HAL
open science

L'altération superficielle de dalles de granitoïdes sous climat tropical humide: proposition d'une méthode d'étude expérimentale.

Aka Crépin Kouassi

To cite this version:

Aka Crépin Kouassi. L'altération superficielle de dalles de granitoïdes sous climat tropical humide: proposition d'une méthode d'étude expérimentale.. Sciences of the Universe [physics]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2004. English. NNT : . pastel-00001081

HAL Id: pastel-00001081

https://pastel.hal.science/pastel-00001081v1

Submitted on 28 Feb 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Avant-Propos

Cette étude n'a été possible que grâce à l'aide de certaines personnes. Et je voudrai qu'elles trouvent en ces quelques lignes la manifestation de ma gratitude et de ma reconnaissance.

A Monsieur Jean-Michel LE CLÉAC'H, mon Directeur de Thèse, je voudrai dire simplement MERCI. Et cela, du FOND du CŒUR. Si ce travail a pu aller jusqu'à son terme, c'est bien grâce à sa disponibilité, son opiniâtreté, à sa rigueur scientifique, et à son sens des relations humaines. J'ai toujours pu trouver auprès de lui, le souffle nouveau pour faire rebondir mes recherches lorsque tout me semblait aller vers l'immobilisme.

Pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu accordé à ce travail, je voudrais marquer ma reconnaissance à Monsieur Vincent BARBIN, Professeur des Universités à l'UFR Sciences Exactes et Naturelles de l'Université de Reims, au Professeur Jacques TOURET du Vrije Universiteit d'Amsterdam ainsi qu'au Professeur Michel MADON Vice-Président de l'Université de Marne-la-Vallée. Ensuite, je voudrai remercier particulièrement Monsieur Michel DEVEUGHÈLE, Directeur du CGI qui, non seulement a accepter que le Centre de recherche dont il est en charge serve de cadre à ce travail, mais aussi a bien voulu participer à la révision de mon rapport de Thèse.

Je ne puis manquer de témoigner ma reconnaissance à Madame Martine AUDIGUIER, Enseignant-Chercheur, Adjointe au Directeur du CGI, pour m'avoir facilité les démarches administratives. A travers elle, je voudrais remercier tout le personnel du CGI-EMP pour sa disponibilité.

Je voudrais que les Collègues Chercheurs avec qui j'ai partagé ce cadre de recherche, trouvent en ces lignes, la manifestation de ma reconnaissance pour le soutien mutuel qui nous a permis de mener à terme nos travaux. Je pense particulièrement à Hervé Wright, Gwennou Le Mignon, Essaïeb. Hamdi, Nicolas Pollet, Rim Achour, Jamila Zilaf, Wilfried Latte, etc.

Je voudrais aussi marquer une reconnaissance particulière à Monsieur Marcel ARNOULD, Conseiller Scientifique du CGI, pour ses encouragements.

Je n'oublie pas Messieurs Jean du MOUZA et Jean-Alain FLEURISSON qui en 1999 m'ont fait découvrir la rigueur de la rédaction scientifique.

Enfin, que Ahou Angèle, Irys Ebah Axelle, Frédéric Sylvère, Junior Juvenal, ainsi que mes Frères et mes Sœurs trouvent en ces lignes mes sentiments de gratitude pour l'Amour qu'ils m'ont toujours témoigné.

Résumé

Les roches ornementales sont d'un usage généralisé dans les agglomérations urbaines notamment dans la région d'Abidjan où leur *beauté* la dispute à leur diversité. Dès lors, le souci qui habite l'utilisateur potentiel de ces matériaux ornementaux, est de savoir quel peut être leur comportement, face aux intempéries et autres changements climatiques qui sont le lot permanent ou quasi quotidien des zones tropicales humides. C'est la recherche d'une réponse à cette préoccupation qui a motivé ce travail, dont l'objectif final est de conduire, sous conditions météorologiques de la zone tropicale humide reproduites au laboratoire, des expérimentations relatives à l'évolution des certains types de matériaux ornementaux.

Le présent travail a donc porté sur la formalisation d'un modèle de climat tropical humide, ainsi que, sur des expérimentations *in vitro,* en vue de tester le dispositif expérimental devant mettre en œuvre les conditions climatiques subséquentes. De ce fait, la conception de ce dispositif expérimental a pris en compte les paramètres que sont : la vitesse d'impact des gouttes de pluie (2,3 $m.s^{-1}$), l'énergie calorifique et ses fluctuations qui s'expriment en des températures à la surface du *sol* variant entre 24 °C et 76°C, l'environnement hygrométrique qui oscille entre les saturations (pluies, et rosées nocturnes) et HR (humidité relative) égale à 85%, ainsi que la pluviosité (51 mètres d'eau par heure). Des plaques polies issues des gisements ivoiriens de roches ornementales d'Okrouyo (syénite) et de Yakala (granite rose) ont servi d'échantillons pour tester le dispositif expérimental.

Au bout de 6, 9, et 12 mois, on a numérisé des images de la surface polie des échantillons. Par la suite, à l'aide des logiciels Visilog 5.4 (Noesis, 2001) et Paint Shop Pro 5.0 (Jasc Software, 1998), on a mis en œuvre l'analyse colorimétrique d'images numérisées, retenue comme le mode d'investigation le plus approprié pour comparer les images obtenues à 12 mois, avec celles de départ. Cette comparaison a procédé par soustraction des images de départ, de celles à l'issue de 12 mois d'essai

L'étude des images issues des opérations de soustraction a dégagé qu'il existe une analogie entre le milieu de ferrallitisation, conséquence de l'altération météorique en climat tropical humide, et le milieu généré par la mise en œuvre du dispositif expérimental qu'on propose. Elle a aussi permis de se rendre compte que l'utilisation du matériau d'Okrouyo devrait se limiter à des revêtements intérieurs. Par contre celui de Yakala pourrait être utilisé à la fois pour des revêtements intérieurs et extérieurs.

Mots clés :

roche ornementale, altération météorique, facteur météorique, dispositif expérimental, image numérisée, analyse colorimétrique, ferruginisation

Abstract

Ornamental stones are commonly used in urban areas, particularly in the Abidjan region where their beauty vies with their range. Given this, the concern of the beholder of these ornamental materials is to know how they will behave in the bad weather conditions and other climatic changes observed continuously or almost everyday in tropical rain areas.

It is this concern which prompted the present study whose objective is to carry out experiments about the evolution of some kinds of ornamental materials by reproducing tropical-rain-area meteorological phenomena in a laboratory.

For this reason, this study consists in designing a model of tropical rain climate and performing experiments in vitro to test the apparatus used to create the relevant weather conditions.

To do this, the following variables were taken into account in the study: the speed of raindrop impacts (2,3 $m.s^{-1}$), calorific energy and its fluctuations expressed in surface temperature ranging from 24° C to 76° C, the hygrometric environment which varies from saturations (rains and nightly dewdrops) and a RH of 85%, as well as wetness (51 metres of water per hour).

Prototypes of ornamental stones made of Ivorian ornamental rock deposits from Okrouyo (syenite) and Yakala (rose granite) were used as samples to test the apparatus.

At each stage of a 6, 9 and 12-month experiment, the samples were digitalised. Later, using Visilog 5.4 (Noesis, 2001) and Paint Shop Pro 5.0 (Jasc Sofware, 1998), the colour image analysis of the digitalised pictures was started as the most appropriate mode of investigation for comparing the pictures obtained at the different stages of the experiment and those existing at the start. This comparison exercise consisted in removing the initial pictures from those obtained at the different stages of digitalisation.

The study of the pictures derived from the removal of the initial ones revealed that there exists a similarity between the areas of ferrallitisation a consequence of the weathering into tropical rain climate, and the area generated through the experimental design proposed herein.

Key word:

Ornamental rock, weathering, weathering factor, experimental device, digitalized image, colour image analysis, ferruginisation.

Table des matières

Avant-Propos i
Résumé ii
Abstract iii
Introduction 1
Chapitre 1 : Généralités sur les roches ornementales en conditions d'utilisation 3
I. Introduction 4
II. La roche ornementale : un matériau issu de la pierre de taille 4
1. Paramètres de sélection de la roche pour roches ornementales 4
1.1. Les paramètres physiques et mécaniques de la roche 4
1.2. L'aspect esthétique du matériau 6
2. Processus de fabrication 6
III. Altération météorique de la roche ornementale : rôle des facteurs intrinsèques et extrinsèques 7
1. Les microfissurations : facteur intrinsèque d'altération 8
1.1. Matrice rocheuse, porosité et microfissurations 8
1.2. Microfissuration et altération chimique 8
1.3. Microfissuration et altération physique 11
2. Facteurs climatiques et désagrégation des roches 12
2.1. L'altération physique. 12
2.1.1. Notion de cycles d'état provoqués par le climat. 12
2.1.2. Désagrégation sous l'effet du gradient thermique 13
2.1.3. Désagrégation sous l'effet du gradient hygrométrique 13
2.1.4. Désagrégation sous l'effet de la cristallisation des sels 14
2.1.5. Désagrégation sous l'effet des cycles gel-dégel 15
2.2. L'altération chimique: mécanisme de détérioration de la pierre. 17
2.2.1. Oxydation et réduction 17
2.2.2. L'hydratation 19
2.3. L'altération biologique: mécanisme de détérioration de la pierre 20
2.3.1. L'environnement biologique de la pierre 20
2.3.2. Mécanisme de désagrégation 20
IV. Conclusion 20
Chapitre 2 : Problématique de l'étude expérimentale 21
I. Introduction 22
II. Paramètres climatiques en région Sud de la Côte d'Ivoire 22
1. La Pluviométrie 22
1.1. Données sur la pluviométrie 22
1.2. Evolution mensuelle de la pluviométrie 24
1.3. Evolution annuelle de la pluviométrie à Abidjan (1937- 2000) 25
1.4. Répartition annuelle des jours de pluies. 26
1.5. Nombre moyen mensuel des jours de pluies 26
2. L'insolation dans l'agglomération d'Abidjan 26
2.1. Température à la surface du sol 27
2.2. Durée de l'insolation 28
2.3. Energie calorifique à la surface du sol 29

3. Humidité relative et tension de la vapeur d'eau 29
3.1. L'humidité relative 29
3.2. La tension de vapeur d'eau 30
III. Un modèle de facteurs climatiques 31
1. Analyse des variables 31
1.1. Le gradient thermique 31
1.2. Le gradient hygrométrique 32
1.2.1. Répartition annuelle des jours de précipitation 32
1.2.2. Répartition des heures de précipitation par 24 heures 32
1.2.3. L'intensité des précipitations 32
1.3. La composition chimique de l'eau de pluie 33
2. Paramétrage des facteurs climatiques 33
2.1. Facteurs liés au gradient hygrométrique 33
2.2. Facteurs liés au gradient thermique 35
IV. Modèle de facteurs climatiques et génération de cycles climatiques au laboratoire 36
1. Conception d'un dispositif approprié 36
1.1. Bases de conception 36
1.2. Prototype d'appareillage pour génération de l'énergie calorifique 37
1.3. Prototype d'appareillage pour génération du type de pluie 39
2. Dispositif : assemblage des prototypes et fonctionnement 41
3. Génération des cycles d'état relatifs au climat 42
3.1. Les gradients 42
3.1.1. Le gradient thermique 42
3.1.2. Le gradient hygrométrique 43
3.1.3. Chronogramme des opérations 44
V. Choix de l'analyse colorimétrique pour l'étude de l'évolution de la roche ornementale 45
1. Pertinence de l'analyse colorimétrique d'images numérisées 45
2. Mode de quantification d'une image numérisée 46
2.1. Prise en compte des paramètres de l'appareillage d'acquisition d'image 46
2.2. Expression des équations 47
3. Schéma de mise en œuvre 48
VI. Conclusion 51
Chapitre 3 : mise en œuvre et contrôle du modèle théorique 53
I. Introduction 54
II. Choix des roches ornementales des Gisements d'Okrouyo et de Yakala pour les expérimentations 54
1. Motivation des choix 54
2. Géologie du Gisement d'Okrouyo 56
2.1. Géographie et morphologie régionale 56
2.2. Géologie locale 57
2.3. Minéralisation et réserves 58
2.3.1. Etude pétrographique des syénites du Mt Troquoi 58
2.3.1.1. Analyse macroscopique 58
2.3.1.2. Analyse microscopique 60
2.3.2. Analyse de la microfissuration 63
2.3.3. Indications sur la pétrogenèse 63
2.3.4. Les réserves 66
3. Géologie du Gisement de Yakala 66

3.1. Géographie et morphologie régionale 66
3.2. Géologie locale 67
3.3. Minéralisation et réserves 68
3.3.1. Etude pétrographique des granites « roses » de Yakala 68
3.3.1.1. Analyse macroscopique 68
3.3.1.2. Analyse microscopique 68
3.3.2. Indications sur la pétrogenèse 69
3.3.3. Réserves 69
III. Conditionnement des échantillons 74
1. Préparation des échantillons 74
2. L'essai *« d'altération météorique »* accélérée des échantillons 74
3. Paramètres contrôlés au cours de l'expérience 75
3.1. L'eau servant à l'altération météorique 75
3.2. Le « régime de pluviosité » 76
3.3. La température à la surface de l'échantillon 76
3.4. Les phases de numérisation 78
IV. Analogie entre le modèle de laboratoire et les facteurs naturels de l'altération météorique 79
1. Le différentiel thermique 79
2. La pluviosité 80
3. Imbibition et séchage des échantillons 80
V. Analyse colorimétrique des images numérisées 81
1. Le pré-traitement préalable des images numérisées 81
1.1. Correction des écarts de luminosité et contraste, élimination du bruit 82
1.2. Redressement des images 83
2. Les images support des analyses 83
2.1. Segmentation des images pré-traitées 84
2.2. Images susceptibles de révéler les changements. 84
3. Analyse des images 85
3.1. Après 12 mois de conditionnement de l'échantillon de syénite 86
3.2. Après 12 mois de conditionnement de l'échantillon de granite 93
VI. Interprétations des résultats de l'analyse colorimétrique 100
1. Prise en compte du mode de fonctionnement du scanner 100
2. Evolution des revêtements 101
3. Analogie entre l'évolution du fer en milieu naturel et le mode de ferruginisation en milieu expérimental 102
VII. Conclusion 105
CONCLUSION GENERALE 106
Bibliographies 110
Annexes 118

Liste des figures

Figure 1: schéma du principe de façonnage de la roche ornementale 6
Figure 2: indication (Astérix) du type d'altération météorique en zone d'Abidjan 7
Figure 3: défauts ponctuels dans les cristaux naturels (d'après Bard, 1990) 9
Figure 4 : défauts cristallins complexes dans les cristaux naturels. 9
Figure 5: clivages et fissures visibles à l'œil nu dans un feldspath 9
Figure 6: processus d'interconnexion des microfissurations dans un granite 11
Figure 7: déformation dans une carotte de granite de St Gérard (Canada) 15
Figure 8: le système Na_2SO_4 / H_2O 17
Figure 9: les Zones climatiques de la Côte d'Ivoire 23
Figure 10 : stations météorologiques de Côte d'Ivoire 23
Figure 11: isohyètes (mm) moyennes annuelles 24
Figure 12: évolution mensuelle des hauteur d'eau max. (1981-2000) 24
Figure 13: évolution mensuelle des hauteur d'eau min. (1981-2000) 25
Figure 14: évolution mensuelle des hauteur d'eau moyennes (1981-2000) 25
Figure 15: évolution annuelle des hauteur d'eau (1937-2000) 25
Figure 16:évolution mensuelle des T°max. (1981-2000) 27
Figure 17: évolution mensuelle des T°min. (1981-2000) 27
Figure 18: évolution mensuelle des températures moyennes. (1981-2000) 27
Figure 19: évolution mensuelle de la durée de l'insolation max. (1981-2000) 28
Figure 20: évolution mensuelle de la durée de l'insolation min. (1981-2000) 28
Figure 21: évolution mensuelle de la durée de l'insolation moyenne. (1981-2000) 28
Figure 22: évolution des moyennes mensuelles de l'énergie calorifique à la surface du sol (1981-2000) 29
Figure 23: variation des moyennes mensuelles (1981-2000) de l'humidité relative 30
Figure 24: variation des moyennes mensuelles de la tension de vapeur d'eau (1981-2000) 30
Figure 25: variation du nombre moyen mensuel des jours de pluie (1981-2000). 32
Figure 26: variation de l'intensité moyenne mensuelle des pluies (1981-2000) 33
Figure 27: relation entre la vitesse d'impact et la hauteur de chute 34
Figure 28: schéma de la base de conception du dispositif expérimental 37
Figure 29: exemple de lampe halogène 38
Figure 30: schématisation de la problématique de la génération des pluies 39
Figure 31: le dispositif pour la simulation des intempéries 42
Figure 32: support des échantillons de plaque en verre 43
Figure 33: génération de l'énergie calorifique à la surface des plaques 43
Figure 34: simulation de la phase de pluie 44
Figure 35: gamuts de différents dispositif d'une chaîne numérique 46
Figure 36: représentation schématique du système RVB dans un repère tridimensionnel 47
Figure 37: séparation en composante TSL (Teinte, Luminosité, Saturation) 51
Figure 38: localisation des gisement des pierres ornementales en Côte d'Ivoire 55
Figure 39: localisation des Mt Troquoï 56
Figure 40: une vue des collines du Mt Troquoi 58
Figure 41: plaque polie de la syénite d'Okrouyo. 59

Figure 42: carte soulignant l'alternance des phénocristaux et des ferromagnésiens 60
Figure 43: planches photographiques de lames minces montrant la texture globale de la roche. 61
Figure 44: planches photographiques de lames minces montrant quelques minéraux. 62
Figure 45: cristal d'orthose (Or) montrant une macle et de nombreuses fissures. 62
Figure 46: fissurations dans la syénite d'Okrouyo indiquées par les flèches. 63
Figure 47: processus [(1)]de (tuilage) à l'origine des textures cumulatives 64
Figure 48: image mettant en évidence les formes des phénocristaux d'orthose perthitique 65
Figure 49: phénocristaux disloqué en deux morceaux 65
Figure 50: localisation des gisements de Yakala 67
Figure 51: une vue des collines du Mt Mariame 67
Figure 52: plaque polie du granite rose de Yakala. 68
Figure 53: planches photographiques de lames minces du granite rose 70
Figure 54: planches photographiques de lames minces du granite rose 71
Figure 55: carte des contours des grains 72
Figure 56: exemple de cristaux à jonction simple 72
Figure 57: une vue des clivages d'un feldspath rose du granite de Yakala 73
Figure 58: représentation schématique de la distribution des clivages. 73
Figure 59: schéma relatif aux spécifications des échantillons 74
Figure 60: schéma relatif au mode de choix des points communs 83
Figure 61: image de l'échantillon de syénite 87
Figure 62: variation de couleur entre t= 0 et t=12 mois de l'échantillon de syénite. 88
Figure 63: décomposition en composante TSL de l'image variation de couleur résultant de l'opération 89
Figure 64: un détail de la surface de l'échantillon de syénite cadrée selon les coordonnées X=100, et Y = 600 89
Figure 65: un détail de la surface de l'échantillon de syénite cadrée selon les coordonnées X=00, et Y = 00 89
Figure 66: un détail de la surface de l'échantillon de syénite cadrée selon les coordonnées X=1000, et Y = 100 90
Figure 67: un détail de la surface de l'échantillon de syénite cadrée selon les coordonnées X=170, et Y = 870 90
Figure 68: carte de la variation de teinte après 12 mois d'essais sur l'échantillon de syénite 90
Figure 69: images des différentes phases minéralogiques de l'échantillon de syénite 91
Figure 70 : histogramme des composantes RVB des images de variation de couleur en 12 mois 92
Figure 71: carte de la variation de teinte après 12 mois d'essai sur l'échantillon de syénite 93
Figure 72: image de l'échantillon de granite rose 95
Figure 73: variation de couleur entre t= 0 et t=12 mois de l'échantillon de granite rose. 95
Figure 74: décomposition en composante TSL de l'image variation de couleur résultant de l'opération 96
Figure 75: un détail de la surface de l'échantillon de granite rose avec les contours des minéraux 96
Figure 76: images des différentes phases minéralogiques de l'échantillon de granite 97
Figure 77: histogramme des composantes RVB des images de variation de couleur en 12 mois 98

