découle peut-être de l'observation de la flamme éblouissante produite lors de leur introduction dans l'alliage d'aluminium en fusion (la combustion du magnésium à l'air donne une flamme éblouissante). Le magnésium est bien connu pour améliorer les caractéristiques mécaniques des alliages d'aluminium. Contrairement aux alliages « mous », ils ont une coulabilité plus faible mais de meilleures caractéristiques mécaniques. Cette faible coulabilité entraîne des défauts de remplissage du moule et c'est certainement pour cette raison que les fondeurs évitent de les utiliser seuls.

Les alliages « normaux » sont ceux n'entrant pas dans les deux catégories précédentes. Ils proviennent de déchets de l'automobile tels que les carters des boîtes de vitesses ou les blocs moteurs.

Pour composer la charge de fusion, les artisans opèrent des mélanges avec ces différents alliages (voir tableau 2). Ils adaptent ainsi les propriétés mécaniques du matériau qu'ils élaborent. Ce tableau est loin d'être exhaustif sachant qu'à chaque situation correspond une solution empirique propre à chaque fondeur. Ces mélanges sont réalisés d'après l'expérience et suivant les qualités d'aluminium dont ils disposent.

Provenance	Dénomination	État d'utilisation
Industrie automobile (carters, blocs moteurs)	Alliage « normal »	Utilisé en l'état ou faiblement mélangé à une autre qualité d'aluminium
Industrie automobile (pistons, cylindres, carters ou culasses très riches en magnésium)	Alliage « dur »	Mélangé avec 70 à 90% d'un autre type d'aluminium dit « mou »
Profilés de bâtiment (cadres de portes ...), canettes de boissons plaques d'imprimerie ou rebuts d'emboutissage de plaques d'aluminium	Alliage « mou »	Mélangé avec 10% à 50% d'alliage pour piston ou cylindre

Tableau 2 : Provenance, dénomination et utilisation des déchets d'alliages d'aluminium.

Les mélanges entre les alliages « durs » et « mous » représentent environ un tiers de ceux élaborés par les artisans fondeurs. Les deux tiers restants sont constitués d'alliages « normaux »

utilisés sans ajouts particuliers. Nous pouvons ainsi dire que deux tiers des produits finis des artisans fondeurs sont élaborés à partir des alliages d'origine exclusivement automobile.

Une petite minorité des artisans ajouterait des sachets en plastiques (emballages thermoplastiques) à la charge de fusion pour modifier les propriétés des alliages élaborés. Mais cette pratique n'a pas été vérifiée dans le cadre de cette étude ; le rôle de ces matières sur la qualité des alliages reste à démontrer.

2. Fusion de la charge

Une fois la charge constituée, l'artisan se prépare à la deuxième étape de son processus de valorisation : la fusion. Les déchets d'aluminium ne subissent aucune préparation préalable (nettoyage etc.). Ils sont placés dans un récipient tenant lieu de creuset puis déposés dans le four artisanal. Ainsi des matières plastiques, des métaux ferreux et non ferreux peuvent se trouver emprisonnés dans les déchets et vont « polluer » l'aluminium en fusion. Sans compter les traces d'huile de graisse, de peinture voire de terre que l'on va porter à haute température.

La fusion est réalisée dans un four creusé dans le sol sur une profondeur moyenne de 30 à 50 cm, aménagé pour recevoir le creuset (figure 3).

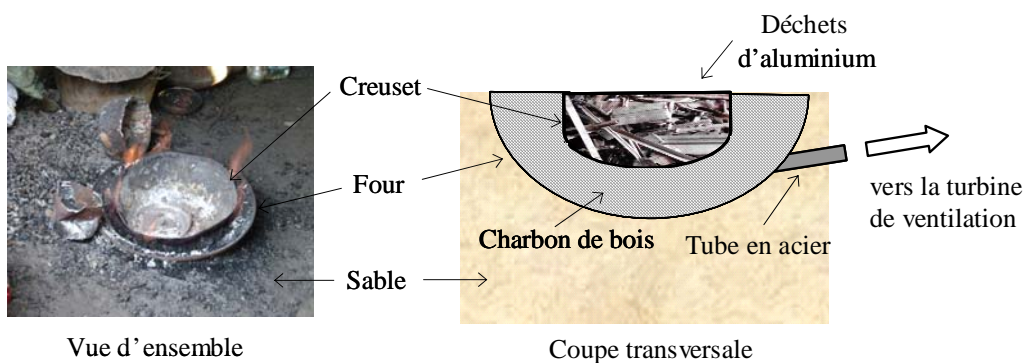


Figure 3 : *Four artisanal.*

Son diamètre au niveau du sol est compris entre 50 et 70 cm ; il est ventilé grâce à un tube d'acier qui débouche sous le creuset. L'autre extrémité de ce tube est reliée à une turbine actionnée manuellement (figure 4), chargée de propulser l'air nécessaire pour activer la combustion du charbon de bois.



Vue de face



Vue de profil



Vue de la manivelle

Figure 4 : *Turbine de ventilation du four artisanal.*

Cette turbine est un matériel de récupération provenant d'installations de ventilation industrielles ou de dispositifs de combustion du fuel sur des systèmes de chauffage industriels.

Le creuset est fabriqué dans une tôle d'acier récupérée sur des fûts contenant de l'huile ou des produits chimiques. Ces fûts sont découpés et martelés par les forgerons jusqu'à donner des demies sphères de tailles convenables (figure 5a).

Chaque fondeur dispose en moyenne de trois creusets de tailles différentes qu'il utilise suivant la quantité d'aluminium à fondre. Lors de la fusion, le creuset est recouvert d'une plaque de même nature limitant ainsi les pertes d'énergie par rayonnement.

La fusion est atteinte grâce à l'énergie fournie par la combustion du charbon de bois (figure 5b) qui demeure le combustible domestique le plus utilisé en Afrique, surtout dans les campagnes, car disponible et peu coûteux. Mais son pouvoir calorifique est assez faible (4500 kcal/kg^3) par rapport aux hydrocarbures (environ $30\,000 \text{ kcal/m}^3$ pour le butane⁴). Il est la seule source d'énergie dont le prix et la mise en œuvre restent à la portée des artisans.



(a)



(b)

Figure 5 : *Fusion artisanale des alliages d'aluminium au Sénégal :*

(a) creuset contenant des résidus de la fusion des déchets d'aluminium, (b) charbon de bois.

³ [fr.ekopedia.org/Charbon de bois](http://fr.ekopedia.org/Charbon_de_bois)

⁴ R. GICQUEL dans *Systèmes Energétiques* tome 2 applications, Ecole des Mines de Paris, Les Presses, Paris (2001).

Un sac de charbon de bois d'environ 25 kg est acheté entre 1500 et 2500 francs CFA (2,30 et 3,80 euros). Il s'agit d'un charbon de qualité inférieure appelé « poussière de charbon de bois », constitué de petits fragments qui rendent la combustion rapide. Les sacs de « poussière de charbon de bois » sont le plus souvent vendus directement aux artisans sans intermédiaires.

En omettant les pertes d'énergie, un calcul nous montre que moins de 100 grammes de charbon de bois sont nécessaires pour fondre un kilogramme d'aluminium. Dans la pratique, compte tenu d'importantes pertes thermiques, une quantité deux fois supérieure est requise. Ainsi, 25 kg de charbon de bois permettent de fondre entre 120 et 150 kg d'aluminium.

La fusion est longue, fonction de la quantité de matériaux contenue dans la charge : par exemple, pour fondre une vingtaine de kilos d'aluminium, 1h30 à 2 heures de chauffage sont nécessaires. Pendant cette opération, le four est régulièrement réapprovisionné en charbon de bois. Le creuset est alors déplacé pour permettre une bonne répartition du charbon de bois dans le four. Dans la pratique, il arrive que quelques morceaux de charbon de bois tombent dans le métal en fusion où ils brûlent et se transforment en cendres qui se mélangent aux scories.