Figure 78: carte de la variation de teinte après 12 mois d'essai sur l'échantillon du granite 99
Figure 79: carte de la variation de teinte après 12 mois d'essai 99
Figure 80: exemple vérifiant la relation couleur égale interaction lumière / matière..... 119
Figure 81 : représentation schématique de l'expérience de Newton,..... 120
Figure 82: représentation schématique du spectre visible du rayonnement électromagnétique 120
Figure 83: schéma de l'organe humain de la perception visuelle 121
Figure 84: courbe de sensibilité de l'organe visuel aux spectres lumineux 121
Figure 85: sensibilité de l'œil humain aux radiations 123
Figure 86: influence de la variation de l'intensité lumineuse sur une couleur..... 123
Figure 87 : exemple de distorsions induites par les conditions de visualisation 124
Figure 88: processus de construction de l'arbre de chromaticité de Munsell [1905]..... 126
Figure 89: représentation schématique du cercle chromatique de Munsell..... 126
Figure 90: schématisation du principe de la synthèse additive 127
Figure 91: schéma du principe de la synthèse soustractive 128
Figure 92: schéma de la procédure de construction du cercle chromatique 128
Figure 93: schéma de la procédure de construction de la mesure TSL des couleurs..... 129
Figure 94: courbes des coefficients de distribution pour les primaires RVB..... 130
Figure 95: courbes des coefficients de distribution pour les primaires XYZ 131
Figure 96: le diagramme de chromaticité..... 132
Figure 97: schéma de construction de l'espace couleur CIE L a* b*..... 133
Figure 98: les ellipses de Mac Adam grossies 10 X dans le diagramme **x, y**..... 133
Figure 99: représentation schématique de la circulation générale des masses d'air en Afrique 135
Figure 100: coupe méridienne du F.I.T. avec Zones et types de temps associés 137
Figure 101: noyaux cratoniques de l'Afrique..... 147
Figure 102 : carte géologique schématique de l'Afrique occidentale 148
Figure 103: carte schématique de la Dorsale de Man 149
Figure 104 : schéma simplifié des ensembles géologiques en Côte d'Ivoire..... 149
Figure 105 : Archéen du craton Ouest-Africain en Côte d'Ivoire. 150
Figure 106 : carte du bassin sédimentaire de la Côte d'Ivoire modifié 156
Figure 107: coupe longitudinale schématique..... 156

Liste des tableaux

Tableau 1: classification des gisements de roches ornementales 5
Tableau 2: échelle d'altération des massifs granitiques 10
Tableau 3: coefficient moyen de dilatation linéaire de certains minéraux et roches 16
Tableau 4: mécanisme générant la dilatation ou le rétrécissement de la pierre sous l'effet du taux d'humidité 16
Tableau 5: propriété des éléments chimiques en relation avec leur potentiel ionique 18
Tableau 6: nombre moyen mensuel de jours de pluie 26
Tableau 7: matrice de corrélation entre les variables 31
Tableau 8: analyse de la valeur de l'énergie calorifique du mois d'avril 31
Tableau 9: pourcentage des types de précipitation 32
Tableau 10: composition chimique de l'eau de pluie (ABIDJAN) 33
Tableau 11: chronogramme des opérations de reproduction des facteurs climatiques de l'altération météorique 44
Tableau 12: différentiels thermiques associés au changement 78
Tableau 13: phases de coloris et leur composition minéralogique 84
Tableau 14: proportion des phases de coloris de l'image de l'échantillon de syénite 92
Tableau 15: proportion des phases de coloris de l'image de l'échantillon de granite 98
Tableau 16 : valeur des paramètres de distribution des pixels « Rouge » 103
Tableau 17 : valeur des paramètres de distribution des pixels « Rouge » 103
Tableau 18: composition chimique primaire des principaux minéraux de la syénite d'Okrouyo et du granite de Yakala 103
Tableau 19: influence du F.I.T. sur les masses d'air. 137
Tableau 20 : température Max mensuelle au-dessus du sol (°C) à ABIDJAN 143
Tableau 21 : insolation mensuelle (en heure) à Abidjan 144
Tableau 22 : pluviométrie mensuelle (en mm) dans l'agglomération d'Abidjan 145
Tableau 23 : rayonnement global normal mensuel à Abidjan de 1981 à 2000 145

Introduction

La nécessité de proposer un protocole expérimental original s'est imposée, lorsqu'il s'est agi d'étudier l'évolution de roches ornementales d'origine magmatique, quand celles-ci sont placées en conditions d'utilisation.

Rapportées au contexte ivoirien, les investigations relatives à ces conditions d'évolution des roches ornementales s'inscrivent, elles-mêmes, dans une étude plus complète dont les objectifs, à terme, sont de cerner les différentes formes possibles (carrelage, revêtement intérieur, protection murale) d'utilisation des matériaux ivoiriens comme pierre d'ouvrage, sous climat tropical humide.

Ce faisant, cela offrirait des perspectives d'une exploitation des gisements ivoiriens de roches ornementales, et donc, une valorisation de ces ressources. Une telle valorisation s'inscrivant depuis 1998, dans une politique de réorientation de l'économie ivoirienne jusque-là rivée sur l'agriculture et, à un degré moindre, sur l'agro-industrie avec laquelle elle totalise les 2/3 des produits d'exportation.

Observer l'évolution des roches ornementales d'origine magmatique en conditions d'utilisation s'inscrit entre autre, dans une problématique d'étude de l'altération météorique de ces matériaux.

Si l'on se réfère aux conclusions de Pédro [1964], à propos de l'expérience en case réalisée à Versailles, on prévoit que les investigations relatives à cette altération météorique, ne peuvent s'inscrire dans une méthodologie qui se baserait exclusivement sur une exposition aux intempéries de la pierre ouvragée.

D'où la nécessité d'un dispositif expérimental qui pourra favoriser l'accélération de l'action des facteurs météoriques de transformation des matériaux à éprouver.

L'étude expérimentale de l'altération météorique de matériaux rocheux, en elle-même, ne constitue pas un programme inédit. Le dispositif le plus célèbre est l'Extracteur Soxhlet de Pédro [1964] qui a connu, par la suite et, à des fins spécifiques, plusieurs modifications dont le Soxhlet double, utilisé par Porokhovoï [1995] dans le cadre de ses études sur la stabilité à long terme des talus de mines à ciel ouvert, dans les massifs de roches basiques et ultrabasiques.

Cependant, on relève, lorsqu'il s'agit de l'observation de l'évolution de roches ornementales soumis à des intempéries, l'éventualité de la non-pertinence de l'exploitation du principe même de l'Extracteur Soxhlet, tant les paramètres qui pilotent l'une et l'autre expérimentation sont susceptibles de révéler des spéciations.

En effet, les critères spécifiques d'esthétique qui confèrent de la valeur à ce type de matériau, imposent que les expérimentations portent principalement sur la face polie de la roche ornementale. A ces critères, vient s'adjoindre, la recherche d'un mode approprié de connaissance de la roche ornementale, à un stade donné de son évolution.

Par ailleurs, ce mode de connaissance ne devra pas remettre en cause les investigations qui succéderont à la phase précédente ; voire même le principe de l'étude qui est, non seulement d'enregistrer les transformations, mais aussi et surtout, de suivre la façon dont celles-ci affectent et progressent dans les matériaux.

La nécessité de la proposition d'une méthode expérimentale pour l'étude de l'altération météorique des roches ornementales en climat tropical humide qui, se dégage ainsi de tout ce qui précède aura donc, suscité la présente étude et, orienté les réflexions vers l'approche suivante :

- d'abord, une modélisation des facteurs de l'altération météorique, en relation avec le climat tropical humide ;

- ensuite, un contrôle du modèle théorique, à travers sa mise en œuvre qui, bien sûr, passe par la construction d'un dispositif prenant en compte les objectifs que vise l'observation de l'évolution des roches ornementales.

Le premier chapitre de ce rapport qui rend compte de ces réflexions, va donc s'atteler, dans un premier temps, à rappeler certaines définitions relatives aux roches ornementales et, à procéder, ensuite, à une compilation succincte des connaissances en rapport avec l'altération météorique des matériaux rocheux. Dans un second temps, il dégagera les paramètres qui gouvernent les facteurs de l'altération météorique dans les conditions climatiques de la région sud de la Côte d'ivoire.

Cette région a été retenue, d'une part parce qu'elle est la zone ivoirienne typique du climat tropical humide et, d'autre part, parce qu'elle abrite l'agglomération d'Abidjan, ville qui regorge de constructions avec parements en roches ornementales, généralement importés, façonnés à partir de roches ornementales magmatiques, sédimentaires, ou métamorphiques.

A partir des points déjà dégagés, on développe dans un deuxième chapitre, un modèle de dispositif et un mode d'investigation à même de constituer une esquisse de la méthode expérimentale qu'on souhaite proposer.

Un troisième chapitre procède à une mise en œuvre et un contrôle en vue de la validation, ou non, de la méthode expérimentale esquissée au chapitre précédent.

Ce faisant, on a choisi, à partir de motivations qui seront exposées, les roches des gisements d'Okrouyo (syénite), et de Yakala (granite rose) pour confectionner des échantillons qui seront soumis à notre test d'altération en conditions climatiques simulées.

Enfin, dans une conclusion synthétique, on dégagera les enseignements tirés d'une telle expérimentation, notamment en ce qui concerne les variations d'aspect de ces roches au cours de l'altération, telles que mises en évidence par de mesures répétées dans le temps de luminance et de chrominance, sur les images numériques des échantillons, prises en cours d'essai.

Chapitre 1 : Généralités sur les roches ornementales en conditions d’utilisation

I. Introduction

La pierre est sans doute, le plus ancien matériau de construction connu de l'homme. Les maisons de pierre et les villes murées existaient avant l'âge de Bronze et les maçons, aussi primitifs qu'on puisse les supposer, en ont été parmi les premiers artisans (Bondy, 2002).

Les parements en dalle sont une forme élaborée d'utilisation du matériau pierreux. En travaux de construction, ce matériau est utilisé aussi bien pour des aspects de protection que de décoration.

Après avoir marqué le pas pendant plus de 50 ans, face au béton et aux structures métalliques, la construction en pierre s'est accélérée depuis le début des années 1980 (Bondy, 2002). Si elle continue de se développer comme produit de revêtement de sol ou de façade, elle retrouve aussi, sous forme de pierre massive, la faveur de grands architectes qui lui reconnaissent, notamment, des qualités environnementales : peu d'énergie consommée pour l'extraction et la transformation, pérennité du parement sans enduit ni peinture, confort thermique et acoustique, etc. L'architecture contemporaine s'exprime donc, de plus en plus, avec ce matériau ancestral.

Le but de ce chapitre est de rappeler, dans un premier temps les différents types de roches ornementales. Ensuite, dans un second temps, on fait une compilation des processus de dégradation de ces matériaux rocheux, l'objectif étant de relever les facteurs de l'altération météorique qui peuvent être modélisés

II. La roche ornementale : un matériau issu de la pierre de taille

1. Paramètres de sélection de la roche pour roches ornementales

Le matériau tout-venant à partir duquel sont façonnés les roches ornementales est constitué de blocs marchands, extraits de massifs rocheux qui, répondant à des critères donnés, sont qualifiés de gisement de roches ornementales *(tableau n°1)* ou encore de gisements de pierres de dimensionnelles selon la terminologie anglo-saxonne. En plus des critères techniques, en relation avec leur durabilité, auxquels doivent se conformer les matériaux pierreux, la valeur de la roche ornementale dépend aussi fortement de son aspect esthétique.

1.1. Les paramètres physiques et mécaniques de la roche

En 1995, Carreon Freyre a rappelé dans sa thèse, que dans l'industrie de la pierre de taille, la classification des roches ornementales, par rapport à leurs propriétés physiques et mécaniques, est basée sur trois caractéristiques principales à savoir :

- la vitesse du son, qui est directement fonction des propriétés élastiques et de la résistance à la compression ;
- la masse volumique apparente, qui renseigne sur le volume total des vides, d'où l'on déduit la porosité ;
- la dureté superficielle, qui permet d'attribuer une valeur comparative de la tenue à l'usure, à l'érosion et aux chocs.

Afin de définir l'aptitude de la roche à des usages spécifiques telles la protection et/ou la décoration, un certain nombre de paramètres sont déterminés par des tests en laboratoire. Ces tests sont, en général, effectués sur des éprouvettes. Les principales mesures portent sur :

- la masse volumique (g/cm^3) et la porosité (%) ;
- le coefficient d'absorption d'eau (%) ;
- la vitesse de propagation du son (ondes longitudinales) (m/s) ;
- la dureté superficielle (largeur de rayure en mm) ;
- l'essai d'usure au disque métallique (mm) ;
- la résistance à la compression simple RCS (MPa) ;
- la résistance à la flexion RF (MPa) ;
- essai de gel.

Des périodiques spécialisés de l'industrie de la pierre, tels la revue « *mines & carrières* », indiquent les intervalles pour lesquelles les valeurs de mesures sont admises.

Tableau 1: classification des gisements de roches ornementales

<table>
<tr><th colspan="3">Roches magmatiques</th><th>Roches Sédimentaires</th><th>Roches métamorphiques</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Roches volcaniques</td><td colspan="2">Roches intrusives</td><td rowspan="2">Conglomérats</td><td rowspan="2">Quartzites</td></tr>
<tr><td>Cristallisation de formes particulières</td><td>Cristallisées à gros grains</td></tr>
<tr><td>obsidienne</td><td>Porphyres : roches cristallines, cristaux de feldspath dans une pâte fine</td><td>Granites, granodiorites</td><td>Brèches</td><td>Schistes et ardoises</td></tr>
<tr><td>felsites</td><td>dolérites</td><td>diorites</td><td>Grès</td><td>micaschistes</td></tr>
<tr><td>basaltes</td><td rowspan="7">-</td><td>gabbros</td><td>Arkoses</td><td>gneiss</td></tr>
<tr><td rowspan="7">-</td><td>Péridotites et pyroxénites</td><td>Calcaires</td><td>Cipolins (marbres)</td></tr>
<tr><td rowspan="6">-</td><td>Dolomies</td><td>Amphibolites</td></tr>
<tr><td>Travertins</td><td>Serpentines</td></tr>
<tr><td>Onyx (siliceux)
Variété de quartz très finement cristallins . En couches alternées de couleurs variées</td><td rowspan="3">-</td></tr>
<tr><td>Onyx (calcaire) ou Marbre Onyx
Calcites colorées, rubanées ayant un aspect analogue à l'Onyx</td></tr>
<tr><td>Albâtre : Forme massive et finement cristalline du gypse</td></tr>
</table>

Source : Odent [1993]

1.2. L'aspect esthétique du matériau

Bien que subjectif, l'aspect esthétique du matériau n'en revêt pas moins une importance primordiale dans l'industrie de la roche ornementale, lorsque les paramètres relatifs aux propriétés physiques et mécaniques se sont déjà imposés.

Selon Castaing et Rabu [1993], par rapport à une roche de la même famille, le caractère esthétique d'une roche ornementale s'impose par l'originalité :

- de *sa couleur*, qui peut être un caractère originel de la roche ou acquis (oxydation des micas noirs dans les granites à deux micas);
- de *la composition minéralogique*. Le rapport minéraux colorés (biotites, amphiboles, pyroxènes, oxydes), minéraux clairs (quartz, feldspaths, micas blancs) définit la teinte globale de la roche ;
- de *la texture*, qui peut favoriser le succès commercial d'un matériau particulier ou en interdire totalement (texture écrasée) l'exploitation ;
- des *inclusions* (crapauds, filonnets) qui, au-dessus d'un seuil, sont plus ou moins néfastes.

2. Processus de fabrication

A partir du massif de roche ornementale, différentes techniques sont mises en œuvre pour l'extraction des blocs primaires (*découpage mécanique*, sciage avec haveuse–rouilleuse ou avec fil diamanté), et/ou le *découpage à l'explosif*, au *jet d'eau*, ou au *chalumeau*) pour produire les blocs marchands qui seront convoyés dans les ateliers en vue de la fabrication des roches ornementales. Dans les ateliers, le bloc marchand va subir les opérations de la figure n°1. Dans l'industrie de production de ces matériaux on dit qu'on procède au façonnage de la roche ornementale.

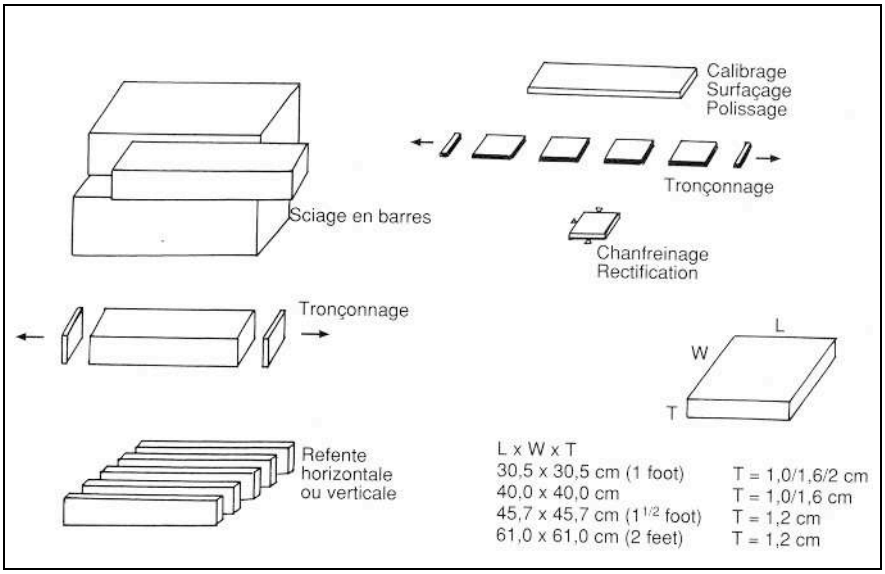


Figure 1: schéma du principe de façonnage de la roche ornementale

Source : Hubertmont [1993]

III. Altération météorique de la roche ornementale : rôle des facteurs intrinsèques et extrinsèques

Dans son cours de Géologie de l'Ingénieur, Arnould (ENPC, 1975), définit l'altération météorique des roches comme l'ensemble des modifications de leur état physique ou de leur composition minéralogique ou, de leur composition chimique totale ou en général de ces trois termes à la fois. Les altérations hydrothermales en étant exclues.

Dans les conditions primordiales qui interviennent dans l'altération de la roche utilisée sous la forme de pierre, on distingue les facteurs intrinsèques, en relation avec la nature de la roche mère et les microfissurations et, les facteurs extrinsèques fonction du climat *(fig.n°2)*, de l'environnement biologique et du temps. La durée étant une donnée essentielle en géologie.

Les mécanismes sont variés, d'ordre physique, chimique et biologique, l'eau et ses circulations jouant un rôle essentiel dans tous les cas.