Lorsque le métal fondu atteint une température comprise entre 650°C et 780°C, appréciée uniquement grâce à sa couleur, l'artisan « décrasse » le bain de métal fondu. Il enlève la croûte d'alumine et de scories formée en surface (figure 6a) et retire les morceaux de fer ou d'acier mélangés avec la matière première qui ne peuvent être fondus aux températures atteintes lors de la fusion de l'aluminium (figure 6b).

A ce stade de l'élaboration, certains fondeurs ajoutent une poignée de sel de cuisine (figure 6c) à la charge, dans le but d'agglomérer les dernières scories qui seraient encore prisonnières dans le bain de métal fondu. Le chlorure de sodium a en effet la propriété d'amalgamer les scories, facilitant ainsi leur élimination. Les fondeurs qui expérimentent ce procédé disent observer une amélioration de la fluidité de leur alliage. Cette pratique est récente et a été importée au Sénégal par des fondeurs ayant suivi un stage de formation au CTIF (Centre Technique Industriel de la Fonderie) à Paris en 2003. Ce stage fait partie du programme initié par l'Agence Intergouvernementale de la Francophonie et le gouvernement du Sénégal via la direction de l'artisanat pour la modernisation du secteur de la fonderie artisanale [réf projet : AG/DCE/mn/20030429-018] (voir chapitre 1).

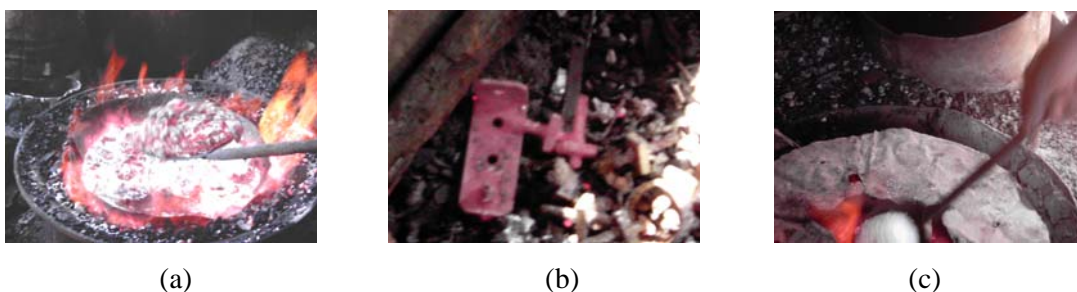


Figure 6 : *Opérations effectués en fin de fusion : (a) élimination de la croûte d'alumine et des scories ; (b) résidus de fer ou d'acier non fondus ; (c) ajout de sel de cuisine.*

3. Préparation du moule

Parmi les différentes techniques de fonderie connues actuellement, le moulage au sable avec modèle permanent est celle qu'utilisent les artisans fondeurs du Sénégal.

Le sable utilisé est naturellement silico-argileux. Il provient d'une carrière d'extraction située à une trentaine de kilomètres de Dakar. Au fil de son utilisation, les artisans renouvellent une partie ou la totalité de ce sable lorsqu'ils constatent qu'il perd ses propriétés de fonderie, c'est à dire quand un grand nombre de défauts, imputables à la qualité du sable, sont observés sur le produit final (soufflures, grosses porosités ...). Les artisans ne disposent d'aucun moyen scientifique pour apprécier la qualité de leur sable avant l'apparition de ces défauts. Pour être utilisé, le sable est malaxé et humidifié.

Le modèle nécessaire à la confection du moule est tout simplement une marmite achetée sur le marché local (figure 7a). Les châssis destinés à contenir le sable de moulage sont très rudimentaires car fabriqués à partir de bois de récupération (figure 7b).



(a) modèle



(b) châssis

Figure 7 : Modèle de marmite et exemple de châssis.

Leurs dimensions sont adaptées à la taille des marmites à fabriquer (tableau 3).

Dimension des châssis L x l x h (mm)	Appellation des marmites
610 x 610 x 540	30 kg
550 x 565 x 450	20 kg
540 x 530 x 450	15 kg
450 x 440 x 325	10 kg et 7 kg
380 x 370 x 290	5 kg et 4 kg
335 x 340 x 240	3 kg
330 x 335 x 225	2 kg et 1,5 kg
230 x 240 x 200	1 kg, 0,5 kg et 0,25 kg

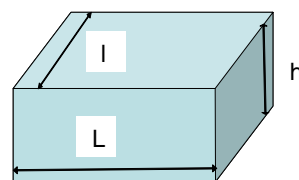


Tableau 3 : Dimensions des châssis utilisés pour la fabrication des marmites.

La connaissance empirique de la fonderie développée par les fondeurs les conduit à respecter une distance minimum de 2 à 3 cm entre le bord intérieur du châssis et la surface extérieure de l'objet à mouler.

Le processus de réalisation des moules suit un cheminement classique⁵ dans lequel les différentes phases ont été simplifiées. Tout est fait manuellement si bien que la fonderie est un travail éprouvant sur le plan physique (figure 8).

Le moule est constitué de deux parties assemblées au niveau du plan de joint (figure 9). Celui-ci se situe au niveau du bord supérieur de la marmite, là où vient se placer le couvercle. Cette disposition impose que les flans de la marmite soient « en dépouille », c'est à dire démoulables.

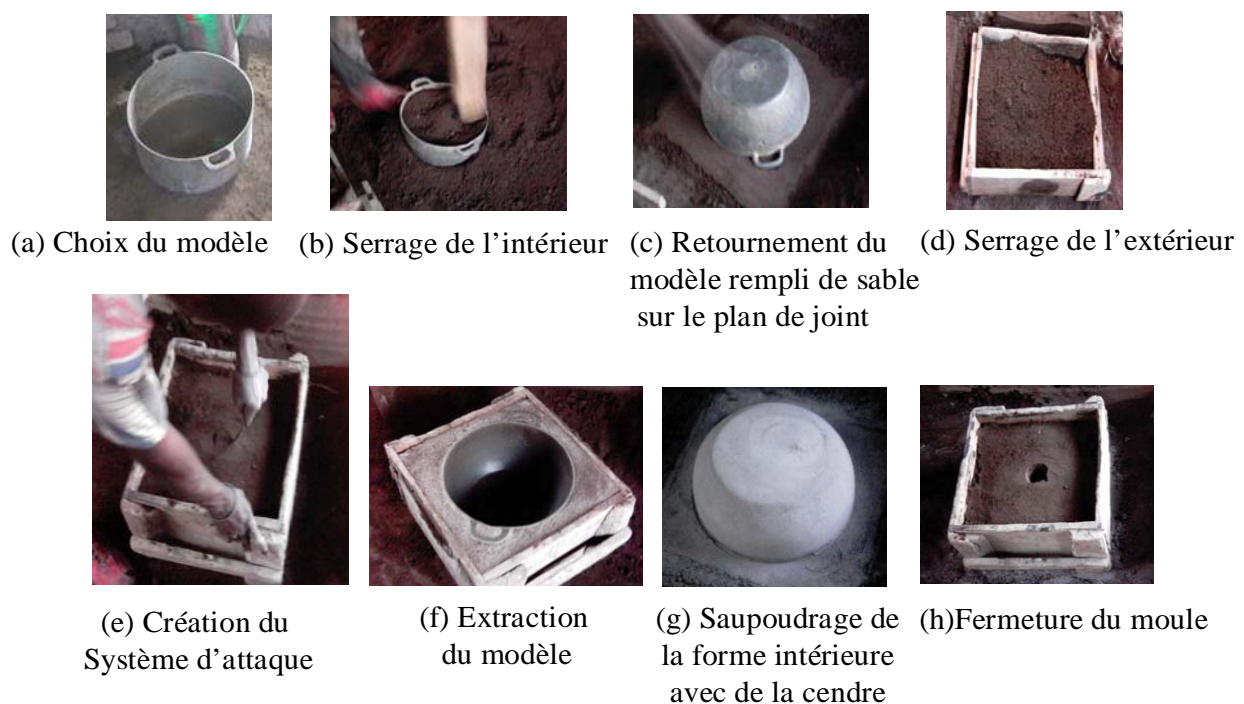


Figure 8 : Différentes étapes du moulage en sable d'une marmite par les artisans fondeurs du Sénégal.