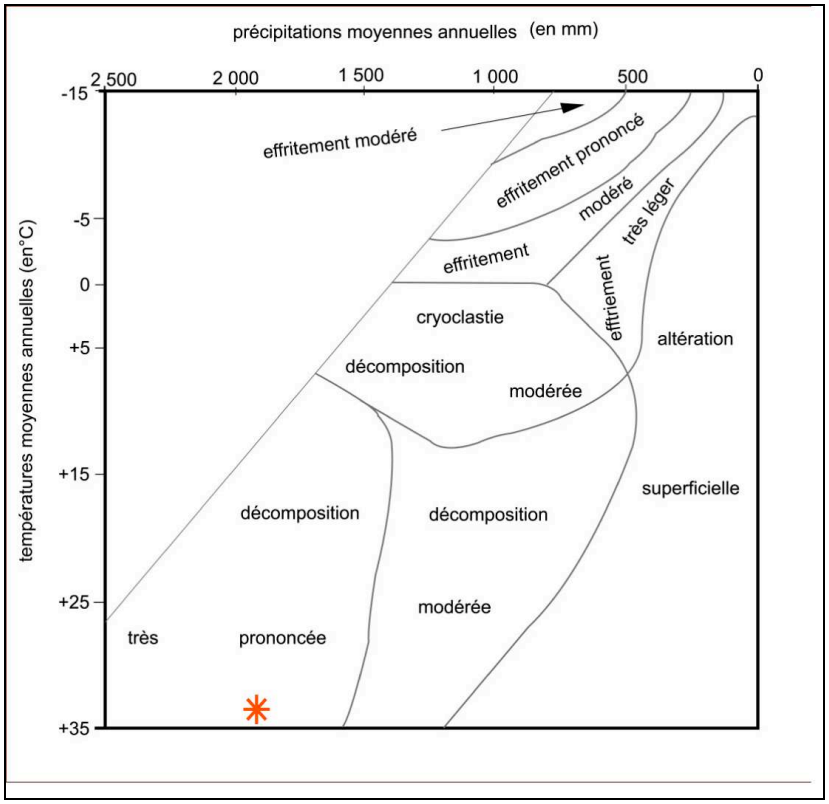


Figure 2: indication (Astérix) du type d'altération météorique en zone d'Abidjan en relation avec le temps en Côte d'Ivoire (annexe II).

<u>Remarques</u> :

Schéma réalisé à partir du graphique de Fookes et *al* [1971], qui établit une corrélation entre l'altération météorique et les facteurs climatiques que sont les températures et précipitations moyenne annuelles.

1. Les microfissurations : facteur intrinsèque d'altération

La vitesse d'altération météorique d'un massif rocheux est, avant tout, fonction de la nature de la roche saine, du type de climat auquel il est soumis et, de la topographie du terrain. De la roche saine aux *formations résiduelles*, la transformation d'un profil rocheux est un processus qui s'inscrit généralement dans une durée d'échelle géologique. Par exemple, d'après Anon [1995], sur des profils granitiques à Hong Kong, Ruxton a calculé en 1980, qu'il a fallu 170 siècles pour qu'ils soient affectés par une altération partielle *(tableau n°2)* sur une puissance de 4 mètres. Toujours d'après Anon [1995], à la suite de Ruxton, Fookes *et al* ont montré en 1988, qu'en fonction des paramètres qui commandent l'altération, le taux d'effruitement d'une surface affectée est aux alentours de 1 _m par an. Pour les conditions extrêmes mais rares, ce taux peut atteindre les valeurs maximales de 11,5 mm.

1.1. Matrice rocheuse, porosité et microfissurations

Dans une roche, on définit la matrice rocheuse comme la partie qui englobe les minéraux ; qu'ils soient de grande ou de petite taille. Selon le degré de cristallisation, les formes, les dimensions et les positions relatives dans la matrice, ces minéraux confèrent à la roche une microtexture. Dans le cas des roches grenues tels les massifs ornementaux ivoiriens, on peut définir les classes de microtextures par la taille des grains :

- à grain géant : Quelques centimètres (voire jusqu'au mètre dans certaines pegmatites) ;
- à gros grain : 2,5 à 5 mm ;
- à grain moyen : 1 à 5 mm ;
- microgrenues : moins de 1 mm ;
- aphanitique : dont les grains ne peuvent pas être vus à l'œil nu.

Selon les conditions de cristallisation (profondeur, température, et champ de contrainte), les cristaux des roches magmatiques sont très rarement dépourvues de défectuosités ou d'impuretés. Classiquement, on y distingue donc les deux grands types d'imperfections que sont les imperfections ponctuelles *(fig. n°3)* et les imperfections linéaires *(fig. n°4)*. Par ce fait, des zones de faiblesse cachées se créent dans la roche saine. Au stade d'*épigenèse*, la présence de ces zones de faiblesse entraîne le développement de la *fracturation génétique*. Plus tard, lorsque la roche est soumise à l'altération météorique ou est endommagée lors du façonnage, une fracturation secondaire *(fig. n°5)* se développe et se surimpose à la fracturation génétique.

1.2. Microfissuration et altération chimique

Lors de l'altération chimique, la combinaison formée par la présence de l'eau et sa circulation constitue une cause primordiale de dégradation (Bell, 1992). Une présence d'eau trop importante ou rapidement renouvelée dans la roche ne peut pas

provoquer une solution d'attaque efficace des minéraux, ladite solution étant alors vite diluée. Au contraire, une insuffisance d'eau dans la roche amène à la saturation rapide de la solution d'attaque et la cessation du processus. De la même façon, avec une présence d'eau quasi statique dans la roche, les premiers produits du processus chimique vont vite constituer une barrière de protection. En permettant donc une alimentation et une circulation *propice* des eaux, les clivages, les craquelures et les fracturations constituent les premiers réseaux de *chenaux* par lesquels les agents de l'altération chimique s'activent dans le cristal (Eggleton, 1986). Les travaux d'Anon [1995] sur le sujet amènent à la constatation suivante : une roche très fracturée et très perméable s'altère plus vite qu'une roche avec très peu de fissurations.

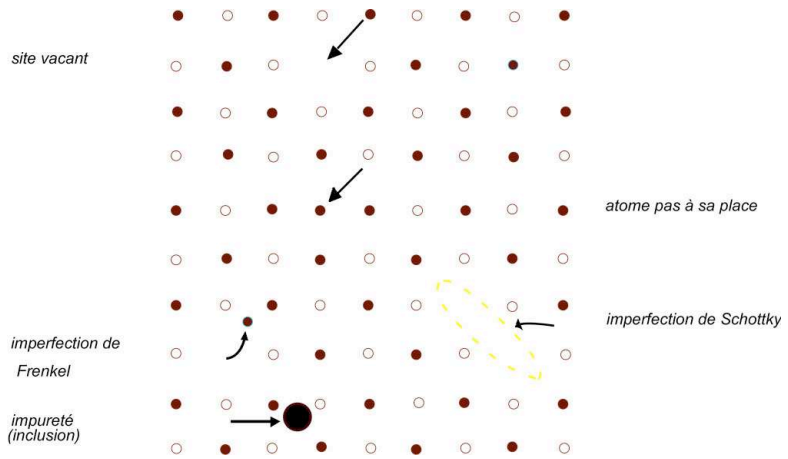


Figure 3: défauts ponctuels dans les cristaux naturels (d'après Bard, 1990)

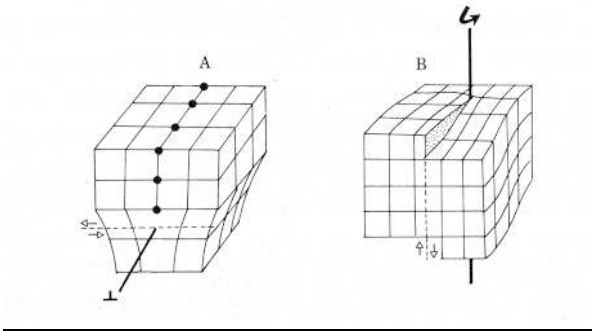


Figure 4 : défauts cristallins complexes dans les cristaux naturels.
coin (A) et dislocation –vis (B). Bard [1990]

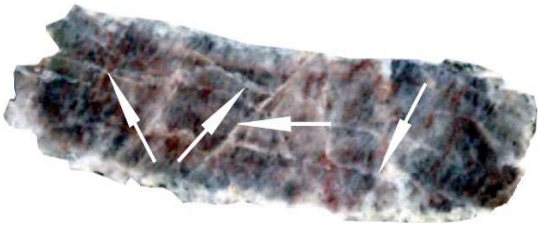


Figure 5: clivages et fissures visibles à l'œil nu dans un feldspath
(surface polie d'une syénite d'Okrouyo)

Tableau 2: échelle d'altération des massifs granitiques
(d'après Anon, 1995)

Classe d'altération	Etat	Description :		σ_c[3]	Indice de qualité		Porosité relative
		ANON [1995][1]	Approche géologique[2]		RQD[4] (%)	Proportion roche/sol (% de roche)	
Roche saine	I	Sans changement par rapport à l'état originel	Minéraux originels. Les feldspaths ne peuvent pas s'écailler au couteau.	Très élevée	Très élevé : 90-100	95-100	-
Roche légèrement altérée	II	Légère décoloration, localisée en surface, perte sensible de consolidation	Les plagioclases sont quelquefois légèrement détériorés. Les biotites sont légèrement détériorées sous la forme d'auréoles de tâches.	De très élevée à 50-60 % de sa valeur pour la roche saine	75-90	90-95	5% de plus que sa valeur pour la roche saine
Roche modérément altérée	III	Perte de consolidation. Mais prélèvement manuel d'échantillon impossible. Pénétration de la décoloration.	La plupart des plagioclases et des K-feldspaths sont modérément détériorés. Les biotites sont modérément détériorées sous la forme d'auréoles de taches. Les feldspaths peuvent être écaillés mais avec difficulté.	30% de sa valeur pour la roche saine	40-75	60-90	7% de plus que sa valeur pour la roche saine
Roche intensément altérée	IV	Mais prélèvement manuel d'échantillon impossible. L'échantillon sec ne se désagrège pas rapidement au contact de l'eau.	Les plagioclases sont intensément détériorés. La plupart des K-feldspaths sont modérément détériorés. Les biotites sont intensément détériorées, affectant de taches la roches	15% de sa valeur pour la roche saine	10-40	30-40	10% de plus que sa valeur pour la roche saine
Roche complètement altérée	V	Perte de consolidation très forte. L'échantillon sec ne se désagrège pas rapidement.. La texture originelle de la roche est toujours visible.	Les plagioclases, la plupart des feldspaths potassiques et les biotites sont complètement détériorés.	Extrêmement faible	0-10	0-30	20% de plus que sa valeur pour la roche saine
Sol résiduel	VI	Impossible de retrouver la texture de la roche altérée à partir de la formation résiduelle	Feldspaths et biotites se sont totalement décomposés en argiles	Extrêmement faible	0	0	Plus de 20% de plus que sa valeur pour la roche saine

[1]Basée sur les travaux de Moye [1955]

[2]Schéma pour altération de massif granitique en climat tropical humide. Exemple de massif de Bukit Timah au Singapour. D'après Zhao et al [1994]

[3]Résistance à la compression simple (en MPa). D'après les travaux de Irfan et Dearman [1978a]

[4]The Rock Quality Designation. Permet de qualifier la qualité de la roche en fonction de l'espacement des fractures et leurs conditions de genèse

1.3. Microfissuration et altération physique

Les conséquences de l'altération chimique, soutenues par les effets des cycles d'état provoqués par les climats *(paragraphe 2.1.1)*, conduisent à la connexion entre les clivages, les craquelures et les fracturations (SuzukI et *al,* 1995). L'interconnexion des microfissurations (*fig. n°6)* est une phase très importante dans le processus de désagrégation de la roche. L'existence d'un tel réseau est en effet nécessaire pour la circulation (suintement) des eaux dans le solide (Englman et *al* 1983).

En 1984, Robinson a étudié la relation entre ce réseau de microfissurations et la phase de début de percolation. Il a ainsi défini une valeur critique γ_c de densité de fissurations. Au-dessus de celle-ci, pour des valeurs de densité de fissuration $\gamma > \gamma_c$, la perméabilité de la roche commencera à évoluer vers des valeurs supérieures à celles de l'état initial. En 2D, il exprime γ avec la relation suivante:

$$\tilde{a} = \tilde{n} ? l^2 \qquad \ldots[1]$$

avec : _ : nombre de fissurations par unité de surface ;
l : la longueur de la fissuration.

En 1995, réécrivant en 3D la relation précédente qui ne fixe pas l'orientation (verticale ou horizontale) des fissurations, Suzuki et *al* ont défini la densité critique sous la forme générale

$$\tilde{a}' = (1/A) ? \acute{O} l^2 \qquad \ldots[2]$$

avec : A désignant la surface étudiée

Dans cette équation, _l^2 exprime la prise en compte de toutes les traces visibles dans la section analysée.

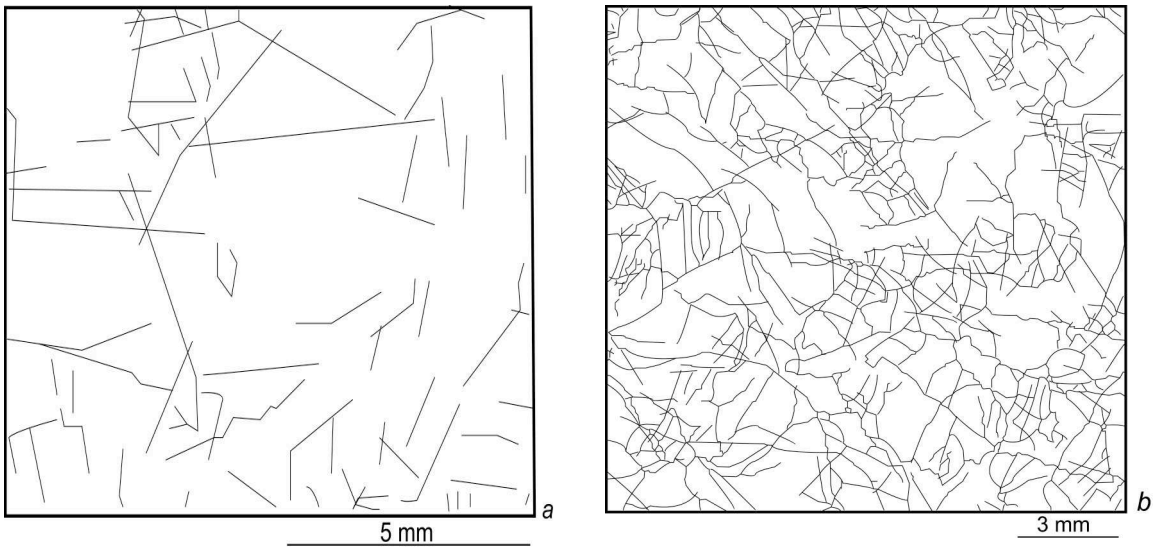


Figure 6: processus d'interconnexion des microfissurations dans un granite
a. traces après 670 jours d'observation. ***b.*** traces après 2000 jours d'observation
d'après les travaux de Suzuki et al [1995].

2. Facteurs climatiques et désagrégation des roches

2.1. L'altération physique.

L'altération physique a pour résultat la désagrégation de la roche. En milieu naturel, les principaux facteurs sont:

- les agents de l'érosion (vent, eaux de ruissellement, etc.)
- la foudre;
- les variations de températures;
- les gradients hygrométriques;
- le gel des roches poreuses;
- la cristallisation des sels.

2.1.1. Notion de cycles d'état provoqués par le climat.

L'incidence des cycles d'état provoqués par le climat sur l'altération des roches est connue depuis les travaux de Ansted [1871] qui soulignèrent la responsabilité du couple gel-dégel dans le processus de désagrégation mécanique des roches en milieu naturel. En 1924, Brown a considéré que la thermoclastie était tout aussi importante.

A la suite de ces premières observations, les travaux sur la connaissance du mécanisme de l'altération physique se sont développés avec Goudie [1985], qui étudia l'action de la cristallisation des sels et, Mc Greevy [1981] qui permit d'approfondir le rôle du couple gel-dégel.

Le mécanisme de désagrégation de la pierre dû à une variation périodique d'état opère à l'échelle des saisons, à l'échelle diurne ou sur un temps plus court tel un passage à l'ombre précédé d'un très fort ensoleillement ou vice versa. La pierre oscille alors entre des périodes de dilatation et des périodes de contraction. Si pour cause de confinement la dilatation est contrariée, il y a génération de contraintes de compression. D'autre part, quand des gradients thermiques existent à l'intérieur d'une pierre, il peut alors s'y développer des contraintes de traction.

Une pierre soumise à ces cycles tend à se fissurer à un niveau de contrainte qui définit une *limite de fatigue* bien inférieure à sa résistance à la compression simple statique.

En 1974, à l'issue d'expérience sur des matériaux gréseux, Haimson a montré que ces cycles de compression et de traction pouvaient provoquer une *limite de fatigue* correspondant à environ 30% de la valeur de la résistance à la compression simple statique. Cette fatigue de la pierre est aussi bien la conséquence de forces agissant en sens contraires lors des périodes de tension et compression, que le fait des tractions variant entre des valeurs maximales et minimales. Il n'y a pas de valeur critique à partir de laquelle elle a un effet sur la pierre. Les cycles climatiques étant

nombreux, la pierre finira par se désagréger, aussi longtemps qu'elle subit des contraintes divergentes, voire des contraintes de traction différentielles même si celles-ci sont faibles.

2.1.2. Désagrégation sous l'effet du gradient thermique

Les variations de températures ont une part importante dans la fatigue de la pierre et donc sur sa désintégration (Young & Young, 1992). Elles expriment le cycle journalier *temps chaud / temps frais*. L'insolation est la conséquence de ce cycle qui, lui-même, dépend des saisons. Ce cycle est en rapport avec l'élévation ou la diminution de la température avec un taux supérieur à 1°C / heure (Hasley et *al*, 1998).

Aux actions répétées des faibles cycles *temps chaud / temps frais*, s'ajoutent celles causées, d'une part par le gradient thermique entre la surface de la pierre et sa sub-surface, par sa conductivité thermique et par son albédo et, d'autre part, par la dilatation différentielle des minéraux à laquelle s'ajoute, pour un même minéral, une dilatation spécifique selon l'axe cristallographique *(tableau n°3)*.

La différence de température entre la surface et la sub-surface de la pierre se traduit de la façon suivante: lorsque le temps se rafraîchit en surface, à l'intérieur la température continue de s'élever. En conséquence, cette partie devient plus chaude et continue de se dilater contrairement à la surface qui se contracte. Cela génère, en surface de la pierre, des contraintes de compression.

A l'inverse, par temps chaud, des contraintes de traction se développent en surface. La surface de la pierre se dilatant plus vite que la sub-surface, cette inversion fréquente des contraintes finit par causer la fatigue de la pierre (Wark & Smith, 1994).

Les gradients qui se développent en surface et à l'intérieur de la pierre sont contrôlés par sa conductivité thermique et par son albédo (Mc Greevy, 1985). Si la conductivité est faible, la surface de la pierre connaîtra une élévation de température bien plus rapide par rapport à ses parties internes. Ceci provoque des gradients thermiques considérables qui génèrent des contraintes très élevées. De la même façon, avec un albédo faible, l'absorption de l'irradiation solaire est plus élevée, et le réchauffement de la pierre est plus rapide.

2.1.3. Désagrégation sous l'effet du gradient hygrométrique

Les variations hygrométriques sont la conséquence du couple *humidité/ dessiccation*. En phase de pluie, en première approximation, le taux humidité est égal à 100%.

Pendant longtemps, des auteurs ont confondu l'action de ce couple avec celle du gradient thermique. Par exemple, pour Yatsu [1988] l'humidité soutenait l'action de

l'insolation. Pour Burdine [1963], l'élévation du taux d'humidité dans la roche a pour effet de réduire sa résistance à la traction. Pour Hasley [1996], la présence d'eau par capillarité dans les pores de la roche pourrait conduire à l'accélération de sa dilatation.

En 1998, prenant le contre-pied de ces théories, Hasley et *al* montrent que si les deux couples agissaient simultanément, cela conduirait à annihiler l'action de chacune. Il est en effet connu que l'eau dans la roche contribue à élever sa conductivité thermique. En élevant la conductivité thermique de la roche, l'humidité diminue le gradient thermique entre la surface de la roche et sa sub-surface, réduisant par conséquent l'action de désagrégation du couple *temps chaud / temps frais*. A la dilatation, sous l'effet de la chaleur, s'opposerait donc une contraction, conséquence de la dessiccation. De ce qui précède, Hasley et *al* [1998] déduisent que le niveau du taux d'humidité dans une roche serait une conséquence de sa dilatation et de sa contraction, elles-mêmes générées par des mécanismes intégrant les cycles humidité / dessiccation.

A propos de ces mécanismes, Young &Young [1992] ont retenu le gonflement des argiles interstitielles, quand Ortega-Calvo *et al* [1992] soupçonnaient algues et moisissures.

Quand bien même, les mécanismes sont nombreux, Hasley *et al* [1998] soutiennent qu'ils ne mettent pas exclusivement en œuvre argiles et matières organiques, qui ne sont d'ailleurs pas toujours présentes.

En effet, une adaptation à la désagrégation des théories de la dilatation et de la contraction des sols, pour lesquels la recherche est plus avancée, montre que la roche expérimente simultanément cinq mécanismes (Hasley, 1996) liés aux gradients hygrométriques *(tableau n°4)*. Ces gradients permettent de contrôler l'eau libre (qui n'est pas piégée par les forces de Van Der Waals), l'eau adsorbée, l'eau entre les grains, sous l'attraction des surfaces la cernant, et l'eau à éléments chimiques en solution.

En l'absence de matériaux argileux ou organiques, la déformation de la pierre sous l'effet du gradient hygrométrique, demeure cependant relativement faible *(fig. n°7)*. Les résultats de mesures réalisées aux Etats-Unis par Hockman & Kessler donnent: environ 0,0039% (granite); de 0,01 à 0,044% (grès); entre 0,015 et 0,032% (calcaire) et 0,0010% (marbre).

2.1.4. Désagrégation sous l'effet de la cristallisation des sels

Les variations de la température et du taux d'humidité dans la roche la prédisposent à l'altération physique par cristallisation de sels déposés par les embruns marins. Les sels génèrent des contraintes à travers trois mécanismes qui sont:

- la dilatation sous l'effet du gradient thermique (paragraphe 2.1.2);
- la cristallisation;
- l'hydratation.

Les contraintes dues à la cristallisation sont générées lors du séchage ou du refroidissement de la pierre. Quant aux contraintes dues à l'hydratation, elles résultent de la prise rapide d'humidité.

La *figure n°8* situe le rôle de la température et de l'humidité relative dans la cristallisation des sels. A partir de celle-ci, et lorsque les sels en présence sont identifiés, il est possible, par la mesure de la température et de l'humidité relative, d'envisager les cycles de dilatation et de contraction.

Par contre, si on est en présence de mélange de plusieurs sels, ces prédictions ne sont pas aisées, malgré les modèles mis en œuvre par Steiger & Zeumert [1996].

2.1.5. Désagrégation sous l'effet des cycles gel-dégel

L'effet de ces cycles est inexistant en climat tropical humide. Selon les Auteurs, en plus des cycles gel-dégel qui causent la fatigue, puis la désagrégation de la pierre, on peut aussi assister à un éclatement des roches poreuses, provoqué par la transformation de l'eau en glace (9% d'augmentation de volume lorsque l'eau passe à l'état de glace).

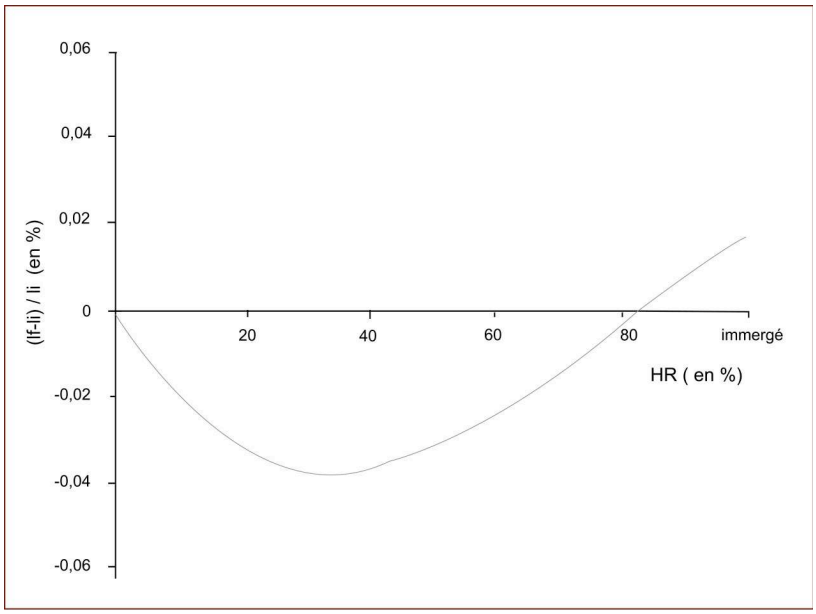


Figure 7: déformation dans une carotte de granite de St Gérard (Canada)
d'après Ballivy et al, [1992]

Avec : lf : longueur finale (en fin d'observation)
li : longueur initiale (en début d'observation)

Tableau 3: coefficient moyen de dilatation linéaire de certains minéraux et roches

Minéral / type de roche	Orientation (c, b, a)	Coefficient de dilatation [1] linéaire moyen ($x10^{-6}$ °C^{-1})	Source
Quartz	perpendiculaire à "c"	13,5	Johnson & Parsons (1944)
	parallèle à "c"	7,4	Johnson & Parsons (1944)
Microcline	parallèle à "b"	1,1	Johnson & Parsons (1944)
	parallèle à "a"	17,1	Johnson & Parsons (1944)
Oligoclase	Parallèle à "a"	3,1	Johnson & Parsons (1944)
Grès	parallèle au plan de stratification	9,2	Hockman & Kessler (1950)
	perpendiculaire au plan de stratification	9,5	Hockman & Kessler (1950)
Marbre	"A1" non précisée	8,7	Hockman & Kessler (1950)
	perpendiculaire à "A1"	5,2	Hockman & Kessler (1950)
Calcaire	parallèle au plan de stratification	2,8	Hockman & Kessler (1950)
	perpendiculaire au plan de stratification	4,2	Hockman & Kessler (1950)
Granite	-	6,2	Hockman & Kessler (1950)

[1] : -20 <°C <+60

Tableau 4: mécanisme générant la dilatation ou le rétrécissement de la pierre sous l'effet du taux d'humidité

Mécanisme	Explication
Les tensions par capillarité	L'eau libre dans l'espace poreux des grains est sous l'influence des forces de traction de surface des grains. Lorsque débute l'évaporation de cette eau, les contraintes de traction à la surface des grains augmentent. Ce qui génère des contraintes de compression sur les grains et, donc, un raccourcissement de la pierre. Quand les pores sont vidés jusqu'à un niveau donné, les forces de traction de surface chutent et la pierre recouvre son état initial.
Contraintes à la surface des grains	En présence de l'eau, la surface des solides est soumise à des tractions qui rendent significatives les contraintes de compression sur les petites particules. L'adsorption de l'eau réduit cette surface et favorise un relâchement dans ces particules.
Force d'écartement des grains	Dans l'espace poreux de la pierre, l'eau adsorbée forme une couche à la surface des solides qui sont eux-mêmes soumis aux forces de traction de surface des grains. Proche des parois des pores, l'eau entre les grains sera dans un état empêchant son adsorption. Ce qui crée une pression d'écartement. Au séchage de la pierre, l'épaisseur de cette couche d'eau diminue amenuisant les forces d'écartement. Il en résulte alors un rétrécissement de la pierre.
Mouvement de l'eau entre pores	Il s'agit de l'eau piégée dans un pore à volume entièrement circonscrite par les surfaces des minéraux. Cette liaison forte avec ces surfaces suggère un gradient hygrométrique très élevé pour la séparer de ces minéraux. Si bien que le raccourcissement sera identique à celle d'une même pierre avec de l'eau libre, ou en adsorption, pour laquelle le séchage a nécessité le même niveau de gradient hygrométrique.
Mouvement de l'eau à éléments chimiques en solution	La combinaison d'éléments chimiques à l'eau est la conséquence de l'hydratation. Certains sels subissent plusieurs phases d'hydratation sous l'influence du taux d'humidité. Comme pour l'eau entre les pores, un fort gradient hygrométrique est nécessaire. Mais le raccourcissement de la pierre est plus élevé.

D'après Domone, [1994]

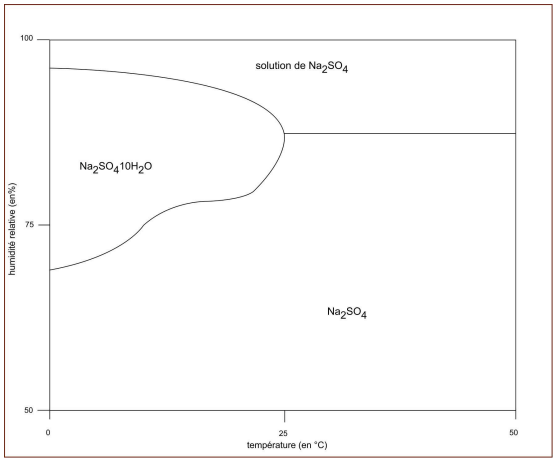


Figure 8: le système Na_2SO_4 / H_2O
d'après Steiger & Zeunert, [1996]

2.2. L'altération chimique: mécanisme de détérioration de la pierre.

L'altération chimique des minéraux est la conséquence d'un changement de l'environnement chimique. Formés dans des conditions liées au magmatisme, à l'hydrothermalisme, au métamorphisme et à la sédimentation, ces minéraux deviennent potentiellement instables lorsqu'ils sont soumis aux intempéries. Ils deviennent vulnérables aux attaques de l'eau, de l'oxygène, et du dioxyde de carbone; les réactions, exothermiques, paraissent spontanées. On parle alors d'altération géochimique.

En milieu naturel, lorsque la première couche est transformée en sol, l'altération géochimique est suivie et accentuée par l'altération pédochimique, sous l'action des gaz et acides organiques en solution.

2.2.1. Oxydation et réduction

Lors de l'altération chimique, la plupart des roches salines, ou très riches en sulfures, subissent une dissolution (Struillou, 1969). On assiste quelquefois aussi (selon le climat), à des dissolutions dans les roches à composition granitique ou syénitique (roches à feldspaths acides). Le climat, à travers la température, la pluie et l'humidité, est un facteur primordial pour l'altération chimique (Loughnan, 1969). Pluie et humidité contrôlent les réactions chimiques et le lessivage des constituants solubles des minéraux tandis que la température fixe les vitesses de réaction. L'action de ces eaux est gouvernée par les facteurs suivants:

- la composition chimique de l'eau de pluie, son pH;
- les éléments chimiques lessivés et en solution dans les eaux interstitielles;
- la structure cristalline des minéraux en présence;
- la mobilité des éléments chimiques;
- etc.

Dans l'altération et le lessivage par l'eau, les différents minéraux ont des comportements très variables qui s'avèrent être sous la dépendance du potentiel ionique des éléments qui les constituent (Goldschmidt, 1937). Ce potentiel ionique est exprimé par la relation:

$$\frac{Z}{r} = \frac{\text{charge ionique}}{\text{rayon ionique}}$$

avec Z en unité de valence et r en Ångström.

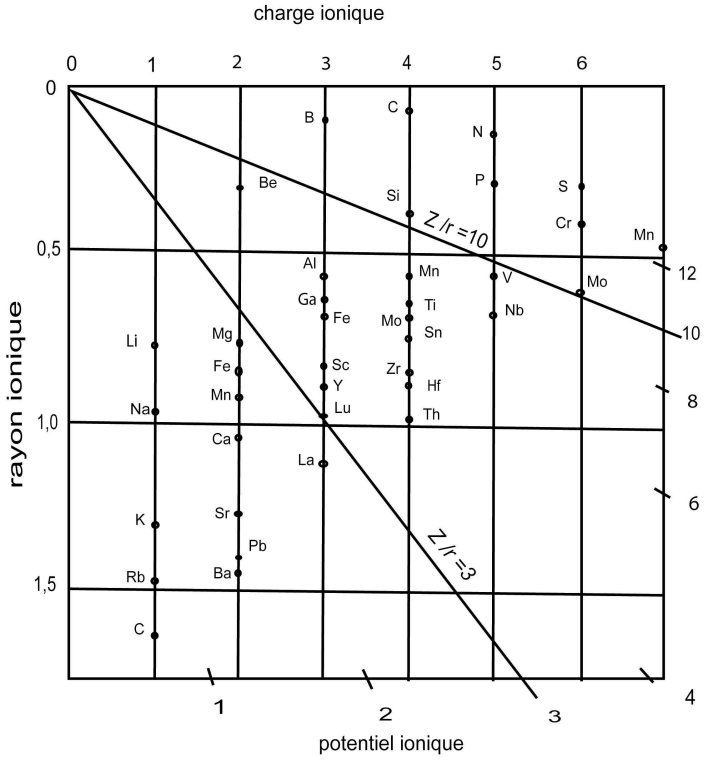
En fonction du *tableau n°6*, on distingue les trois catégories suivantes:

[a]. $0 < \frac{Z}{r} < 3$, cations solubles même pour les pH élevés (Na^{+}, K^{+}, Ca^{++}, Mg^{++});

[b]. $3 < \frac{Z}{r} < 10$, éléments des hydrolysats (Al^{3+}, Fe^{3+}, Si^{4+}). Ces ions précipitent par hydrolyse et se concentrent dans les résidus;

[c]. $\frac{Z}{r} > 10$, éléments (Si, N, P) s'unissant à l'oxygène pour former des groupement anioniques complexes solubles donnant des solutions ioniques vraies, comme pour $\frac{Z}{r} < 3$.

Tableau 5: propriété des éléments chimiques en relation avec leur potentiel ionique



source, Loughnan [1969]

<u>Remarques</u> : rayon ionique en Å.

Il y a donc deux groupes (a) et (c) d'éléments mobiles qui seront facilement entraînés en solution ionique et, un groupe (b) d'éléments peu mobiles qui donneront des concentrations résiduelles sur place et, seront particulièrement abondants dans les formations résiduelles. On note cependant que Si^{4+} ayant un potentiel ionique $\frac{Z}{r}=10$ appartient à la fois au groupe (b) et au groupe(c). En réalité, son comportement est régi par la température.

Dans un climat tempéré, le quartz SiO_2 est inaltérable. Les feldspaths qui sont des aluminosilicates K, Na, Ca, sont détruits car, K, Na, et Ca entrent dans la catégorie des cations solubles, mais les tétraèdres SiO_4 et AlO_4 restent stables sous de nouvelles formes minéralogiques que sont les argiles, la kaolinite, etc.

Sous climat tropical humide, Si^{4+} devient mobile et les liaisons entre tétraèdres SiO_4 sont détruites. Par ailleurs, la kaolinite et les autres argiles deviennent instables et sont détruites. Il se forme des hydrates, gibbsite $Al(OH)_3$ ou boehmite et diaspore AlO (OH) qui sont les minéraux des bauxites. La silice libérée se dépose sous forme d'opale. Le quartz est également attaqué.

2.2.2. L'hydratation

L'hydratation va quelque fois de paire avec l'oxydation ou, lui succède. Elle s'accompagne d'une augmentation de volume (Arnould, 1975).

Jenny [1950] l'explique de la façon suivante : bien que la somme des charges négatives et des charges positives à l'intérieur d'un cristal se neutralisent, les atomes et ions en surface *(fraîche)* ont des valences non saturées. Au contact avec l'eau, l'attraction entre ces atomes et ions et les dipôles de l'eau provoque l'hydratation. Ces forces d'attraction polarisent les dipôles à tel point qu'elles provoquent la dissociation des ions H^+ et OH^-. Les hydroxyles vont alors se fixer aux cations libres tandis que les ions H^+ se lient aux oxygènes et autres anions. Simultanément, des ions H^+ vont remplacer les cations à la surface du minéral. Les ions OH^- libres provoquent alors une élévation du pH de la solution.

En 1948, à l'issue d'expériences similaires, Stevens & Carron ont montré que cette réaction se poursuit jusqu'à ce qu'un état d'équilibre soit atteint. Dès lors, seuls quelques ions entrent et sortent de la structure du minéral selon la réaction:

$$M^+[minéral]^- + H^+ OH^- \Longleftrightarrow H^+ [minéral]^- + M^+ OH^-$$

Par la suite, les travaux de Garrels et Howard [1959] sur la détermination du pH des solutions en fonction de la température et des minéraux en présence, ceux de Fredericson [1951], Mc Connel [1951], Fieldes et Swindales [1954] sur les feldspaths et les micas, permirent de comprendre que les ions H^+ ont une part importante dans la dislocation de la structure des silicates et que les minéraux originels conservent une part importante de leur composition.

2.3. L'altération biologique: mécanisme de détérioration de la pierre

2.3.1. L'environnement biologique de la pierre

La pierre, son espace poreux ainsi que ses micro-fissurations, naturelles ou provoquées par la technique d'exploitation et de façonnage offrent, outre un support matériel stable, l'énergie et la matière indispensables à la croissance de végétaux (algues, champignons, lichens, voire mousses, fougères et plantes à fleurs) et animaux (bactéries). C'est, en quelque sorte un biotope qui offre une niche écologique pour ceux capables de s'y établir.

2.3.2. Mécanisme de désagrégation

La désagrégation de la pierre est le résultat des actions chimiques et physiques exercées par les animaux et les végétaux sur leur substrat, qu'est la pierre.

En ce qui concerne les végétaux, champignons, mousses et autres lichens envoient des filaments et ou des rhizoïdes dans les moindres interstices de la pierre qu'ils contribuent à corroder par les substances qu'ils sécrètent. Il en est de même pour les algues unicellulaires qui, en plus, colorent la pierre en vert et les plantes supérieures munies de racines. La croissance en volume de ces racines pouvant être à l'origine de l'éclatement de la pierre.

L'action des bactéries porte presque essentiellement sur les pierres calcaires. Ces bactéries, particulièrement dangereuses, interviennent alors dans le cycle du soufre. D'un coté, l'hydrogène sulfuré (H_2S), en réagissant avec les sels de fer, donne du sulfure de fer qui colore les pierres en noir. De l'autre, l'acide sulfurique réagit avec le carbonate de calcium, constituant principal des calcaires, pour former le gypse (SO_4Ca, $2H_2O$), selon la réaction :

$$CaCO_3 + H_2S + H_2O _ CaSO_4 + 2H_2O$$

IV. Conclusion

La compilation des connaissances relatives aux roches ornementales, et à l'altération météorique du matériau pierreux met en évidence qu'au laboratoire, seuls les facteurs climatiques peuvent faire l'objet d'une modélisation.

Ceci conditionne le principe des différents dispositifs actuellement utilisés pour l'analyse du processus de désagrégation des matériaux rocheux, dont l'Extracteur Soxhlet de Pédro [1964] est le précurseur.