Après avoir choisi le modèle de marmite (figure 8a), le fondeur prend son empreinte intérieure en compactant du sable à l'intérieur de celle-ci (figure 8b). Le modèle est ensuite retourné sur un lit de sable plan, préalablement confectionné par le fondeur, qui constitue le plan de joint du moule (figure 8c). Ainsi est formée l'empreinte intérieure de la marmite.

Un châssis de dimensions convenables est placé autour de cet ensemble de manière aussi centrée que possible. Il est à son tour rempli de sable que le fondeur tasse pour obtenir l'empreinte extérieure du modèle (figure 8d).

⁵ G. FACY et M. POMPIDOU dans *Précis de Fonderie, méthodologie, production et normalisation*, AFNOR (1983).

A l'aide d'une spatule, l'artisan dégage une cheminée circulaire débouchant au fond de la marmite servant de modèle (figure 8e). C'est le système d'attaque par où le métal en fusion sera introduit pour remplir le moule. Suivant la terminologie consacrée en fonderie, cette méthode d'alimentation est appelée « coulée en fontaine ». Le diamètre de cet orifice est calibré de telle sorte que le métal en fusion remplisse le moule le plus rapidement possible avant de se solidifier. Par exemple, pour une marmite de 1 kg de contenance, respectivement 30 kg, le diamètre du système d'attaque est d'environ 25 mm, respectivement 40 mm.

Le modèle est ensuite démoulé. Pour ce faire, le châssis, sur lequel l'artisan a pris la précaution de faire quelques repères de positionnement, est soulevé laissant sur place l'empreinte extérieure du modèle (figure 8f). Retirer le modèle du châssis est une opération délicate à réaliser car pouvant endommager le moule.

Les empreintes intérieure et extérieure du modèle sont saupoudrées de cendre de charbon de bois tamisée destinée à améliorer l'état de surface de la marmite (figure 8g). C'est aussi un moyen simple d'éviter « l'abreuvement » du moule c'est-à-dire la pénétration du métal liquide entre les grains de sable du moule dans la zone de contact proche de la surface.

Vient ensuite la reconstitution de moule, opération dont la réussite conditionne la qualité de l'objet réalisé (figure 8h). Il faut replacer la partie supérieure du moule (le châssis avec le sable) exactement à la place qu'il occupait lors de la réalisation de l'empreinte extérieure du modèle, en s'aidant des marques préalablement faites sur le châssis. Un mauvais positionnement du châssis va décentrer l'empreinte intérieure par rapport à l'empreinte extérieure, amenant un défaut sur l'épaisseur de la paroi de la marmite.

Le moule est alors prêt à être utilisé (figure 9).

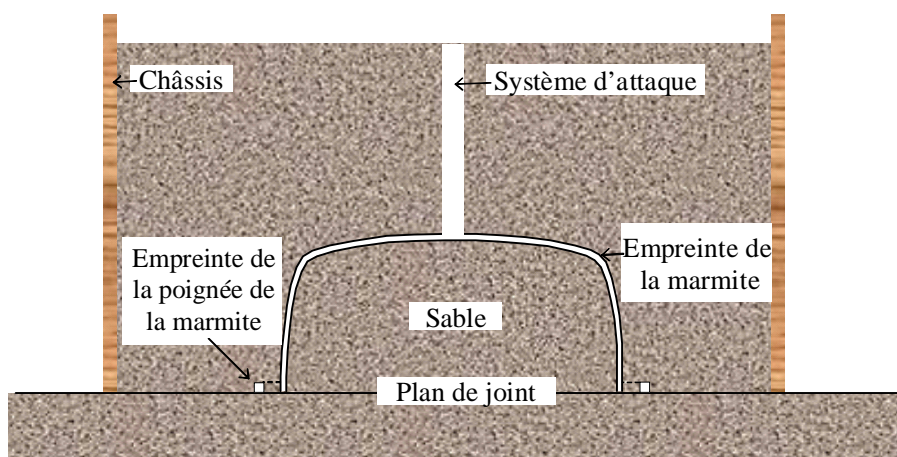


Figure 9 : Coupe transversale du moule.

4. Remplissage du moule

Pour introduire le métal dans le moule, le fondeur utilise une louche confectionnée par les menuisiers métalliques à partir de déchets d'acier. Le métal est introduit d'un seul trait dans le moule jusqu'à ce qu'il déborde du trou de coulée ou des trous des pieds comme le montre la figure 10.



Figure 10 : Remplissage du moule d'une marmite avec des pieds.

Remplir le moule en une seule fois est une nécessité car les « reprises » sont souvent sources de problèmes. En effet, les surfaces de raccord présentent une faible adhérence et peuvent être à l'origine de ruptures⁶. Si du métal s'échappe de l'un des trous lors du remplissage, le fondeur en coupe rapidement le sillon afin de le récupérer pour le réintroduire dans le creuset (figure 11).



Figure 11 : Récupération des morceaux d'aluminium solidifiés hors du moule.

5. Refroidissement et décochage des pièces

Après avoir rempli tous les moules en n'hésitant pas à chercher un peu de métal chez le voisin pour compléter, les artisans arrêtent le soufflet de ventilation du four et patientent quelques minutes, le temps que le métal se solidifie. Certains fondeurs versent de l'eau au-dessus du moule pour accélérer le refroidissement du métal (figure 12a).

Après 3 à 5 minutes d'attente, le métal s'est solidifié et la pièce peut ainsi être démoulée à l'aide d'une pelle ou d'un pic (figure 12b).

⁶ J.J. PERRIER et S. JACOB dans *Techniques de l'Ingénieur, Fonderie d'aluminium : défauts et conception des pièces*, dossier M 3 638 (2004).

Les fondeurs font attention à ne pas toucher l'objet moulé encore très chaud sous peine d'avoir de très sérieuses brûlures. Ils le manipulent alors à l'aide de pinces artisanales (figure 12c).

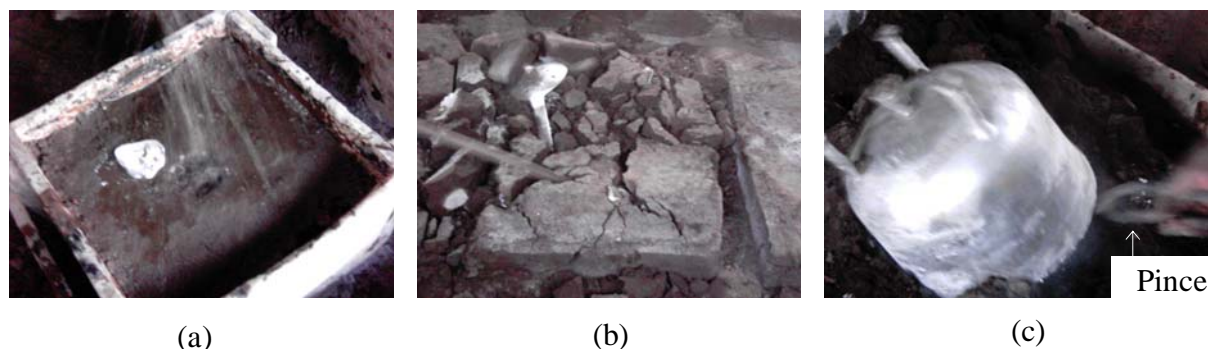


Figure 12 : *Refroidissement et démoulage d'une marmite :(a) refroidissement ; (b) démoulage ; (c) manipulation de l'objet moulé à l'aide d'une pince artisanale.*

Après démoulage, les fondeurs identifient et trient les objets présentant des défauts (figure 13a). Ce sont le plus souvent des manques liés à un mauvais remplissage du moule, consécutif à une mauvaise estimation de la fluidité du métal liquide. Lorsque les défauts sont importants, les objets sont refondus (figure 13b).



Figure 13 : *Ustensiles de cuisine présentant des défauts nécessitant leur recyclage :(a) défauts observés sur des louches et des écumoirs ; (b) fusion d'une marmite ayant des défauts.*

6. Finitions

Après démoulage, les objets entrent dans une étape de finition avant d'être commercialisés. La carotte de coulée est séparée de la marmite par sciage (figure 14). Celle-ci sera recyclée dans les coulées suivantes.



Figure 14 : *Sciage de la carotte de coulée d'une écumoire et d'une louche.*

Les objets sont ensuite confiés à un ouvrier chargé de les ébavurer et de polir les surfaces pour les rendre plus fonctionnelles et attrayantes. La surface extérieure de la marmite est limée (figure 15a), tandis la surface intérieure est raclée avec une lame d'acier courbée et aiguisée (figure 15b). L'intérieur de la marmite devient ainsi plus facile à nettoyer après utilisation.



(a)



(b)

Figure 15 : *Finitions des surfaces extérieure et intérieure : (a) finition à la lime de la surface extérieure d'une marmite ; (b) outil utilisé pour surfacer l'intérieur des marmites.*

Les objets sont ensuite exposés, quelquefois chez le fondeur, mais la plupart du temps, ils sont acheminés chez un commerçant (figure 16) en attendant un acquéreur.



Figure 16 : *Exposition d'ustensiles de cuisine chez un commerçant.*

ANNEXE III-2

Essai de granulométrie et d'équivalent de sable⁷

I. Analyse granulométrique par voie sèche (sur le sable)

But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers.

A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie, qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains, et la granularité, qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

Matériel nécessaire

Des tamis dont les ouvertures carrées, de dimension normalisée, sont réalisés soit à partir d'un maillage métallique, soit par perçage d'une tôle. Les passoires, qui comportent des trous ronds percés dans une tôle, ne sont plus utilisées actuellement. Pour un obtenir des résultats reproductibles, il est conseillé d'utiliser une machine à tamiser électrique (figure 1) qui imprime un mouvement vibratoire horizontal, ainsi que des secousses verticales, à la colonne de tamis.

La dimension nominale de tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent dans une progression géométrique de raison $\sqrt{10}$, depuis le tamis 0,08 mm jusqu'au tamis 80 mm. Pour des ouvertures inférieures à 0,08 mm, l'analyse granulométrique n'est pas adaptée et l'on peut procéder par sédimentométrie. L'existence antérieure de passoires (trous ronds) a conduit à une double classification des tamis et des passoires, tout en conservant pour chaque famille d'appareils la même progression géométrique des ouvertures.

⁷ Cours en ligne du professeur V. PHOUMMAVONG, Faculté d'Ingénierie et d'Architecture, Université Nationale du Laos, Matériaux de construction, ch. 3(http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_trois_exp.html).



Figure 1: *Tamiseuse électrique.*

Afin d'éviter toute ambiguïté, un tamis et une passoire équivalents ont été désignés par un même numéro de module. Les dimensions nominales normalisées des tamis, seuls appareils utilisés actuellement, sont les suivantes (tableau 1) :

Module	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis (mm)	0.08	0.100	0.125	0.160	0.200	0.250	0.315	0.400	0.500	0.630	0.800
Module	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis (mm)	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.30	8.00	10
Module	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
Tamis (mm)	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80		

Tableau 1 : *Dimensions nominales des tamis.*

Précautions

Cet essai est applicable à des granulats non souillés par une fraction argileuse significative. Il est donc impératif de prendre toutes les précautions nécessaires pour que les éléments fins, présents dans l'échantillon, ne soit pas perdus.

Pour les échantillons pollués par une fraction argileuse, il est nécessaire de procéder par voie humide. L'échantillon ainsi préparé est alors séché à $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Après refroidissement, il est pesé jusqu'à masse constante. Le tamisage à sec peut alors être réalisé.

Dimension de tamis utilisés

Pour les sables, on utilisera en général les tamis de modules 20, 23, 26, 39, 32, 35, 38. Pour les matériaux plus grossiers, tous les tamis au-delà du module 38 seront utilisés.

Préparation de l'échantillon

La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont contradictoires :

- Il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif ;
- Il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants.

Dans la pratique, la masse à utiliser est telle que : $M = 0,2 D$ avec M , masse de l'échantillon en kg et D diamètre du plus gros granulat, exprimé en mm.

Description de l'essai

Le matériau est séché à l'étuve à une température maximale de 105°C. On emboîte les tamis les uns sur les autres, dans un ordre tel que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. En partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers pour une analyse complémentaire. Un couvercle est disposé en haut de la colonne afin d'empêcher toute perte de matériau pendant le tamisage.

On appelle tamisat la masse du matériau passant à travers un tamis donné et refus la masse de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis (figure 2) et celle-ci entre en vibration à l'aide de la tamiseuse électrique. Le temps de tamisage varie avec le type de machine utilisé et dépend également de la charge de matériau présente sur le tamis et son ouverture. Un étalonnage de la machine est donc nécessaire. On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1 % entre deux séquences de vibrations de la tamiseuse.

Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé. Soit R_1 la masse de ce refus.

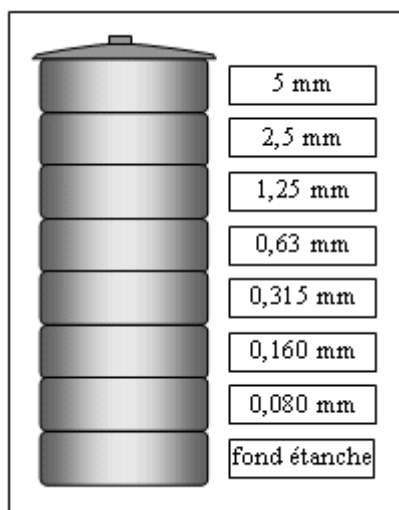


Figure 2: Colonne de tamis.

Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent. Soit R_2 la masse du deuxième refus. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R_n aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisat présent sur le fond de la colonne du tamis est également pesé.

La somme des refus cumulés mesurés sur les différents tamis et du tamisat sur le fond (fillers) doit coïncider avec la masse de l'échantillon introduit en tête de colonne. La perte éventuelle de matériaux pendant l'opération de tamisage ne doit pas excéder plus de 2% de la masse totale de l'échantillon de départ. Les résultats peuvent être présentés selon l'exemple donné par le tableau 2 :

Tamis en (mm)	Refus cumulés R_n en (g)	Refus cumulés En (%)	Tamisats cumulés en (%)
5	39	1,95	98,05
2,5	215	10,75	89,25
1,25	650	32,50	67,50
0,63	1380	69	31,00
0,315	1800	90	10,00
0,160	1910	95,50	4,50
0,080	1980	99,25	0,75
fillers	1999	100,00	0,00

Tableau 2 : Dimensions nominales des tamis.

Expression des résultats - Courbe granulométrique

Les pourcentages des refus cumulés, ou ceux des tamisats cumulés, sont représentés sous la forme d'une courbe granulométrie en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique, et les pourcentages en ordonnée, sur une échelle arithmétique. La courbe est tracée de manière continue et ne peut pas passer rigoureusement par tous les points (figure 3).