Chapitre 2 : Problématique de l’étude expérimentale

I. Introduction

Ce chapitre examine l'ensemble des questions posées par la « conceptualisation » d'un *protocole* qui doit permettre de mettre en œuvre au laboratoire, les essais d'altération et aussi, d'étudier l'évolution de la face polie des échantillons de roches ornementales testée.

Pour ce faire, dans un premier temps, on analyse les facteurs climatiques de la région sud de la Côte d'Ivoire devant faire l'objet d'une modélisation. Les données météorologiques qui permettent l'analyse de ces facteurs sont compilées en *annexe III*. Ensuite, à partir des paramètres dégagés, on crée un modèle de dispositif expérimental pour générer un environnement climatique qui s'apparente à celui des roches ornementales lorsque ceux-ci sont exposés aux intempéries typiques du climat tropical humide.

Enfin, on termine ce chapitre en définissant une méthode susceptible de permettre les investigations relatives à l'évolution de la face polie des échantillons de roches ornementales testée.

II. Paramètres climatiques en région Sud de la Côte d'Ivoire

Les météorologistes divisent la Côte d'Ivoire en trois régions *(fig. n°9)*. La région Sud de la Côte d'Ivoire est couverte par la Zone Climatique I. Dans cette zone climatique, la bande littorale, où se situe l'agglomération d'Abidjan, est caractérisée par des valeurs de température et de pluviosité, typiques du climat tropical humide

1. La Pluviométrie

1.1. Données sur la pluviométrie

En Côte d'Ivoire c'est l'élément climatique le plus important *(fig. n°10)*. Dans la zone climatique sud, les régions les plus arrosées (hauteur moyenne annuelles supérieures à 2000 mm) sont : la bande littorale *(fig. n°11)*, s'étendant de Dabou à la frontière ghanéenne et, comprenant l'agglomération d'Abidjan, la côte et l'arrière-pays forestier, s'étendant de San Pedro à la frontière du Libéria. La partie du littoral comprise entre Sassandra et Jacqueville reçoit des hauteurs moindres de pluies (entre 1600 et 1800 mm par an). Sur le reste de cette zone climatique, les hauteurs vont en décroissant chaque année du Sud vers le Nord (de 1500 à 1000 mm par an) avec un minimum centré sur Boli (975 mm). La répartition annuelle des précipitations indique:

- quatre mois de *faible* pluviométrie (hauteur mensuelle moyenne inférieure à 100 mm) : décembre, janvier, février et août ;
- cinq mois de pluviométrie *modérée* (hauteur moyenne annuelle entre 100 et 200 mm): mars, avril, et septembre, octobre, novembre;

- trois mois de *forte* pluviométrie (hauteur mensuelle moyenne entre 200 et 650 mm): mai, juin, juillet.
- Le maximum, très prononcé dans la zone d'Abidjan, se produit au mois de juin (hauteur d'eau moyenne comprise entre 473 et 686 mm).

Figure 9: les Zones climatiques de la Côte d'Ivoire
d'après ASECNA, [1979]

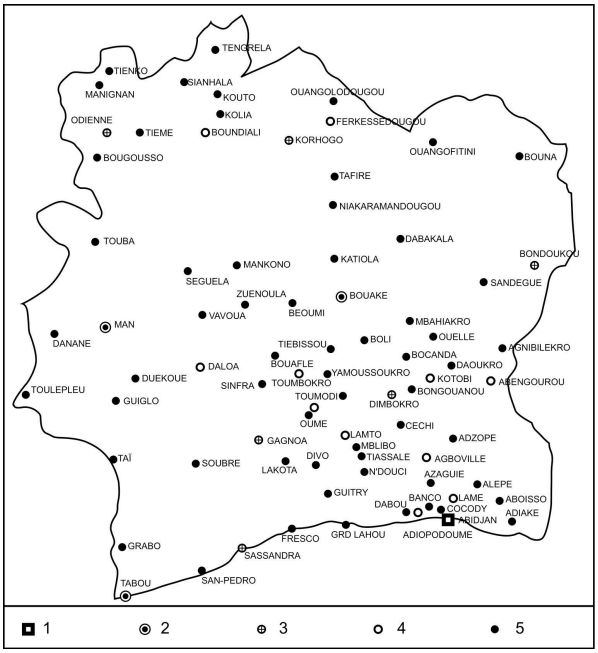


Figure 10 : stations météorologiques de Côte d'Ivoire
d'après ASECNA, [1979]

1. station principale et radiosondage. **2.** station de sondage et d'observations. **3.** station d'observations. **4.** station climatologique. **5.** station pluviométrique

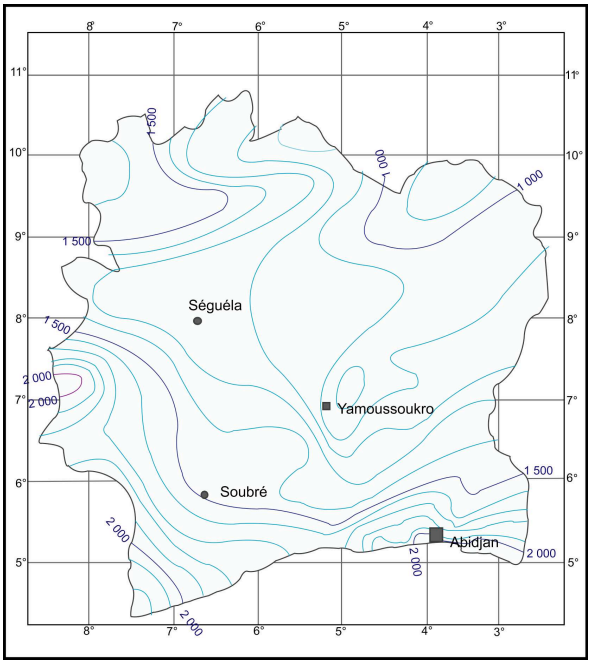


Figure 11: isohyètes (mm) moyennes annuelles
Source ASECNA, 1979

1.2. Evolution mensuelle de la pluviométrie

Les graphes des figures 12, 13 et 14, donnent l'évolution mensuelle des pluies dans l'agglomération d'Abidjan.

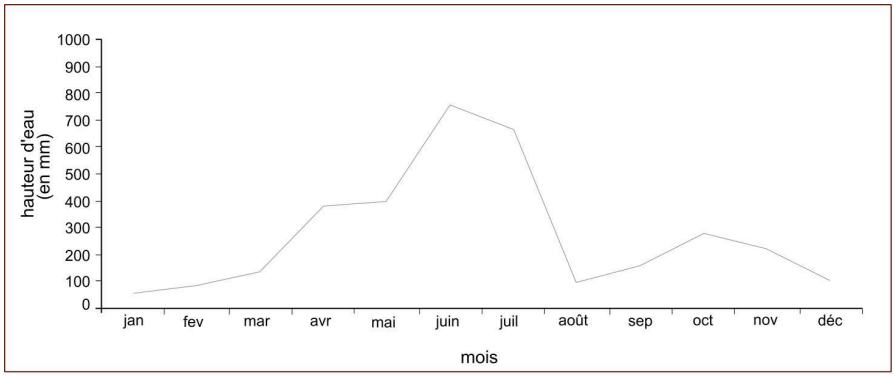


Figure 12: évolution mensuelle des hauteur d'eau max. (1981-2000)
Source : SODEXAM

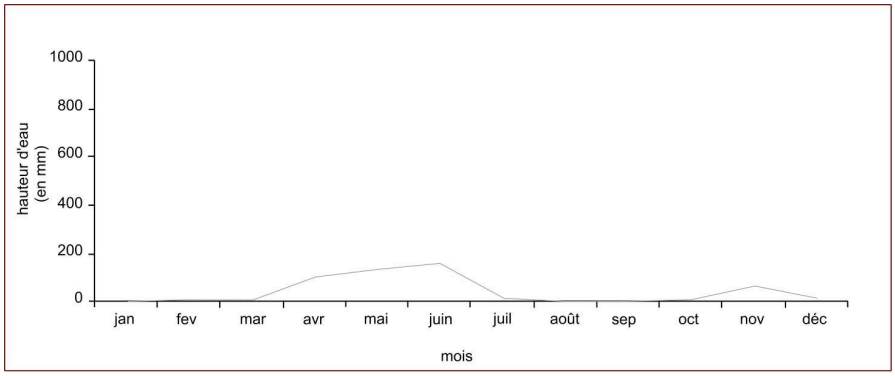


Figure 13: évolution mensuelle des hauteur d'eau min. (1981-2000)

Source : SODEXAM

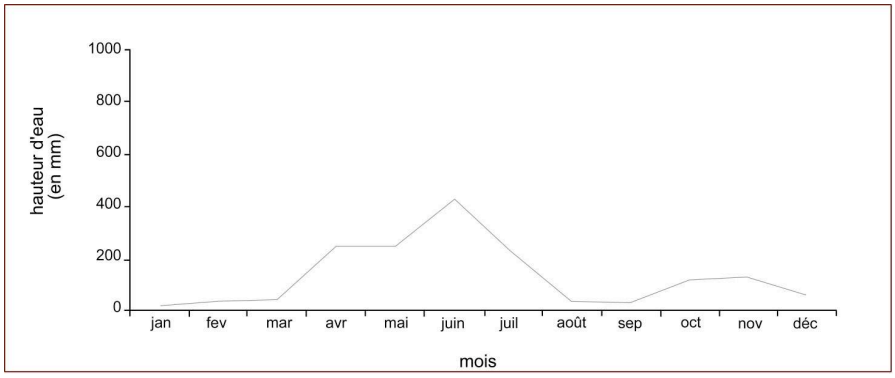


Figure 14: évolution mensuelle des hauteur d'eau moyennes (1981-2000)

Source : SODEXAM

1.3. Evolution annuelle de la pluviométrie à Abidjan (1937- 2000)

Cette évolution, soulignée par la *figure n°15,* indique une irrégularité dans la répartition des hauteurs d'eau, d'une année à l'autre. On observe ainsi un pic en 1956 (3129 mm) et un creux en 1991 (1119 mm).

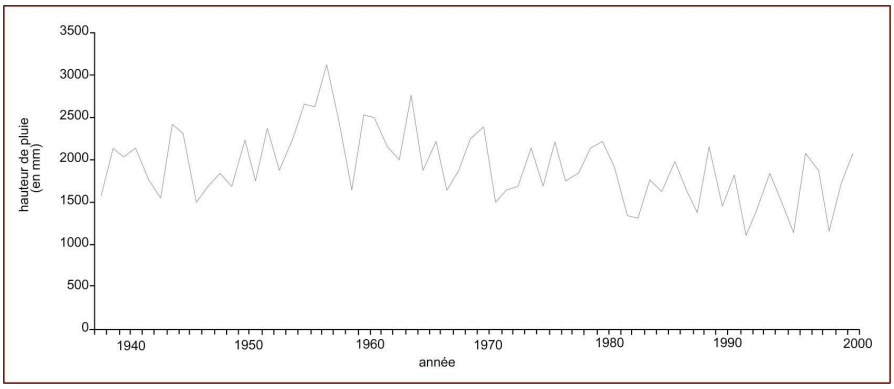


Figure 15: évolution annuelle des hauteur d'eau (1937-2000)

Source : ASECNA

1.4. Répartition annuelle des jours de pluies.

Le nombre (mensuel) des jours de pluie est généralement proportionnel à la hauteur d'eau recueillie, avec une exception pour la petite saison sèche : mi-juillet à mi-octobre *(annexe II)*. Le nombre de jours de pluies est alors relativement important, compte tenu des hauteurs d'eau recueillies ; mais, il s'agit de précipitations très faibles, sous la forme de bruines ou de crachins.

Sur le littoral (zone d'Abidjan), on retrouve le même découpage que pour les hauteurs de pluies. De Dabou à la frontière ghanéenne, et de San Pedro à la frontière libérienne: 124 à 165 jours. De Sassandra à Jacqueville: 87 à 110 jours avec un minimum exceptionnel de 58 jours pour Grand-Lahou.

A l'intérieur, la répartition géographique est très irrégulière. Du minimum de Boli (52 jours) et de celui de Cechi (72 jours), on passe à des valeurs nettement supérieures : 116 jours à Abengourou, 119 à 143 jours dans le quadrilatère Dimbokro, Divo, Gagnoa, Oumé et 145, jours à Grabo.

1.5. Nombre moyen mensuel des jours de pluies

Le nombre de jours de pluies *(tableau n°6)* enregistré mensuellement est extrêmement variable et très dispersé d'une saison à une autre.

Tableau 6: nombre moyen mensuel de jours de pluie

Désignation	Période	Nombre moyen de jours pour la période
Mois de faible pluviométrie	Décembre, janvier, février	Inférieur à 8
	Août	8 à 17 sur le littoral (zone d'Abidjan)[1]
		5 à 14 dans l'intérieur
Mois de pluviométrie modérée	Mars, avril	3 à 5
	Septembre, octobre, novembre	8 à 20
Mois de forte pluviométrie	Mai, juillet	11 à 20 sur le littoral [2]
		7 à 16 dans l'intérieur [3]
	Juin	17 à 23 sur le littoral [2]
		11 à 19 dans l'intérieur [3]

1. Grand-Lahou et Jacqueville exceptés. **2.** Grand-Lahou excepté **3.**Boli excepté

Source : ASECNA [2000]

2. L'insolation dans l'agglomération d'Abidjan

Elle concerne l'exposition aux rayons du soleil. De l'insolation dépendent les températures au sol, la durée de l'action du soleil et donc, l'énergie calorifique provoquée par le rayonnement solaire.

2.1. Température à la surface du sol

Les différentes températures au sol sont données par les *figures 16, 17 et 18*.

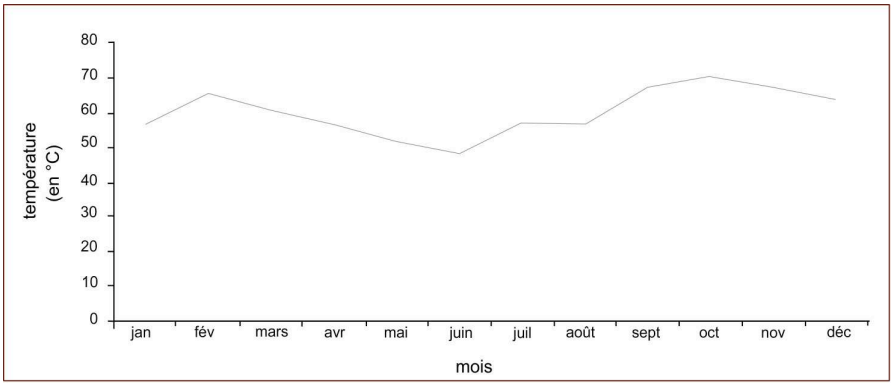


Figure 16:évolution mensuelle des T°max. (1981-2000)
Source : SODEXAM

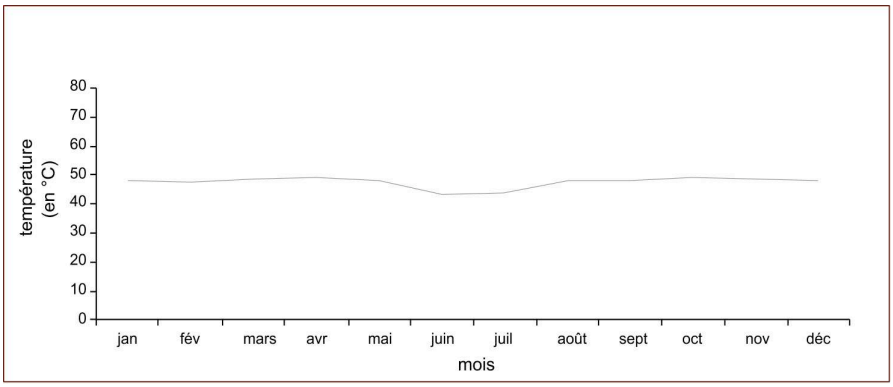


Figure 17: évolution mensuelle des T°min. (1981-2000)
Source : SODEXAM

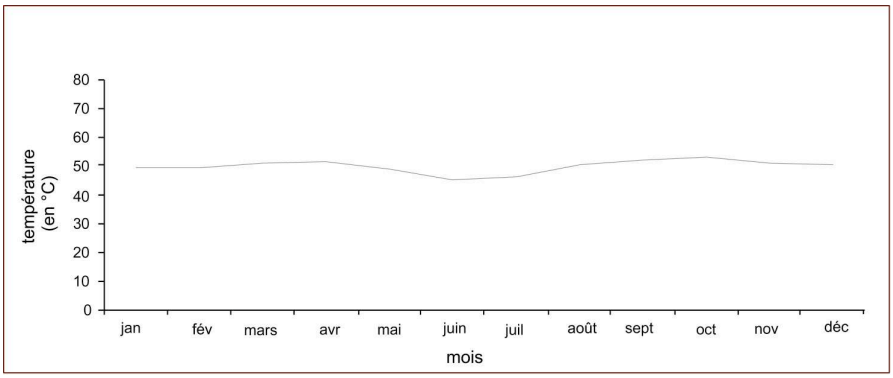


Figure 18: évolution mensuelle des températures moyennes. (1981-2000)
Source : SODEXAM

2.2. Durée de l'insolation

L'insolation est l'exposition d'un corps aux rayons du soleil. En météorologie, les valeurs sont significatives et enregistrées pour un seuil de 120 W. m^{-2}. Les durées de l'insolation sont données par les figures n° 19, 20,et 21. Les heures d'insolation couvrent au maximum 31% de l'année.

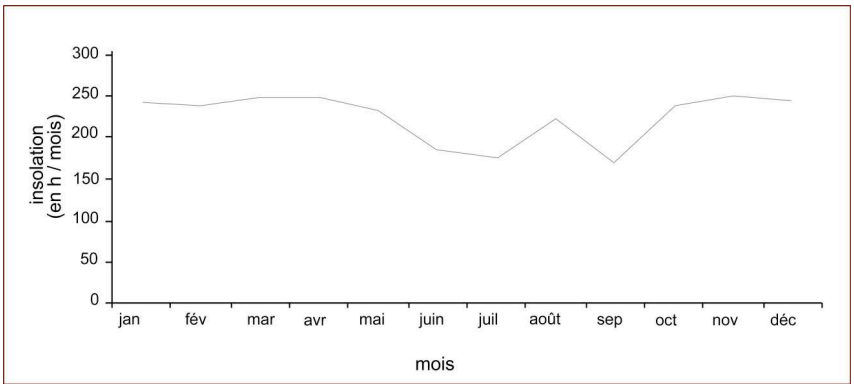


Figure 19: évolution mensuelle de la durée de l'insolation max. (1981-2000)

Source : SODEXAM

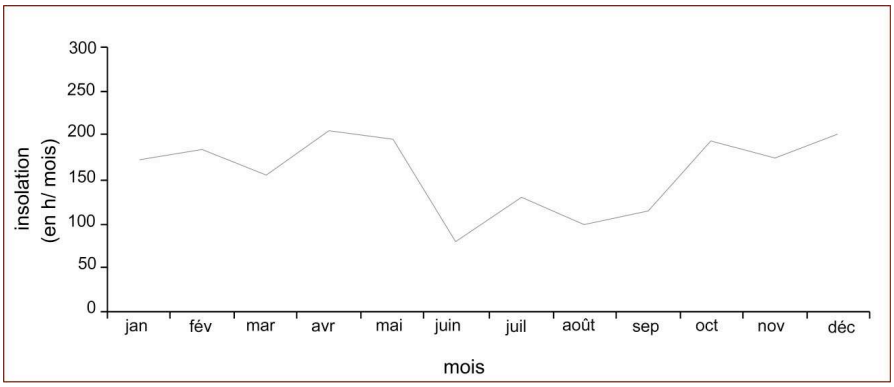


Figure 20: évolution mensuelle de la durée de l'insolation min. (1981-2000)

Source : SODEXAM

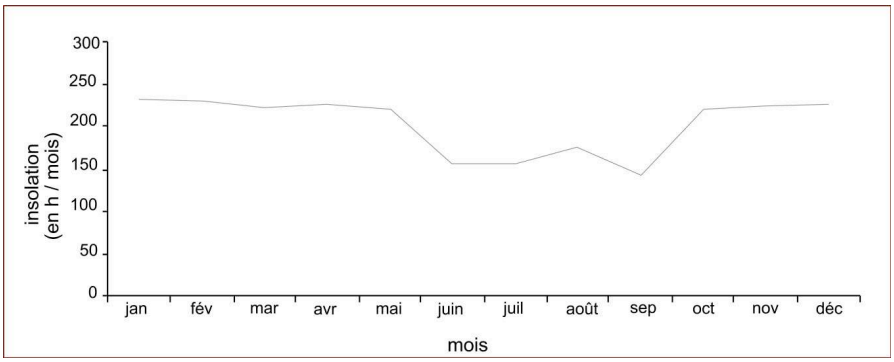


Figure 21: évolution mensuelle de la durée de l'insolation moyenne. (1981-2000)

Source : SODEXAM

2.3. Energie calorifique à la surface du sol

L'énergie calorifique à la surface du sol est la conséquence du rayonnement solaire irradiant la surface du sol. L'évolution de l'énergie calorifique (kWh m^{-2} J^{-1}) à la surface du sol, dans l'agglomération d'Abidjan, est donnée par le graphique de la figure n°22.