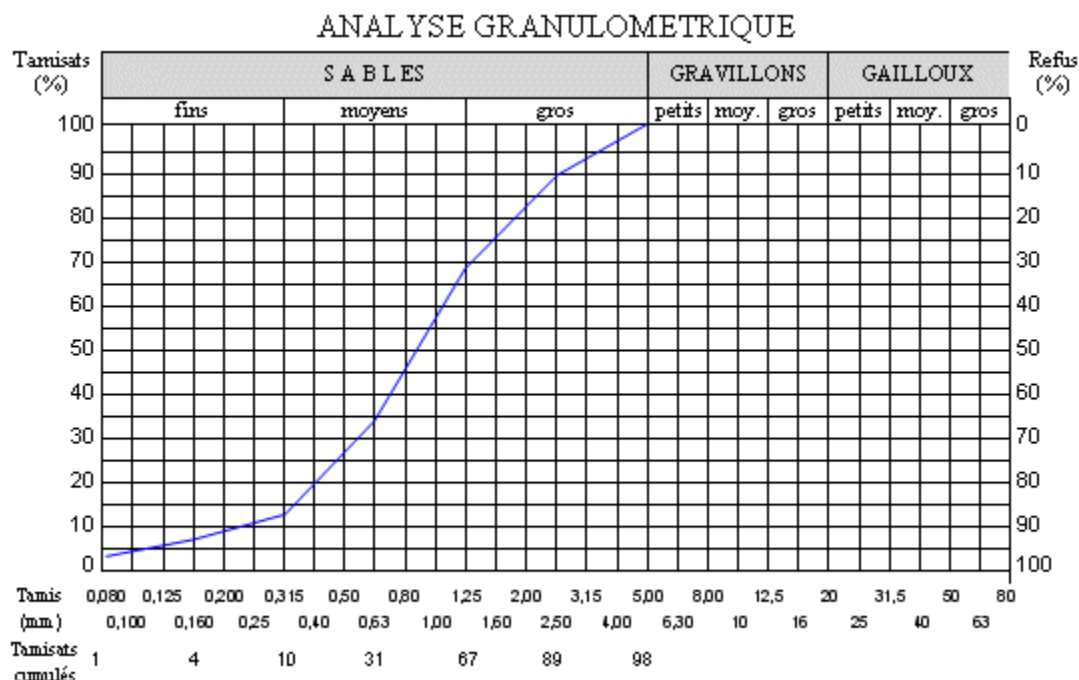


Figure 3 : Courbe granulométrique d'un sable.

II. Mesure la propreté des graviers (l'essai d'équivalent de sable)

La propreté des granulats peut s'apprécier de différentes façons, telles que l'essai au bleu de méthylène, l'essai d'équivalent de sable à 10 % de fines, etc. Dans notre étude, nous avons utilisé l'essai d'équivalent de sable.

But de l'essai

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les flocules fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

Principe de l'essai

L'essai est effectué sur la fraction 0/2 mm du sable à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants (figure 4) :

- hauteur h_1 : sable propre + éléments fins,
- hauteur h_2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention est égal à :

$$ES = \frac{h_1}{h_2} 100$$

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESV (équivalent de sable visuel) ou ES (équivalent de sable au piston).

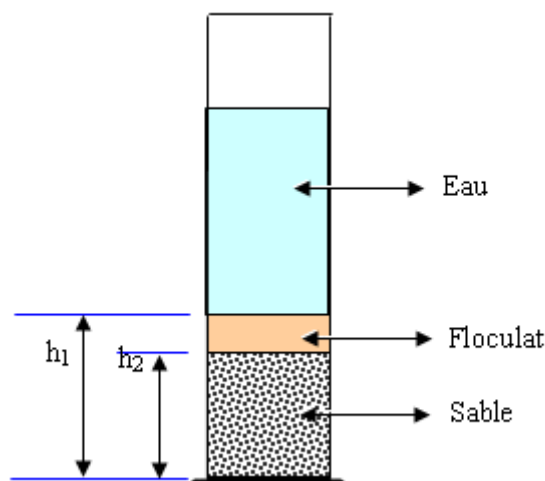


Figure 4 : Hauteurs utilisées pour la définition de l'équivalent de sable.

ANNEXE III-3

Réglementation

18 septembre 1987

JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

10849

Art. 13. - Pour délibérer valablement, les trois quarts des membres des commissions consultatives paritaires doivent être présents.

Lorsque le quorum n'est pas atteint, une nouvelle convocation est envoyée dans le délai de huit jours aux membres des commissions qui siègent alors valablement si la moitié de leurs membres sont présents.

Art. 14. - Les commissions mentionnées au présent arrêté donnent leur avis sur les candidatures aux emplois de direction correspondants.

Art. 15. - L'arrêté du 16 décembre 1971 instituant une commission consultative spéciale est abrogé.

Art. 16. - Le présent arrêté sera publié au *Journal officiel* de la République française.

Fait à Paris, le 27 août 1987.

*Le ministre délégué auprès du Premier ministre,
chargé de la fonction publique et du Plan,*

Pour le ministre et par délégation :

Le directeur du cabinet,

E. RATTE

*Le secrétaire d'Etat auprès du Premier ministre,
chargé de la jeunesse et des sports,*

Pour le secrétaire d'Etat et par délégation :

Le directeur du cabinet,

H. PARANT

MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE LA PRIVATISATION

Arrêté du 27 août 1987 relatif aux matériaux et objets en aluminium ou en alliages d'aluminium au contact des denrées, produits et boissons alimentaires

NOR : ECOC8700033A

Le ministre d'Etat, ministre de l'économie, des finances et de la privatisation, le ministre de l'industrie, des P. et T. et du tourisme, le ministre de l'agriculture, le ministre délégué auprès du ministre des affaires sociales et de l'emploi, chargé de la santé et de la famille, et le secrétaire d'Etat auprès du ministre d'Etat, ministre de l'économie, des finances et de la privatisation, chargé de la consommation et de la concurrence,

Vu la loi du 1^{er} août 1905 modifiée sur les fraudes et falsifications en matière de produits ou de services ;

Vu le décret n° 73-138 du 12 février 1973 portant application de la loi du 1^{er} août 1905 susvisée en ce qui concerne les produits chimiques dans l'alimentation humaine et les matériaux et objets au contact des denrées, produits et boissons destinés à l'alimentation de l'homme et des animaux ainsi que les procédés et produits utilisés pour le nettoyage de ces matériaux et objets ;

Vu l'avis émis par le Conseil supérieur d'hygiène publique de France le 25 juin 1985,

Arrêtent :

Art. 1^{er}. - Les matériaux et objets en aluminium ou en alliages d'aluminium détenus en vue de la vente, mis en vente ou vendus pour la mise au contact des denrées, produits et boissons alimentaires ainsi que lesdits matériaux et objets au contact de ces denrées, produits et boissons doivent satisfaire aux prescriptions du présent arrêté.

Art. 2. - L'aluminium utilisé pour la fabrication des matériaux et objets désignés à l'article 1^{er} doit contenir au moins 99 p. 100 d'aluminium.

Les impuretés, dont la teneur totale ne doit pas excéder 1 p. 100 en poids de l'aluminium, sont limitées de la manière suivante :

- fer + silicium < 1 p. 100 ;

- titane < 0,15 p. 100.

Chacun des éléments suivants :

- chrome, zinc, cuivre, manganèse, magnésium, nickel, étain < 0,10 p. 100 ;

- plomb, thallium, beryllium et chacune des autres impuretés présentes < 0,05 p. 100.

Une teneur en cuivre supérieure à 0,10 p. 100 (m/m) mais ne dépassant pas 0,20 p. 100 (m/m) est tolérée, pour autant que ni la teneur en chrome ni la teneur en manganèse ne dépassent 0,05 p. 100 (m/m).

Art. 3. - L'aluminium doit prédominer en poids sur chacun des autres éléments présents dans les alliages d'aluminium utilisés pour la fabrication des matériaux et objets désignés à l'article 1^{er}.

Les teneurs en poids des éléments qui peuvent être ajoutés dans les alliages d'aluminium ou qui y sont présents à l'état d'impuretés ne doivent pas excéder les valeurs suivantes :

- silicium < 13,5 p. 100 ;

- magnésium < 11 p. 100 ;

- manganèse < 4 p. 100 ;

- nickel < 3 p. 100 ;

- fer < 2 p. 100 ;

- cuivre < 0,6 p. 100 ;

- antimoine < 0,4 p. 100 ;

- chrome < 0,35 p. 100 ;

- titane < 0,3 p. 100 ;

- zirconium < 0,3 p. 100 ;

- zinc < 0,25 p. 100 ;

- strontium < 0,2 p. 100 ;

- étain < 0,10 p. 100.