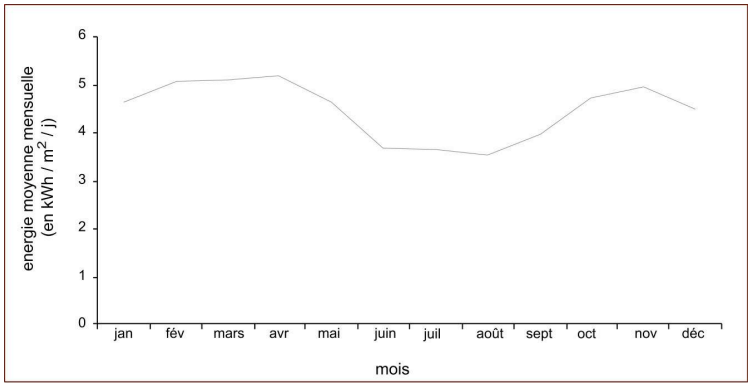


Figure 22: évolution des moyennes mensuelles de l'énergie calorifique à la surface du sol (1981-2000)
Source : SODEXAM

3. Humidité relative et tension de la vapeur d'eau

3.1. L'humidité relative

Sur la Côte d'Ivoire entière, par suite du mouvement de latitude du Front Inter Tropical *(annexe II)*, et de la quasi-permanence du flux de mousson sur les régions Sud, on observe que les valeurs moyennes de l'humidité relative baissent régulièrement du Sud au Nord.

Sur le littoral (incluant l'agglomération d'Abidjan), la valeur moyenne, qui est de l'ordre de 80 à 90%, est très élevée *(fig. n°23)*. Au cours de la saison pluvieuse, un régime de saturation y règne à peu près en permanence les jours de pluies. Pendant la saison sèche, dans la zone de transition, et dans les autres zones climatiques, où la baisse nocturne de la température est bien marquée, la saturation est souvent atteinte en fin de nuit et la condensation de la vapeur d'eau sur les objets au sol est un phénomène assez fréquent, de même que la formation de brumes humides ou de brouillards. Sur le littoral par contre, ce phénomène peut se produire en grande saison sèche, principalement en janvier, où se manifeste en fin de nuit une influence continentale ; mais la condensation de la vapeur d'eau sur les objets au sol est rare.

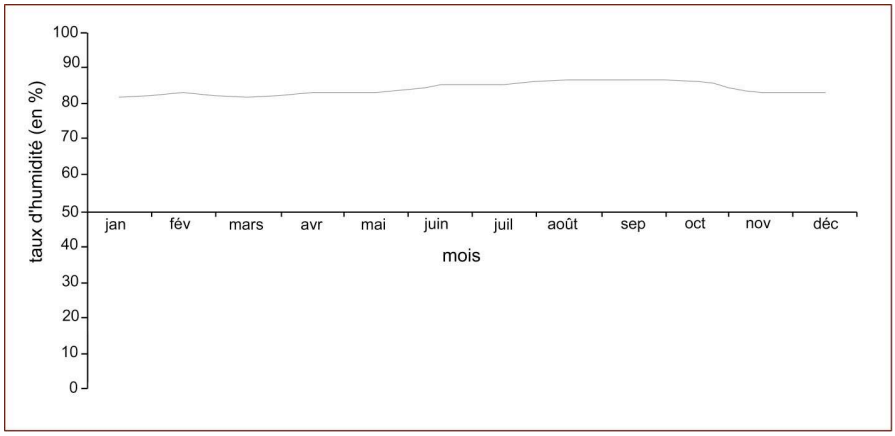


Figure 23: variation des moyennes mensuelles (1981-2000) de l'humidité relative

Source : ASECNA

3.2. La tension de vapeur d'eau

La courbe de la tension de la vapeur d'eau *(fig. n°24)*, associée à celle des températures, permet d'appréhender le degré de confort et d'inconfort dû à la chaleur. On notera par exemple sur le littoral, que la sensation de chaleur pénible est plus marquée en février, mars, avril et mai, avec des températures moyennes supérieures à 26°C et des tensions de vapeur d'eau dépassant 30 millibars. Par contre, en juillet, août et septembre, avec des températures moyennes oscillant entre 24 et 25°C et des tensions de vapeur d'eau variant entre 25 et 27 millibars, la sensation de confort est agréable.

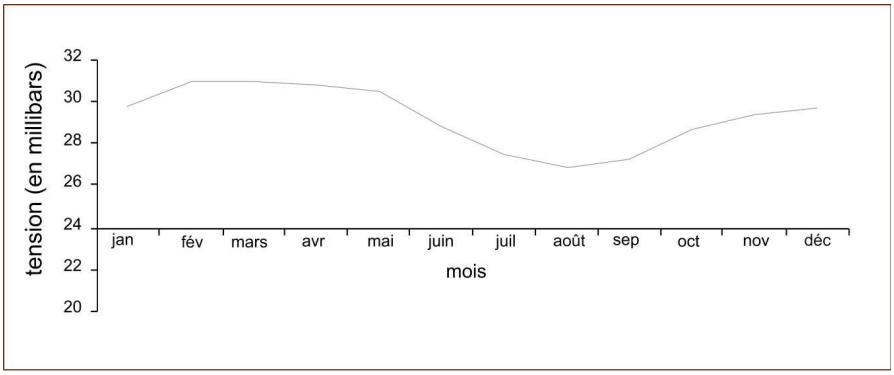


Figure 24: variation des moyennes mensuelles de la tension de vapeur d'eau (1981-2000)

Source : ASECNA

III. Un modèle de facteurs climatiques

1. Analyse des variables

1.1. Le gradient thermique

La forte corrélation entre l'insolation, la tension de vapeur d'eau et l'énergie calorifique à la surface du sol (*tableau n°7)*, permet de retenir cette dernière variable pour rendre compte du transfert thermique dû au rayonnement solaire. Par ailleurs, une analyse résumée dans le *tableau n° 8* amène à envisager de prendre sa valeur pour le mois d'avril (5,18 kWh. m^{-2} .j^{-1}) afin de l'intégrer à notre modèle.

Tableau 7: matrice de corrélation entre les variables

Variables	Q	T° max	T° min	ins max	ins min	H R	ten.vap eau	h.eau max	h.eau min
énergie calorifique	1								
T° maximale	0,20	1							
T° minimale	0,51	0,56	1						
ins maximale	0,87	0,29	0,68	1					
ins minimale	0,82	0,36	0,63	0,71	1				
H R	-0,79	0,14	-0,18	-0,63	-0,63	1			
tension vap. eau	0,89	-0,05	0,30	0,65	0,70	-0,89	1		
hauteur d'eau max	-0,29	-0,57	-0,77	-0,58	-0,36	0,19	-0,18	1	
hauteur d'eau min	0,07	-0,65	-0,36	-0,16	-0,04	-0,15	0,27	0,68	1

Avec:

Q : énergie calorifique au sol;
T° : température;
ins : insolation;
H R : humidité relative;

Tableau 8: analyse de la valeur de l'énergie calorifique du mois d'avril

Paramètre	Valeur	Valeur comparée	Taux de variation	observations
Tension de la vapeur d'eau (millibars)	30,8	31 (mars: plus forte valeur)	- 6,5 ‰	faible taux exprimant une sensation de chaleur quasi équivalente. Cependant, Q sup. de 2,0 %
Nombre de jours de pluie (jours)	4	-	-	le plus faible nombre de jours de pluie par mois
Insolation max. (heure)	248	251 (nov.: plus forte valeur)	- 1,2 %	insolation plus forte malgré une énergie plus faible de 5,0 %
Température max. (°C)	56,5	70,5 (oct.: plus forte valeur)	- 25 %	T° plus forte malgré une énergie plus faible de 8,4 %
Humidité relative (%)	83	82 (mars: plus faible valeur)	+ 1,2 %	humidité plus forte avec cependant Ec sup. de 2,0 %

1.2. Le gradient hygrométrique

On rappelle qu'en phase de non-saturation, l'humidité relative moyenne avoisine 85% *(fig. n°23)*

1.2.1. Répartition annuelle des jours de précipitation

La répartition annuelle des jours de pluie (*fig. n°25)* montre que, dans la ville d'Abidjan, il pleut tous les mois de l'année. Et le nombre de jours de précipitation vont de 124 à 165 jours, soit 34% à 46% de l'année.

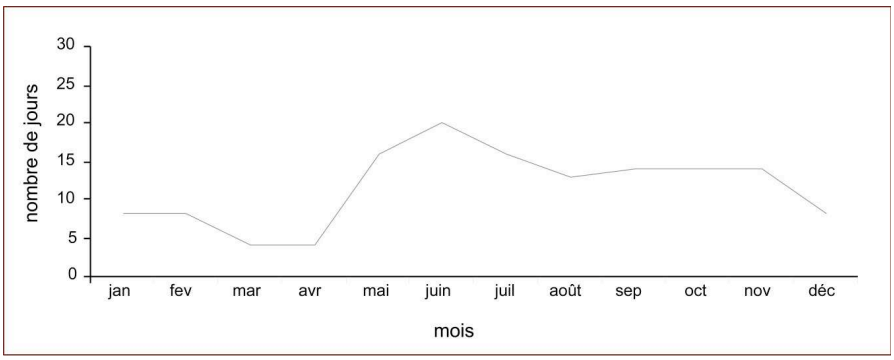


Figure 25: variation du nombre moyen mensuel des jours de pluie (1981-2000).
Source : ASECNA

1.2.2. Répartition des heures de précipitation par 24 heures

Dans l'agglomération d'Abidjan, si l'on considère d'une part, les heures de précipitations nocturnes (de 18 heures à 6 heures) et les heures de précipitations diurnes (de 6 heures à 18 heures) et, d'autre part, si l'on calcule les probabilités de pluie par tranches de 3 heures pour les douze mois de l'année, la période comprise entre 0 heure et 9 heures est la plus fréquemment perturbée (80%), avec quelques nuances (60% à 75%) pour les pluies de mousson (*ASCENA, 1979)*. L'après-midi et la soirée étant nettement moins pluvieuses.

1.2.3. L'intensité des précipitations

L'évolution annuelle de l'intensité des précipitations est donnée par la figure n°26. Les précipitations sont sous la forme d'averses 43%, à la fois de pluies et d'averses 41% ou de bruines 16% *(tableau n°9)*.

Tableau 9: pourcentage des types de précipitation

Désignation	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Averses	50	74	80	63	63	27	5	0	2	18	51	78
Pluies ou averses	50	26	20	34	34	69	70	19	32	69	47	22
Bruines	0	0	0	3	3	4	25	81	66	13	2	16

Source : ASECNA [1979]

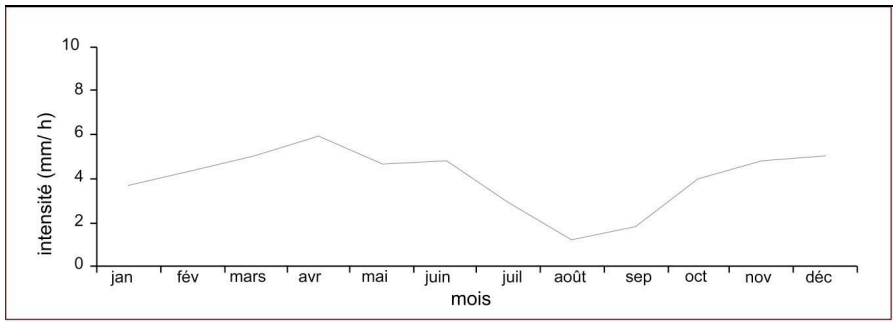


Figure 26: variation de l'intensité moyenne mensuelle des pluies (1981-2000)

Source : ASECNA

On note un maximum en avril (5,9 mm/heure, soit 5,9 litres/heure), un minimum en août (1,2 mm/ heure, soit 1,2 litres/heure) avec une moyenne de 4,0 mm/ heure (4litres/heure) et 67% des valeurs au-dessus de cette moyenne.

1.3. La composition chimique de l'eau de pluie

Sous climat tropical humide, il est démontré que le pH et la composition chimique de l'eau de pluie sont deux facteurs importants qui initient et conduisent le processus de désintégration de la roche saine en milieu naturel. En effet, les pores et autres micro-fissurations, près de la surface, agissent comme des collecteurs, en favorisant la pénétration de l'eau et, par la suite, l'action de l'hydrolyse. Le *tableau n°9* donne la composition chimique de l'eau de pluie dans l'agglomération d'Abidjan.

Tableau 10: composition chimique de l'eau de pluie (ABIDJAN)

Désignation	S	Cl	NO3-N	NH3-N	Na	K	Mg	Ca	pH
Concentration (mg/ litre)	0,6	0,9	1,7	0,63	1,7	1,7	-	0,05	7,6

Source: Direction de l'eau (2001)

2. Paramétrage des facteurs climatiques

2.1. Facteurs liés au gradient hygrométrique

Dans l'agglomération d'Abidjan, l'humidité relative varie entre la phase de saturation et H.R.= 82%, sous l'effet de l'harmattan *(fig. n°23) [annexe II].*

En phase de saturation, les précipitations sont à 84% sous la forme d'averses et de pluie *(tableau n°8)*. Ce qui amène à prendre en considération la vitesse d'impact des gouttes de pluie en phase terminale. L'analyse, à cet effet, de l'intensité de ces précipitations *(fig. n°26)* et du nombre mensuel de jours de pluie *(fig. n°25)* relève qu'on est en présence d'averses et pluies plus laminaires (94%) que turbulentes (4%).

A partir des travaux de Epema & Riezebos [1983] relatifs aux pluies laminaires, qui établissent une relation entre le diamètre de la goutte de pluie et sa vitesse d'impact au sol, sous l'influence de sa hauteur de chute, on retient que:

$$v_f = g \times \frac{M}{\alpha} \qquad \ldots[3]$$

Avec:

- v_f : la vitesse d'impact au sol (en $m.s^{-1}$)
- M : la masse de la goutte d'eau (en kg)
- g : l'accélération (en $m.s^{-2}$)
- _ : la constante de friction en phase laminaire (en $kg.s^{-1}$)

Ces travaux relèvent par ailleurs qu'en laboratoire, la hauteur h de chute des pluies laminaires simulées est une fonction du diamètre ϕ_p des gouttes de pluies (fig. n°27). La vitesse de chute en phase terminale étant une fonction de ϕ_p et de h, ils fixent ϕ_p. Le rapport $\frac{M}{\alpha}$ devient alors une constante. Connaissant h, on peut donc déterminer v_f.

Pour ϕ_p = 3 mm (94% des pluies d'Abidjan), ils expérimentent que h est supérieure ou égale à 0,35 m. Dès lors, en exploitant le graphe v_f = f(h) pour ϕ_p = 3 mm *(fig. n°27)* construit par leurs travaux expérimentaux, on déduit que la valeur de v_f est *2,3 m/ s*.

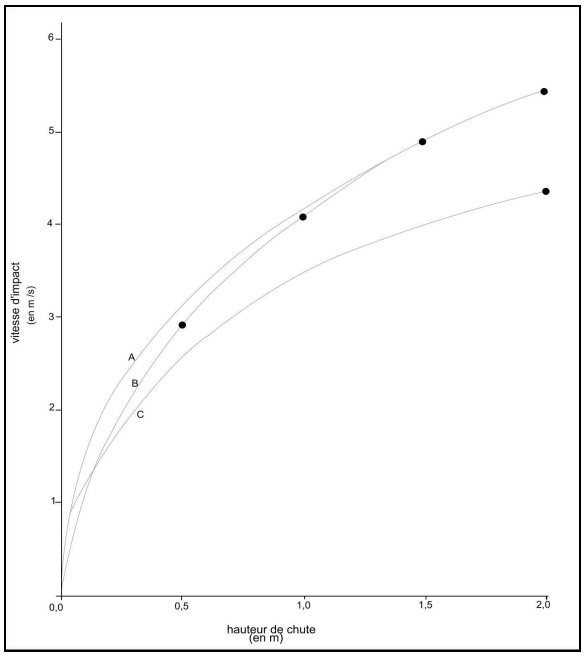


Figure 27: relation entre la vitesse d'impact et la hauteur de chute pour des pluies avec des gouttes de 3mm de diamètre équivalent.
d'après Epema & Riezebos [1983]

A. d'après l'équation théorique des pluies turbulentes avec M/β constant. _ (Kg /s) est la constante de friction en phase turbulente. **B.** d'après les résultats expérimentaux. **C.** d'après l'équation théorique des pluies laminaires avec M/α constant.

2.2. Facteurs liés au gradient thermique

La température à la surface du sol, et aussi dans les matériaux, est la conséquence d'un transfert de chaleur (énergie calorifique) par rayonnement thermique *(premier principe de la thermodynamique)* depuis la source d'énergie puissante qu'est le soleil. Avec les ondes hertziennes, les ondes lumineuses, les rayons X, gamma ou cosmiques, le rayonnement thermique fait partie des ondes électromagnétiques.

La vitesse de propagation de ces ondes dans un milieu donné est gouvernée par la relation:

$$C = \frac{C_o}{n} \qquad \ldots[4]$$

Dans laquelle:

- C est la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu considéré (m/s);
- C_o est la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide égale à environ 3. 10^8 m.s^{-1};
- n est l'indice de réfraction du milieu traversé (sans unité).

En absence de changement de phase, tel le passage d'un état liquide à un état gazeux, la variation de la température est liée à l'énergie calorifique reçue grâce à la relation:

$$K = \frac{Q}{\text{Ä}T} \qquad \ldots[5]$$

avec:

K : la capacité calorifique (Joule /kg /°K);
_T : La variation de température;
Q : l'énergie calorifique.

L'énergie étant connue et, en supposant que la source du rayonnement émet depuis la surface du sol, on déduit la puissance P (en W) s'y rapportant avec la relation:

$$P = \frac{Q}{t} \qquad \ldots[6]$$

En rapportant le temps t (en seconde) à la durée journalière de l'insolation, on calcule donc que pour une surface de 1m^2, la puissance émise *P* a une valeur qui est environ égale à *650 W*.

IV. Modèle de facteurs climatiques et génération de cycles climatiques au laboratoire

1. Conception d'un dispositif approprié

1.1. Bases de conception

On rappelle que les paramètres jouant un rôle fondamental dans la genèse des phénomènes naturels de l'altération météorique sont :

- les caractéristiques climatiques : pluies, températures, et évaporations ;
- les caractéristiques physico-chimiques des solutions d'attaque ;
- les caractéristiques pétrographiques du substratum attaqué.

Le Soxhlet classique (type Pédro [1964]) ou le Soxhlet double utilisé par Porokhovoï [1995] lors de ses travaux, ainsi que des dispositifs connexes tels le simulateur des cycles d'imbibition/séchage de Chéné e*t al* [2000], répondent avantageusement à ces conditions.

Dans le cadre spécifique de l'analyse de l'altération météorique des roches ornementales sur façade ou au sol, on est en plus, amené à tenir compte d'un certain nombre de facteurs. Ces facteurs ont fait l'objet d'un paramétrage au *paragraphe III* du chapitre deux.

Ces paramètres se résument à:

- la vitesse d'impact des gouttes de pluie au sol ;
- l'hygrométrie;
- et températures à la surface de la roche ornementale.

Par ailleurs, on remarquera qu'une étude de l'altération météorique de la roche ornementale ne recherchera que les modifications susceptibles d'affecter principalement, la surface de ces revêtements. Il n'est nul besoin de souligner que c'est cette surface qui manifeste, et même dans la *durée*, l'esthétique du matériau.

Le dispositif à concevoir devra donc répondre, par exemple, aux indications du schéma de la figure n°28.

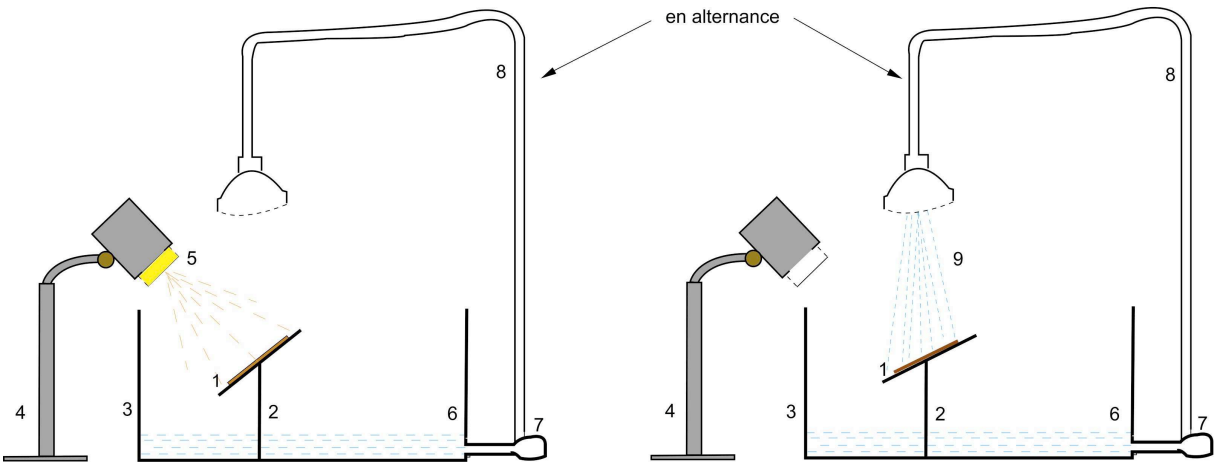


Figure 28: schéma de la base de conception du dispositif expérimental

1. échantillon ou plaque polie de la roche éprouvée. **2.** support en verre. **3.** bac en verre. **4.** projecteur. **5.** faisceau de lumière pour la génération de l'énergie calorifique. **6** eau de pluie. **7.** pompe à eau. **8.** tuyauterie en PVC. **9** simulation de la pluie.

1.2. Prototype d'appareillage pour génération de l'énergie calorifique

La problématique de l'application du gradient thermique en laboratoire a été résolue simplement, en faisant rayonner, vers la surface supérieure polie de l'échantillon, une source d'énergie ponctuelle pouvant générer une puissance maximale P supérieure ou égale à 650 w.

En négligeant, par souci de simplification, les dissipations autres que par rayonnement thermique de la source incandescente utilisée, cela revient à évaluer la puissance d'une source ponctuelle ϕ reçue à valeur ϕ_s supérieure ou égale à 650 w, sur une surface plane circulaire S de 1 m^2, placée à la distance D sur la normale à son centre C.

En considérant que l'air du laboratoire est pur et sec (n est environ égal à 1) ce problème est résolu par les lois fondamentales du rayonnement thermique (SACADURA,1980) ; notamment, la relation entre l'intensité du flux de rayonnement d'une source ponctuelle vers une surface plane découpant une calotte sphérique.

On a alors:

$$\phi_s = \phi \frac{\sqrt{r^2 + D^2} - D}{2 \times \sqrt{r^2 + D^2}} \qquad \ldots[7]$$

dans laquelle:

- ϕ_s : intensité du flux atteignant S (W /sr); sr étant l'unité de l'angle solide
- ϕ : intensité du flux émis par la source (W)
- r : rayon de la surface plane
- D : distance entre la source et la surface plane

En fixant la puissance émise, le problème se ramène donc à déterminer la distance qui permettra d'obtenir, sur la surface plane, une énergie de puissance supérieure ou égale à 650 W. A partir de l'équation7, on obtient:

$$D = \frac{r \times (\phi - 2\phi_S)}{2} \sqrt{\frac{1}{\phi_S(\phi - \phi_S)}} \qquad \ldots[8]$$

$$D = \frac{r \times (2\phi_S - \phi)}{2} \sqrt{\frac{1}{\phi_S(\phi - \phi_S)}} \qquad \ldots[9]$$

Une analyse de la fonction montre que seules les valeurs $f(\phi \succ 3000\ w)$ ne sont pas aberrantes. Elles ne sont d'ailleurs significatives qu'à partir de $f(\phi = 2000\ \ w)$.

Cependant, nous avons pu vérifier, lors des nos premiers essais, que munie d'un réflecteur qui permet en plus la focalisation de son rayonnement thermique sur une surface plus réduite (un peu plus 160 cm^2 dans le cadre de cette étude), une lampe halogène *(figure n°29)* de 1000 W est suffisante.

Et lorsque la plaque est disposée à la *distance* D égale à 0,20 m ; le contrôle de la température de pic à sa surface donne des valeurs (T° oscille entre 75° et 80°) supérieures aux maximales de la figure n°17, mais qui rencontrent la valeur de 70°C, rapportée par Leneuf [1959], lors de ses travaux sur l'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés.

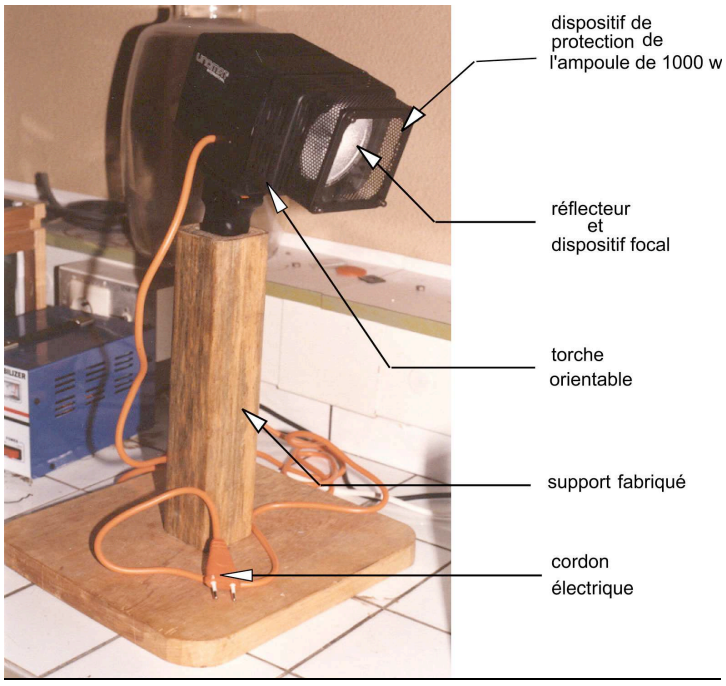


Figure 29: exemple de lampe halogène

1.3. Prototype d'appareillage pour génération du type de pluie

La problématique de génération de pluies, avec, au sol, une vitesse d'impact des gouttes supérieure ou égale à 2,3 m /s, peut être schématisée selon le modèle de la figure n°30.

Au préalable, on a constaté, par le calcul théorique (on ne tient pas compte de la résistance due à l'air), que si une goutte d'eau avec une vitesse initiale U_o tombe d'une hauteur de h *(chapitre deux, paragraphe I-2.1)* sous l'effet de son poids, sa vitesse finale U_f, déterminée à partir de l'expression de la variation de l'énergie cinétique est telle que:

$$\frac{1}{2}mU_f^{\,2} - \frac{1}{2}mU_o^{\,2} = mgh \qquad \ldots[10]$$

Il en résulte que:

$$U_f = \sqrt{2gh + U_o^{\,2}} \qquad \ldots[11]$$

Avec U_0 égale 0 m.s^{-1} et h égale à 0,35 m la vitesse U_f est égale à 2,61 m/s.

On peut donc envisager que, si l'on parvient à lui faire parcourir le chemin AB, la légère pente I imposée au tronçon BC permettra à l'eau d'atteindre D de par la loi de Manning-Strickler (Cauvin et *al*, 1978), exprimée par la relation:

$$Q = S \times U \quad où \quad U = K \times R_h^{\,2/3} \times I^{1/2} \qquad \ldots[12]$$

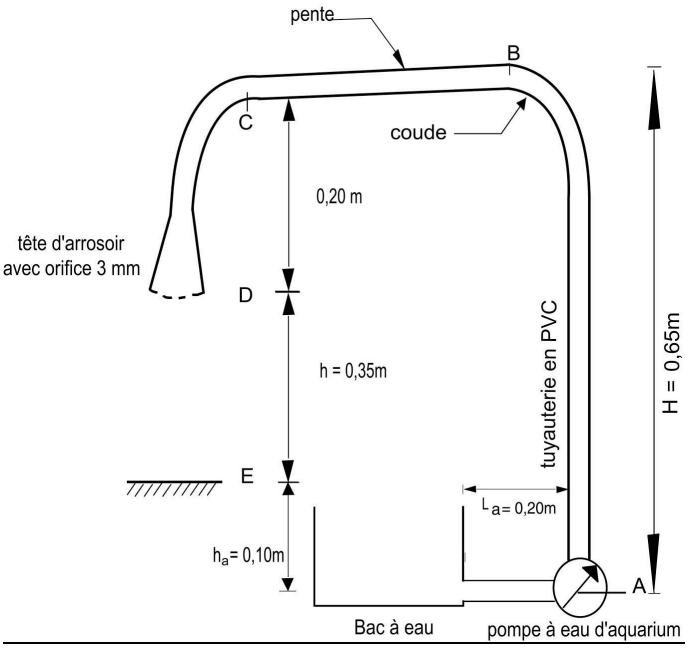


Figure 30: schématisation de la problématique de la génération des pluies

Dans ces deux expressions, S et U représentent respectivement la section du canal et la vitesse d'écoulement du fluide. R_h est le rayon hydraulique du fluide dans le

canal et K le coefficient de rugosité de ce canal. On voit donc que si l'action de la pompe s'arrête en B et, que S, K, et R_h sont connues, Q le débit d'écoulement devient une fonction de la pente I.

L'eau va donc d'abord s'accumuler en D. Par la suite, sa faible compressibilité va l'obliger à s'écouler en respectant la loi de vidange de Torricelli (Carlier, 1972) :

$$U = \sqrt{2gH} \qquad \ldots[13]$$

On rappelle que la valeur du coefficient de compressibilité χ de l'eau est donnée par la relation $\frac{dV}{V} = -\chi dP$ et $\chi = 5.10^{-10}\ Pa^{-1}$; dans laquelle V est le volume d'eau et dV la variation de ce volume sous la variation de pression dP

Dans l'expression de la loi de Torricelli, g est l'accélération, due à la pesanteur et, H équivalant à h_a *(fig. n°30)* est la hauteur de chute du fluide. Ici, c'est donc la pomme *(tête)* d'arrosoir qui se vide par les orifices comme schématisé par la figure n°28.

Le problème se simplifie alors et se ramène à rechercher une *puissance* de pompe (P_p), liée à un débit (Q_p) suffisante pour amener l'eau de **A** à **B**.

Les lois fondamentales de *l'hydraulique*, notamment celles sur *l'écoulement en charge* (VOVARD, 1982) définissent **AB** comme la *hauteur manométrique totale* (H_{mt}) sur laquelle la pompe devra refouler l'eau. Son expression mathématique est :

$$H_{mt} = H_{ga} + H_{gr} \qquad \ldots[14]$$

H_{ga} représente la *hauteur géométrique d'aspiration* de la pompe. Dans le cas de la présente étude, la valeur de H_{ga} se résume aux pertes de charge sur L_a *(fig. n°30)*.

H_{gr} est la hauteur géométrique de refoulement. Son expression est :

$$H_{gr} = H + \Sigma\Delta H \qquad \ldots[15]$$

dans laquelle :

$$\Sigma\Delta H = \Delta H_L + \Delta H_S \qquad \ldots\ldots[16]$$

avec :

$$\Delta H_L = \lambda \frac{L}{\phi_t} \times \frac{U^2}{2g} \qquad \ldots[17]$$

et

$$\Delta H_S = K\frac{U^2}{2g} \qquad \ldots[18]$$

Dans ces expressions, H est la *hauteur de refoulement* et $\Sigma\Delta H$ la somme des *pertes de charge* sur AB. Elle se répartit entre ΔH_L, la *perte de charge linéaire* (sur H_t) et, ΔH_S, la perte de charge singulière (au niveau du coude).

On a aussi λ qui est fonction du *régime d'écoulement*, L et ϕ_t désignent respectivement la *longueur* et le *diamètre* de tuyau et, K, le *coefficient perte de charge* due à la singularité du coude (K=0,1) *(figure n°30)*.

En tenant compte des orifices d'aspiration et de refoulement de quelques pompes disponibles sur le marché, puis de la variation du régime de ces pompes (actionnées par moteur électrique), on prendra ϕ_t = 14,3 mm et λ = 1 (régime turbulent dans le tuyau). Par ailleurs, L_a étant faible, on négligera les pertes de charge sur sa longueur. On calcule donc que :

$$H_{mt} = 0{,}65 + 0{,}005 \times U^2 \qquad \ldots[19]$$

L'inconnue U étant liée à Q_p dans l'expression :

$$Q_p = S \times U \qquad \ldots[20]$$

Et, la *section d'écoulement* S étant connue, il s'agira enfin de retenir un modèle de pompe capable de faire remonter l'eau sur une hauteur caractéristique H_c, supérieure à $H_{mt.}$

Dans le cadre de cette étude, on a retenu une pompe avec Q_p = 580 litres par heure et H_c = 1,10 m. Ces données montrent que H_{mt} est environ égale à 0,65 m et, est inférieure à $H_{c.}$

2. Dispositif : assemblage des prototypes et fonctionnement

Le dispositif *(fig. n°31)* est monté de telle sorte que l'on a la possibilité de faire fonctionner la pompe et la lampe halogène simultanément ou alternativement.

Pour la génération des pluies, le dispositif fonctionne en boucle. Une pompe de 7 watts aspire l'eau de pluie contenue dans un bac et la refoule jusqu'à une pomme d'arrosoir disposée à 35 cm au-dessus de la plaque de roche ornementale.

La pomme d'arrosoir est reliée à la pompe par une tuyauterie en PVC, de diamètre 0,5''. La plaque est sur un support en verre *(fig.n°32).* Ce support est lui-même à l'intérieur du bac à eau de pluie. Le niveau d'eau dans le bac est de telle sorte que la plaque n'est jamais immergée (10 cm au-dessus de l'eau). De la tête d'arrosoir et, après être « tombée » sur la plaque, puis avoir « ruisselé » dans le bac, l'eau de pluie est donc reprise par la pompe

La lampe halogène fonctionne le plus simplement possible. Il suffit de la mettre en marche et de régler ensuite la lumière sur le maximum de la puissance lumineuse (1000 W). Un système de refroidissement, prévu lors de sa fabrication permet son usage en mode continu. L'ampoule a cependant l'inconvénient de « griller » au bout de 8 jours de fonctionnement de l'appareil.

3. Génération des cycles d'état relatifs au climat

3.1. Les gradients

3.1.1. Le gradient thermique

A partir du *paragraphe III-2.2.*, on déduit que, pour provoquer T° et _T° à la surface et dans l'échantillon, il faut générer un rayonnement thermique et faire varier son flux d'intensité.

Pour la recherche des valeurs de températures fortes à la surface et dans l'échantillon, le projecteur est mis en marche *(fig. n°33)*. Par la suite, on pourra faire varier ces températures vers des valeurs plus faibles, avec l'extinction de la source lumineuse**.**

Figure 31: le dispositif pour la simulation des intempéries

1. Lampe halogène sur son support. **2.** Pompe à eau. **3.** robinet d'arrêt. **4.** tuyauterie en PVC ϕ = 0,5''. **5.** Tête d'arrosoir ϕ = 70 mm. **6.** bac à eau en verre (50cm x 40cm x 30cm). **7.** Support de plaque en verre. **8.** Eau de pluie.**9.** Bonbonne en verre de réserve d'eau de pluie. **10.** Secteur d'électricité. **11.** Stabilisateur de tension 220 volts.