Arsenic, tantale, beryllium, thallium, plomb et chacun des autres éléments présents < 0,05 p. 100 avec un total ne dépassant pas 0,15 p. 100.

Art. 4. - Les revêtements appliqués sur les matériaux et objets désignés à l'article 1^{er} doivent être conformes à la réglementation en vigueur les concernant.

Art. 5. - L'anodisation des matériaux et objets en aluminium ou en alliages d'aluminium, conformes aux dispositions des articles 2 et 3 du présent arrêté, ne peut être pratiquée que dans un bain dilué des acides ci-après énumérés, utilisés seuls ou en mélange :

- l'acide sulfurique ;
- l'acide sulfomaleïque ;
- l'acide sulfosalicylique ;
- l'acide oxalique ;
- l'acide phosphorique.

La couche anodique peut être colorée par des pigments ou colorants autorisés par la réglementation en vigueur relative aux matériaux et objets au contact des denrées alimentaires.

A l'exception des matériaux et objets en aluminium ou en alliages d'aluminium anodisés en milieu phosphorique ou recouverts d'un revêtement conforme à l'article 4 du présent arrêté, une opération finale de colmatage est obligatoire. Celle-ci doit être conduite à l'eau pure distillée ou déminéralisée contenant éventuellement au maximum 8 grammes d'acétate de nickel par litre et 1 gramme d'acétate de cobalt par litre ou l'un de ces deux sels aux concentrations maximales indiquées. L'ensemble des conditions techniques, notamment la température et la durée, doivent être choisies de telle manière que, à la fin de cette opération, la couche d'oxyde formée lors de l'anodisation perde son pouvoir absorbant dû à sa porosité naturelle et acquière une inertie optimale.

Art. 6. - Le directeur général de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes, le directeur général de l'industrie, le directeur général de l'alimentation et le directeur général de la santé sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent arrêté, qui sera publié au *Journal officiel* de la République française.

Fait à Paris, le 27 août 1987.

*Le ministre d'Etat, ministre de l'économie,
des finances et de la privatisation,*

Pour le ministre et par délégation :

Le directeur du cabinet,

J.-C. TRICHET

Le ministre de l'industrie, des P. et T. et du tourisme,

Pour le ministre et par délégation :

Le directeur du cabinet,

M. DE ROSEN

Le ministre de l'agriculture,

FRANÇOIS GUILLAUME

*Le ministre délégué auprès du ministre
des affaires sociales et de l'emploi,
chargé de la santé et de la famille,*

Pour le ministre et par délégation :

Le directeur du cabinet,

G. BERGER

*Le secrétaire d'Etat auprès du ministre d'Etat,
ministre de l'économie, des finances et de la privatisation,
chargé de la consommation et de la concurrence,*

Pour le secrétaire d'Etat et par délégation :

Le directeur du cabinet,

J. REILLER

ANNEXE III-4

Le microscope à force atomique (AFM)

L'AFM est un outil de caractérisation topographique des surfaces. Il utilise les forces d'interaction attractives ou répulsives entre l'extrémité d'une pointe et l'échantillon. Ces forces font fléchir la lame flexible sur laquelle est fixée la pointe. La déflexion est mesurée à l'aide d'un faisceau Laser qui, réfléchi sur l'extrémité de la lame, vient illuminer un capteur de positionnement de type détecteur à photodiodes (figure 1).

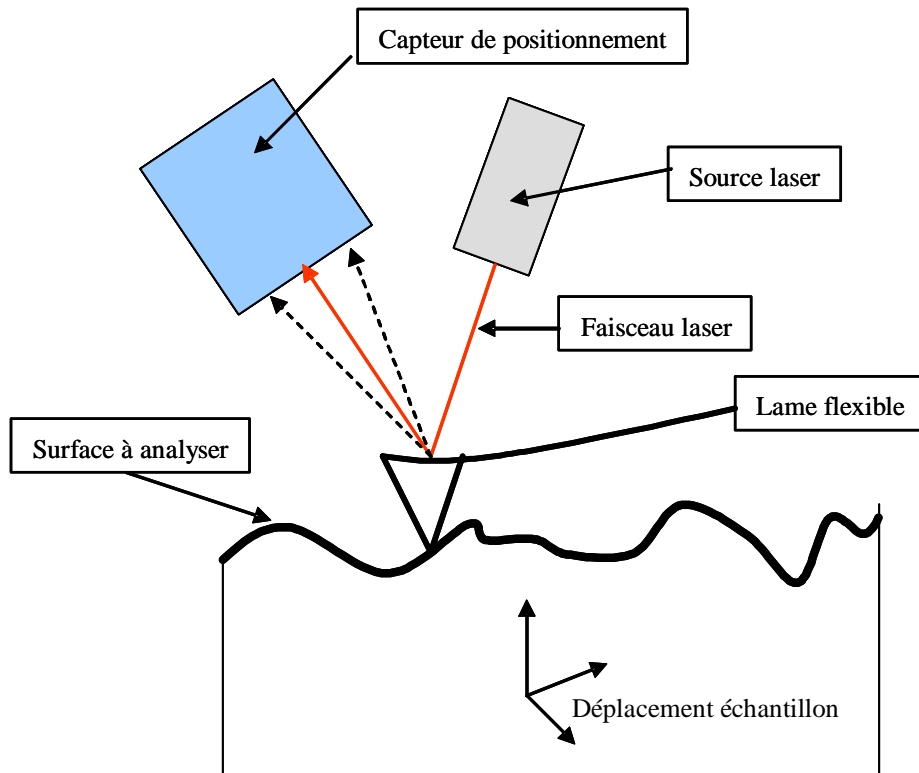


Figure 1: Principe de fonctionnement de l'AFM.

La réalisation d'une image en mode contact se fait de la manière suivante : une fois le contact pointe-surface établi, l'échantillon est déplacé de manière à effectuer un balayage de la surface en maintenant la force d'interaction constante. L'image de la surface est ainsi obtenue en enregistrant les déplacements verticaux et horizontaux de l'échantillon par rapport à la pointe. Le faible rayon de courbure de la pointe (environ 10 nm) permet à l'AFM de mesurer le relief d'une surface à l'échelle nanométrique.

A partir de l'image tridimensionnelle de la surface, de nombreux paramètres sont définis pour quantifier la rugosité. Celui que nous utilisons principalement dans la thèse est le paramètre statistique R_q qui est l'écart moyen quadratique du profil, c'est-à-dire la valeur moyenne quadratique des hauteurs du profil dans les limites de la longueur de base. Nous avons aussi accès à d'autres paramètres tels que :

R_a : Ecart moyen arithmétique du profil, c'est-à-dire la moyenne arithmétique des valeurs absolues des hauteurs du profil, dans les limites de la longueur de base. Il représente la variation moyenne de hauteur du profil par rapport à la ligne moyenne ;

R_p : Hauteur maximale de pic, c'est-à-dire la hauteur de pic la plus haute sur la longueur de base considérée ;

R_v : Profondeur maximale de vallée c'est-à-dire la profondeur du creux le plus profond sur la longueur de base considérée ;

$R_t = R_p - R_v$: différence entre la hauteur maximale de pic et la profondeur maximale de vallée.

ANNEXE III-5

La colorimétrie

(Extrait du livre « Analyse quantitative des Cations et des Anions⁸)

Il s'agit d'une technique d'analyse qualitative rapide d'une solution qui repose sur les couleurs des précipités qui se forment lors des réactions chimiques entre les ions de la solution et certains réactifs qui y sont introduits. Sa rapidité est un de ses principaux atouts : quelques secondes suffisent à confirmer la présence d'un ion dans une solution. Cependant, l'impossibilité de quantifier les ions et l'existence d'un seuil de détection font de la colorimétrie une technique imprécise. Elle doit donc être utilisée en complément d'une technique d'analyse quantitative plus précise. Elle a été utilisée pour tester la présence d'ions aluminium dans nos solutions de corrosion.

Détection des ions aluminium

Réaction

L'aurine tricarboxylate d'ammonium ou aluminon donne avec Al^{3+} en milieu un peu acide un composé colloïdal rouge.

Réactifs

Aluminon en solution aqueuse à 1 g par litre.

Tampon acétique : acétate de sodium 56g + eau 75 ml + acide acétique 25 ml.

NB: Le tampon acétique attaque peu à peu le verre avec passage d'un peu d'aluminium en solution.

Essai

Sur une plaque à godets, à une goutte de solution à essayer, ajouter une goutte de réactif et deux gouttes de solution tampon. Attendre quelques minutes.

Dans le cas de faibles concentrations d'aluminium, comparer à un témoin contenant le réactif et la solution tampon additionnés d'une goutte d'eau.

Limite de sensibilité 3 p.p.m.

Spécificité

Des séparations sont généralement nécessaires car un certain nombre d'ions donnent des colorations. Pour les colorations intenses, ce sont les ions Be^{2+} , Fe^{2+} , Ti^{4+} , Ga^{3+} , Sc^{3+} , pour les colorations légères, les ions Bi^{3+} , B^{3+} , Hg^{2+} , Mo^{4+} , V^{4+} , Zr^{4+} , Th^{4+} .

⁸ G. CHARLOT dans *Analyse Qualitative Rapide des Cations et des Anions*, DUNOD, Paris (1963).

Un certain nombre d'ions sont gênants par leur coloration propre, ce sont : Cu^{2+} , Co^{2+} , V^{5+} .

Enfin, les oxydants, tels que Pt^{4+} , Au^{3+} ... détruisent le colorant. On sépare donc ces ions gênants par l'une des deux méthodes suivantes :

- Pour une solution acide, on utilise le cupferron. A une goutte de la solution à tester, ajouter une goutte d'acide chlorhydrique 4N, 4 gouttes de cupferron et 20 à 30 gouttes d'acétate d'éthyle. Puis réaliser l'essai sur une goutte de cette nouvelle solution ;

- Pour les milieux alcalins, on utilise la soude 2N. A une goutte de solution, ajouter 4 gouttes de soude, puis faire bouillir et centrifuger. L'essai sera fait ensuite sur une goutte de la solution claire.

ANNEXE III-6

Le spectromètre d'émission à plasma induit (ICPMS)

Le couplage d'une torche à plasma avec un spectromètre de masse (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) est une technique permettant de doser en quelques minutes, plus de 50 éléments de la table périodique contenus dans une solution, avec des teneurs parfois inférieures à 1 µg/l (ppb).

La torche à plasma ionise l'échantillon à analyser et le spectromètre de masse quadripolaire sépare les ions suivant leur masse avant de les quantifier.

L'échantillon est amené jusqu'à la torche à plasma par une pompe péristaltique (figure 1, repère 1). Au contact avec l'argon, l'échantillon est alors nébulisé (figure 1, repère 2), puis transporté jusqu'au centre du plasma où les températures atteignent 6000°C à 8000°C. L'échantillon est alors atomisé puis ionisé dans sa totalité sous forme de cations monovalents (figure 1, repère 3). Une interface composée de deux cônes de nickel et d'une série de lentilles permet de focaliser les ions pour les amener au quadripôle pour la séparation en masse (figure 1, repère 4). Cette séparation est effectuée pour chaque ion en fonction du rapport masse atomique/charge. Le faisceau ionique est amené sur un détecteur de type multiplicateur d'électrons (figure 1, repère 5). L'ensemble du système est piloté par informatique.

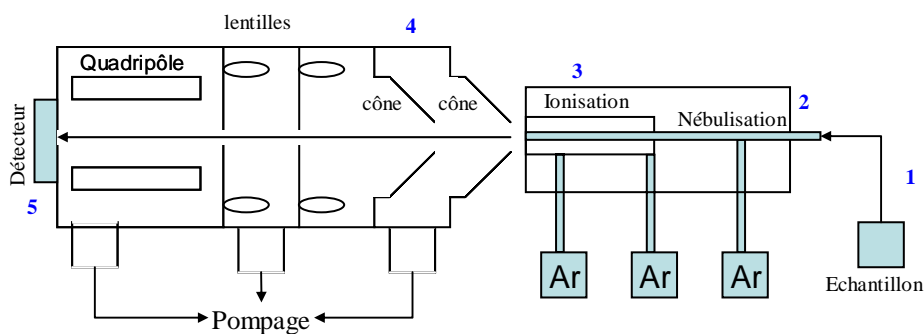


Figure 1 : Principe de fonctionnement de ICPMS.



ECOLE CENTRALE DE LYON
DIRECTION DE LA RECHERCHE

liste des personnes Habilitées à Diriger des Recherches en poste à l'Ecole Centrale de Lyon

Nom-Prénom	Corps grade	Laboratoire ou à défaut département ECL	Etablissement
AURIOL Philippe	professeur	CEGELY	ECL
BEROUAL Abderrahmane	professeur	CEGELY	ECL
JAFFREZIC-RENAULT Nicole	directeur de recherche	CEGELY	CNRS/ECL
KRÄHENBÜHL Laurent	directeur de recherche	CEGELY	CNRS/ECL
MARTELET Claude	professeur	CEGELY	ECL
NICOLAS Alain	professeur	CEGELY	ECL
NICOLAS Laurent	directeur de recherche	CEGELY	CNRS/ECL
SIMONET Pascal	chargé de recherche	CEGELY	CNRS/ECL
THOMAS Gérard	professeur	CEGELY	ECL
VOLLAIRE Christian	maître de conférences	CEGELY	ECL

Nbre Cégely 10

HELLOUIN Yves	maître de conférences	DER EEA	ECL
LE HELLEY Michel	professeur	DER EEA	ECL

Nbre DER EEA 2

GUIRALDENQ Pierre	professeur émérite	DER STMS	ECL
VINCENT Léo	professeur	DER STMS	ECL

Nbre DER STMS 2

LOHEAC Jean-Pierre	maître de conférences	ICJ	ECL
MAITRE Jean-François	professeur émérite	ICJ	ECL
MARION Martine	professeur	ICJ	ECL
MOUSSAOUI Mohand	professeur	ICJ	ECL
MUSY François	maître de conférences	ICJ	ECL
ROUY MIRONESCU Elisabeth	professeur	ICJ	ECL
ZINE Abdel-Malek	maître de conférences	ICJ	ECL

Nbre ICJ 7

DAVID Bertrand	professeur	ICTT	ECL
----------------	------------	------	-----

Nbre ICTT 1

CLOAREC Jean-Pierre	maître de conférences	LEOM	ECL
GAFFIOT Frédéric	professeur	LEOM	ECL
GAGNAIRE Alain	maître de conférences	LEOM	ECL
GARRIGUES Michel	directeur de recherche	LEOM	CNRS/ECL
GENDRY Michel	directeur de recherche	LEOM	CNRS/ECL
GRENET Geneviève	directeur de recherche	LEOM	CNRS/ECL
HOLLINGER Guy	directeur de recherche	LEOM	CNRS/ECL
JOSEPH Jacques	professeur	LEOM	ECL
KRAWCZYK Stanislas	directeur de recherche	LEOM	CNRS/ECL
MARTIN Jean-René	professeur émérite	LEOM	ECL
O'CONNOR Ian	maître de conférences	LEOM	ECL

PHANER-GOUTORBE Magali	professeur	LEOM	ECL
ROBACH Yves	professeur	LEOM	ECL
SOUTEYRAND Eliane	directeur de recherche	LEOM	CNRS/ECL
TARDY Jacques	directeur de recherche	LEOM	CNRS/ECL
VIKTOROVITCH Pierre	directeur de recherche	LEOM	CNRS/ECL

Nbre LEOM 16

CHEN Liming	professeur	LIRIS	ECL
-------------	------------	-------	-----

Nbre LIRIS 1

BAILLY Christophe	professeur	LMFA	ECL
BERTOGLIO Jean-Pierre	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
BLANC-BENON Philippe	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
CAMBON Claude	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
CARRIERE Philippe	chargé de recherche	LMFA	CNRS/ECL
CHAMPOUSSIN J-Claude	professeur émérite	LMFA	ECL
COMTE-BELLOT geneviève	professeur émérite	LMFA	ECL
FERRAND Pascal	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
GALLAND Marie-Annick	maître de conférences	LMFA	ECL
GODEFERD Fabien	chargé de recherche	LMFA	CNRS/ECL
HENRY Daniel	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
JEANDEL Denis	professeur	LMFA	ECL
JUVE Daniel	professeur	LMFA	ECL
LE RIBAUT Catherine	chargée de recherche	LMFA	CNRS/ECL
LEBOEUF Francis	professeur	LMFA	ECL
PERKINS Richard	professeur	LMFA	ECL
ROGER Michel	professeur	LMFA	ECL
SCOTT Julian	professeur	LMFA	ECL
SIMOENS Serge	chargé de recherche	LMFA	CNRS/ECL
TREBINJAC Isabelle	maître de conférences	LMFA	ECL

Nbre LMFA 20

BENAYOUN Stéphane	professeur	LTDS	ECL
CAMBOU Bernard	professeur	LTDS	ECL
COQUILLET Bernard	maître de conférences	LTDS	ECL
DANESCU Alexandre	maître de conférences	LTDS	ECL
FOUVRY Siegfried	chargé de recherche	LTDS	CNRS/ECL
GEORGES Jean-Marie	professeur émérite	LTDS	ECL
GUERRET Chrystelle	chargé de recherche	LTDS	CNRS/ECL
HERTZ Dominique	past	LTDS	ECL
ICHCHOU Mohamed	maître de conférences	LTDS	ECL
JEZEQUEL Louis	professeur	LTDS	ECL
JUVE Denyse	ingénieur de recherche	LTDS	ECL
KAPSA Philippe	directeur de recherche	LTDS	CNRS/ECL
LE BOT Alain	chargé de recherche	LTDS	CNRS/ECL
LOUBET Jean-Luc	directeur de recherche	LTDS	CNRS/ECL
MARTIN Jean-Michel	professeur	LTDS	ECL
MATHIA Thomas	directeur de recherche	LTDS	CNRS/ECL
MAZUYER Denis	professeur	LTDS	ECL
PERRET-LIAUDET Joël	maître de conférences	LTDS	ECL
SALVIA Michelle	maître de conférences	LTDS	ECL
SIDOROFF François	professeur	LTDS	ECL
STREMSDOERFER Guy	professeur	LTDS	ECL
THOUVEREZ Fabrice	professeur	LTDS	ECL
TREHEUX Daniel	professeur	LTDS	ECL
VANNES André-Bernard	professeur émérite	LTDS	ECL

Nbre LTDS 24

Total HdR ECL

91

AUTORISATION DE SOUTENANCE

Vu les dispositions de l'arrêté du 25 avril 2002,

Vu la demande du Directeur de Thèse

Madame S. BEC, Monsieur I.K. CISSE, Monsieur B. COQUILLET

et les rapports de

Monsieur A. C. BEYE

Professeur - Directeur du Groupe de Physique des Solides et Sciences des Matériaux (GPSSM) - Faculté des Sciences et Techniques - Université Cheikh Anta Diop de Dakar - BP 5376 - Dakar Fann - Sénégal

et de

Monsieur T. BRETHERAU

Directeur de Recherche CNRS - Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux (LIM) - Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers - 151 bd de l'Hôpital - 75013 PARIS

Monsieur NDIAYE Mamadou Babacar

est autorisé à soutenir une thèse pour l'obtention du grade de **DOCTEUR**

Ecole doctorale MATERIAUX

Fait à Ecully, le 19 octobre 2006

P/Le Directeur de l'E.C.L.
Le Directeur des Etudes



J. JOSEPH

RESUME

Le travail de recherche présenté dans le cadre de cette thèse, réalisée en cotutelle entre l'École Supérieure Polytechnique de Dakar (ESP) et l'École Centrale de Lyon (ECL), intitulé « *Le recyclage de métaux d'origine industrielle au Sénégal* » traite du problème du recyclage industriel des aciers et de celui, artisanal, des alliages d'aluminium. La question est abordée depuis la collecte des déchets jusqu'aux produits issus de leur valorisation : armatures pour béton armé et ustensiles de cuisine. Nous nous intéressons plus particulièrement à la qualité de ces produits. Il s'agit plus précisément des propriétés mécaniques des armatures en acier, qui se rompent parfois lors de leur mise en œuvre par pliage, et de la qualité alimentaire des alliages d'aluminium utilisés dans la fabrication d'ustensiles de cuisine et élaborés à partir de déchets provenant souvent de rebuts du secteur automobile. A l'issue de notre travail expérimental, nous avons déterminé une origine possible des défaillances des armatures à béton et avons montré, par des tests en milieu alimentaire, que les alliages d'aluminium utilisés ne présentent pas de dangers pour les usagers.

Cette étude s'inscrit dans une problématique environnementale à laquelle se trouvent confrontés de plus en plus de pays, compte tenu de l'accroissement de la consommation des ménages et de la raréfaction des ressources en matière première et en énergie. Dans ce contexte, nous avons ajouté une dimension humaine et sociétale à ce travail scientifique en le prolongeant par une action de formation auprès des jeunes populations. Cette action s'inscrit par ailleurs dans un projet plus large de la Direction de l'Enseignement Élémentaire du Sénégal, de rénovation de l'enseignement des sciences à l'école élémentaire. Un module pédagogique, destiné au cycle 3, a été créé autour de la thématique des déchets et de leur devenir, en tenant compte des spécificités de l'école sénégalaise et en relation avec la partie scientifique développée dans la thèse. Il s'appuie sur une méthode d'enseignement innovante, l'investigation raisonnée, grâce à laquelle l'élève se trouve placé en tant qu'acteur de sa propre formation.

L'originalité de cette recherche est donc qu'elle intègre l'ensemble des préoccupations, allant du traitement du déchet à l'éducation des populations, tout en restant centrée sur une problématique scientifique. Elle est une première concrétisation de l'accompagnement de l'école élémentaire par la communauté scientifique au Sénégal.

Mots clés : Sénégal, environnement, déchets, recyclage, acier, alliage d'aluminium, fonderie artisanale, qualité, éducation, module pédagogique, école élémentaire, investigation raisonnée.

ABSTRACT

This research work about "*Recycling of metals from industrial origin in Senegal*" was jointly supervised by Ecole Supérieure Polytechnique (ESP) in Senegal and Ecole Centrale de Lyon (ECL) in France. It is focused both on the industrial recycling of steel scrap and on the traditional recycling of aluminium alloys by casting. This work starts from the collection of the metal waste to its transformation into reinforcing steel bars for concrete or into aluminium kitchen utensils. The main point is the quality of the recycled products. The mechanical properties of the reinforcing steel bars, which occasionally break during bending, are investigated. The food compatibility with kitchen utensils made of recycled aluminium alloys, which often include automotive waste, is studied. From our results, possible causes of the reinforced steel bar breaking were identified and it seems that the kitchen utensils from scrap aluminium are not toxic.

This research comes within the scope of environmental questions that concern more and more countries because of the increasing household consumption and the growing raw material scarcity. That is why education of Senegalese children as social concern was also taken into consideration in this research. Thus, this work fits into the project of science teaching reforming in primary school, initiated by the Direction of primary teaching in Senegal. A specific teaching aid was created for science teaching in primary schools. This educational document deals with waste recycling and is connected with the scientific part of this work. Furthermore, it respects the scientific investigation approach which involves the pupil in the scientific research, in agreement with the Senegalese science teaching project.

Therefore, the originality of this research work is that it considers the problem in its entirety, from the waste treatment to the education of the population, while remaining focused on a scientific problematic. It is the first scientific community support dedicated to the primary teaching materialised in Senegal.

Keywords: Senegal, environment, waste, recycling, scrap steel, aluminium alloy, traditional casting, quality, education, teaching aid, primary school, scientific investigation approach.