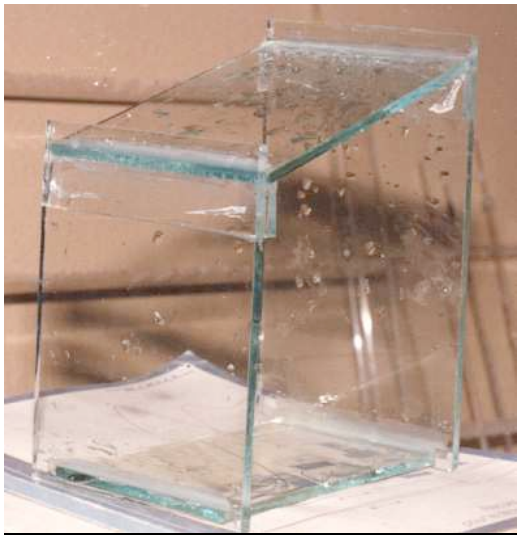


Figure 32: support des échantillons de plaque en verre

3.1.2. Le gradient hygrométrique

Les pluies débutent avec la mise en marche de la pompe à eau. A ce niveau, le taux d'humidité de l'échantillon évolue vers les valeurs maximales (saturation). La pompe dispose d'un robinet permettant de moduler le débit de la « pluie » qui tombe sur les échantillons. On se limitera cependant à la faire fonctionner sous débit maximal *(fig. n°34)* pour tenir compte des 94 % de types de pluie au niveau de l'agglomération d'Abidjan (cf. *§ III* 2.1 chapitre 2). A l'arrêt de la pompe, l'échantillon sera soumis à l'humidité ambiante du local (HR égale à 82 %)

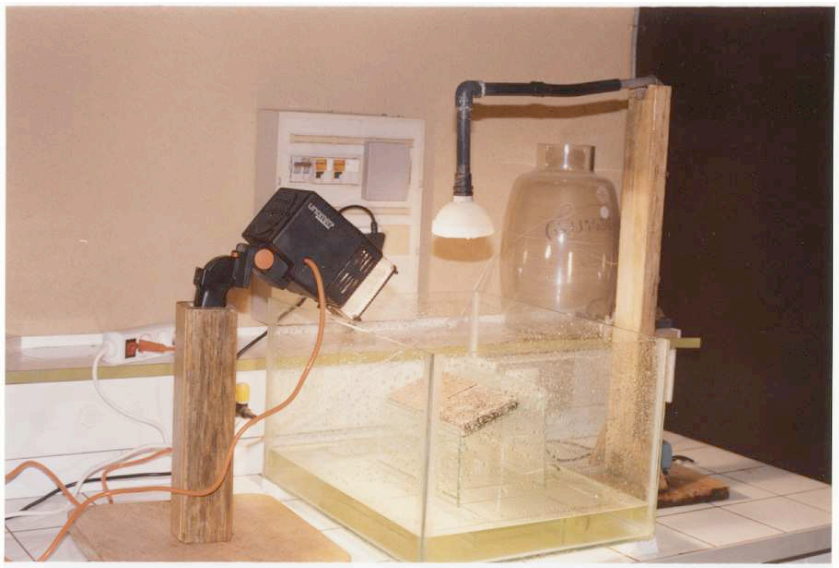


Figure 33: génération de l'énergie calorifique à la surface des plaques

<u>Remarques</u> : Photo prise la nuit après extinction des lumières du local

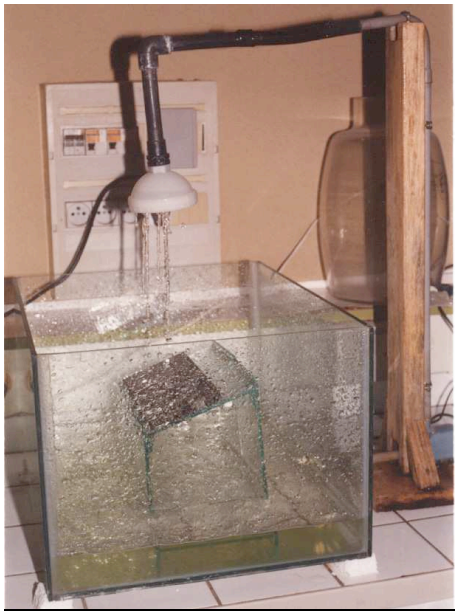


Figure 34: simulation de la phase de pluie

3.1.3. Chronogramme des opérations

Le chronogramme des opérations indiqué par le tableau n° 11 traduit la simulation des cycles d'état relatifs au climat. On rappelle que ces cycles d'état représente les facteurs extrinsèques essentiels lors de l'altération météorique des matériaux pierreux.

Tableau 11: chronogramme des opérations de reproduction des facteurs climatiques de l'altération météorique

Opérations	Heure de démarrage	Heure d'arrêt	Eléments de justification	Durée en heures	Cycle d'état à générer
Arrêt de la pompe	07H 00	-	Répartition des heures de précipitation par 24 heures	-	humidité / dessiccation
De l'arrêt de la pompe à la mise en marche du projecteur	07H 00	09H 00		2	humidité / dessiccation
Fonctionnement du projecteur	09H 00	17H00	Corrélation inverse (r = -0.8) entre HR et Q	08	temps chaud / temps frais gradient thermique entre la surface de l'échantillon et sa sub-surface dilatation différentielle des minéraux dilatation spécifique des minéraux
De l'arrêt du projecteur à la mise en marche de la pompe	17H 00	19H 00	Durée de l'insolation et répartition des heures de pluie	2	temps chaud / temps frais humidité / dessiccation
Fonctionnement de la pompe	19H 00	07H00	Répartition des heures de précipitation par 24 heures	12	humidité / dessiccation

V. Choix de l'analyse colorimétrique pour l'étude de l'évolution de la roche ornementale

1. Pertinence de l'analyse colorimétrique d'images numérisées

Plusieurs approches analytiques ont déjà été mises en œuvre pour étudier et caractériser l'altération des roches. On peut citer entre autre l'analyse mésoscopique de profils, les observations aux microscopes optique et électronique, etc. Avec le développement des techniques d'acquisition d'images en mode numérique, les images numérisées deviennent, de plus en plus couramment, des supports pour caractériser, les phénomènes physiques et chimiques.

Dans le domaine des Sciences de la Terre, certains scientifiques tendent à s'appuyer sur cette approche pour étudier les profils d'altération. En 1999, par exemple, Dekayir et El Maâtaoui, du Département de Géologie de l'Université My-Ismail de Meknès (Maroc), ont montré que l'analyse d'images peut être d'un apport pour l'étude de l'altération des roches. Ils ont basé leurs travaux sur la discrimination des différentes phases minérales d'un basalte alcalin, en fonction des 256 niveaux de gris de l'image. Ce qui a permis de suivre, de manière quantitative, les différents changements de texture intervenant (calculs des proportions de minéraux primaires, secondaires et la porosité) à chaque stade d'altération et leur évolution, du cœur de la boule jusqu'au sol.

A l'origine de la couleur dans les minéraux, on trouve, comme rappelée au point I des annexes, la capacité de leur surface à réfléchir l'énergie incidente. Ce qui, de toute évidence, définit leur réflectance. La réflectance est donc dépendante de l'éclairement reçu. Cette dépendance est mise en évidence lors de mesures en télédétection. Au cours de ces opérations, pour avoir accès à la réflectance d'un objet dans un domaine spectral particulier, sa luminance est mesurée à l'aide de radiomètres classiques.

C'est cette propriété, d'ailleurs extensible à tous les supports d'information, qui est exploitée par les procédés d'acquisition d'images numériques, comme par exemple, avec un scanner à plat *(Chapitre V-2).*

Les images obtenues par l'intermédiaire du scanner sont donc sensibles à la réflectance de la surface des minéraux des échantillons étudiés. On peut déduire de ce qui précède, qu'une *altération météorique* des échantillons, qui va donc impliquer nécessairement une modification du chromatisme des minéraux et la luminance des surfaces polies, pourrait être perceptible par analyse colorimétrique.

Cette déduction est soutenue par les travaux de Gevers et Smeulders [1998]. En effet, dans le cadre d'une étude sur la reconnaissance des objets à partir de leurs couleurs d'origine, ces deux scientifiques ont conclu à l'invariabilité de ces couleurs, lorsqu'elles sont générées par la synthèse additive *(annexe, I)*. Cependant, ces scientifiques ont souligné, qu'au préalable, ces images devront subir un traitement adéquat en vue d'éliminer les distorsions systématiques rappelées par le paragraphe relatif à *l'analyse des images numérisées*.

Cette *altération météorique* pourrait être la cause, d'une perte de poli provoquée par les microfissurations ou, d'une dissolution de matières, ou d'un arrachage de grains. Elle pourrait aussi générer la dissolution ou la migration d'un colorant (colloïdes ferrugineux), le changement de l'environnement atomique dans un cristal ou des minéraux néoformés.

En tout état de cause, l'analyse colorimétrique des images numérisées connaît déjà des applications dans des domaines comme la Paléobotanique et la Palynologie. En 1997, Van der Laar et David, des scientifiques du *Netherlands Institute of Applied Geoscience* l'exploitaient déjà, par exemple, pour caractériser la mutation génétique des spores.

Dans les conclusions de ces investigations, ils ont souligné un point d'importance pour le choix de la méthode : l'analyse colorimétrique des images numérisées se distingue des autres méthodes par la réduction de la subjectivité dans l'étude de la mutation génétique des spores.

Outre ces avantages, on notera, en plus, que la saisie de l'image n'est pas préjudiciable aux essais qui la suivront. Elle se conjugue donc avec la nécessité impérieuse de ne pas changer d'échantillon sur la durée des expérimentations.

2. Mode de quantification d'une image numérisée

2.1. Prise en compte des paramètres de l'appareillage d'acquisition d'image

Lors de la reproduction des couleurs, les appareils de numérisation ne rendent que partiellement compte des nuances au moment de l'acquisition des images. Cela tient du fait que leur gamut *(annexe I-3)* ne couvre que partiellement l'espace de chromaticité dont ils sont issus *(fig. n°35)*.

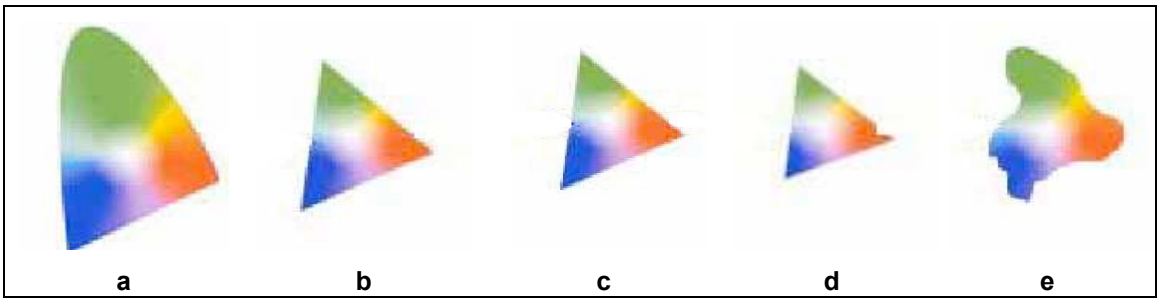


Figure 35: gamuts de différents dispositif d'une chaîne numérique

Source : GretagMacbeth, Color Management [2000]

a. couleur vue par un observateur humain moyen *(espace CIE)*. **b.** couleur restituée par l'appareil numérique *(espace d'un scanner)*. **c.** couleur convertie par le logiciel d'image. **d.** couleur affichée à l'écran *(espace d'un moniteur)* . **e.** couleur imprimée. *(espace d'une imprimante)*.

Les couleurs d'une image scannée vont donc dépendre à la fois du gamut spécifique du scanner et des performances du format du fichier d'archivage. Certains formats

perdant plus d'informations que d'autres lors des la compression du document image.

On s'intéressera principalement au gamut des scanners à plat, modèle de bureau, utilisé dans le cadre de cette étude. Dans son fonctionnement, ce type de scanner ressemble à une photocopieuse. Il utilise des capteurs CCD (abréviation de l'Anglais *Charge Coupled Device :* dispositif à transfert des charges). Ces capteurs sont composés de photodiodes dont la conductivité électrique dépend de l'intensité lumineuse. Les capteurs CCD, sont donc des photo-détecteurs (cellules photoélectriques) qui transforment l'énergie lumineuse reçue en énergie électrique. La lecture de ces signaux donne naissance à un signal vidéo (analogique), ensuite converti en une suite de nombres pour traitement dans l'ordinateur. La couleur et la luminosité du support d'information sont codées suivant la norme RVB (annexe I-3).

Lors de la numérisation, les images sont représentées puis traitées en mode BITMAP (de l'anglais signifiant « carte de points »). Ainsi, une image est décomposée en un ensemble de petits carrés « les pixels » (abréviation de l'anglais « Picture element »). Le côté des carrés est de 10 ou 100 _*m*. A chaque pixel est associé une information : couleur, luminosité, position etc. Lors de la reproduction des couleurs, les scanners fonctionnent selon le principe de la synthèse additive. On rappelle que selon ce principe, chaque couleur est définie par sa composition en Rouge, Vert et Bleu. C'est donc un système à trois dimensions qu'on peut représenter par un cube dont les axes sont les primaires R, V et B *(fig. n°36)*.

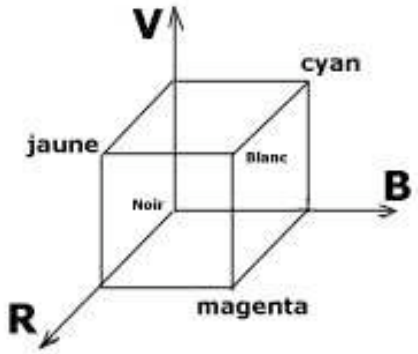


Figure 36: représentation schématique du système RVB dans un repère tridimensionnel
source PHOTOSHOP [2003]

2.2. Expression des équations

En informatique, le codage sur huit bits (1octet) permet de disposer de 256 possibilités pour chacune des trois composantes des couleurs RVB. Chacun des pixels de l'image numérique, réponse à l'éclairage d'un support d'information, est donc issu de l'addition de 0 à 255 possibilités de chacune des composantes chromatiques. Ce qui offre 256^3 couleurs affichables par les moniteurs.

En colorimétrie, la *« quantization »* est une opération qui consiste à réduire le nombre de couleurs d'une image (par exemple de 256^3 à 256), en essayant d'obtenir une palette finale globalement proche des couleurs du support d'information

d'origine. Elle permet l'obtention de fichiers d'images moins lourds afin de faciliter leur stockage et leur distribution notamment, sur Internet.

La première étape de la quantization, rappelée par Reitan [1998], est la construction d'un histogramme, graphe d'occurrences d'un niveau de gris ou d'une couleur. Sa construction exploite la possibilité d'inscrire la totalité des couleurs primaires d'une image numérisée dans la relation mathématique :

$$RVB = \left[(r, v, b) / \; r, v, b \in Z_{256}\right] \qquad \ldots[21]$$

Les images numérisées s'affichant en deux dimensions, une couleur primaire d'une image *f,* peut donc être définie comme la réalisation d'une fonction :

$$f : Z_w \times Z_H \rightarrow C$$

Dans cette expression, W représente la colonne du pixel et H, la ligne. Rapportée dans un système d'axes *x* (abscisse), *y (*ordonnée), *f(x, y)* serait donc la couleur RVB du pixel de la colonne *x* et de la ligne *y*, et $C = \left[c_1, c_2, \ldots\ldots, c_N\right] \subseteq RVB$. *C* est alors une réalisation unique des couleurs primaires composant l'image *f*.
L'histogramme H_f de ces couleurs primaires de l'image *f* peut donc être défini par les fonctions :

$$H_f : RVB \rightarrow N$$

Une réalisation de la variable $H_f(c)$, représente alors le nombre de pixels de l'image *f* qui ont une couleur primaire *c.* L'histogramme informera donc sur la répartition des niveaux de gris et des *niveaux de luminosité* des couches RVB de l'image.

3. Schéma de mise en œuvre

La visualisation d'une image numérisée est la résultante d'une chaîne qui comprend : la carte graphique de l'afficheur, l'écran et son tube cathodique, et l'environnement lumineux.

La dynamique des valeurs contenues dans le fichier dépassant largement les capacités d'affichage cathodique, un écran, même parfaitement calibré pour harmoniser son gamut avec celui du scanner, ne peut distinguer les 256 valeurs d'un fichier de 8 bits. D'où la nécessité d'une étude statistique qui pourra indiquer, pour chaque valeur possible du fichier, le contenu de l'image.

En gestion des couleurs, cette étude statistique aboutit, par réglage, à la mise en conformité des différentes composantes de la chaîne numérique avec la norme recommandée par *l'International Color Consortium* (ICC).

Dans le cadre d'une étude, dont l'objectif sera de caractériser les changements susceptibles d'affecter les coloris, comme lors de l'altération météorique de roches ornementales, cette démarche statistique peut être exploitée pour appréhender l'évolution de la couleur dans les minéraux des échantillons.

En effet, s'il y a *altération météorique* de la surface polie de l'échantillons de roche, il apparaît logique que cela se traduise par une modification de l'histogramme de chacune des trois composantes R, V et B.

Ces analyses qui portent sur des images scannées, pour être dégagées des subjectivités de la perception visuelle humaine *(annexe I-1)*, nécessitent des logiciels, d'abord pour procéder au traitement des images, et ensuite pour conduire leur analyse.

Pour leur fonctionnalité, leur disponibilité au CGI-EMP et leur performance, les logiciels VISILOG 5.4 (Noesis, 2001) et Paint Shop Pro 5.0 (Jasc Software, 1998) apparaissent appropriés.

Parmi l'ensemble des fonctions que possèdent ces logiciels, une fonctionnalité permet le passage du référentiel R V B (Rouge, Vert, Bleu) au référentiel TSL (Teinte, Luminosité, Saturation) *[fig. n°37] (annexe I-3)*.

Visuellement, les modifications de couleur, lors d'essai accéléré, peuvent être définies d'une part comme des variations locales de luminosité de certains minéraux ou groupe de minéraux et d'autre part par un changement de la teinte de certains minéraux.

Classiquement, on sait que l'ouverture de joints de grains, entraîne la constitution d'un film d'air, lequel est responsable d'une diffusion de la lumière incidente qui se traduit part une augmentation de la luminosité.

Les joints de grains en s'ouvrant blanchissent. D'autre part, d'une manière assez classique, dans les granites et les syénites, l'altération des minéraux libère du fer qui du fait de sa faible mobilité va se fixer sous forme de film d'hydroxydes sur la surface et dans les microfissures des minéraux voisins et leur conférer une teinte plus ocre.

Concomitamment, on peut observer une décoloration des minéraux ferromagnésiens altérés (décoloration de la biotite par exemple). Dès lors, il apparaît qu'il est de loin préférable d'étudier les variation de couleurs des échantillons dans un espace TSL *(annexe I-3)* que dans un espace RVB.

On rappelle qu'à la base de notre étude par analyse d'images des variations de couleurs des échantillons durant l'essai d'altération accélérée, il y a l'obtention d'une image *« différence »*.

En chaque point ou pixel de l'image numérisée de la surface de l'échantillon, après une durée donnée d'essai, la couleur peut être exprimée comme un vecteur. La numérisation se faisant dans le référentiel RVB, le vecteur au temps t_1 s'écrit :

$$t_1 = \begin{pmatrix} R_1 \\ V_1 \\ B_1 \end{pmatrix}$$

et au temps t_2, il s'écrit :

$$t_2 = \begin{pmatrix} R_2 \\ V_2 \\ B_2 \end{pmatrix}$$

R_1, R_2, V_1, V_2, B_1 et B_2 sont du fait de la norme utilisée, des nombres entiers compris entre 0 et 255. La différence de couleur, pour le pixel considéré, entre t_1 *et* t_2 est un nouveau vecteur _ qui s'écrit :

$$\text{Ä} = \begin{pmatrix} R_2 - R_1 \\ V_2 - V_1 \\ B_2 - B_1 \end{pmatrix}$$

Pour être correctement représentée dans le référentiel RVB, il faut que chacune des composantes : $(R_2 - R_1)$, $(V_2 - V_1)$, $(B_2 - B_1)$ soit positive.

Ce qui signifie qu'une diminution d'une des composantes RVB, ne peut être correctement représentée. C'est pourquoi, la solution originale de rajouter au vecteur *« différence »* un gris neutre (128 ; 128 ; 128) s'est imposée. De la sorte, la différence de couleur en un pixel donné aura pour composante :

$$\text{Ä}_{diff} = \begin{bmatrix} (R_2 - R_1) + 128 \\ (V_2 - V_1) + 128 \\ (B_2 - B_1) + 128 \end{bmatrix}$$

Ce qui permet de traiter la diminution, même assez forte d'une ou de plusieurs composantes R, V ou B, lors des essais.

Sur l'image représentant en tout point la différence de couleur lors de l'essais, une valeur d'une des composantes R, V, ou B supérieure à 128 traduira un renforcement de la composante chromatique considérée.

Au contraire une composante inférieure à 128 traduira une diminution de la composante chromatique.

Cette démarche conduit à considérer que la puissance de l'énergie lumineuse émise par le scanner reste constante sur toute la durée des travaux.

En effet, par rapport aux conditions de premières numérisations, un déréglage de l'appareil ou une dérive de la puissance de sa lampe peuvent l'amener à restituer des informations qui en fait ne sont pas consécutives à une évolution des minéraux de la roche.

Afin d'éviter ces distorsions ou tout au moins d'en limiter fortement l'impact, on a utilisé un scanner à usage exclusif de cette étude.

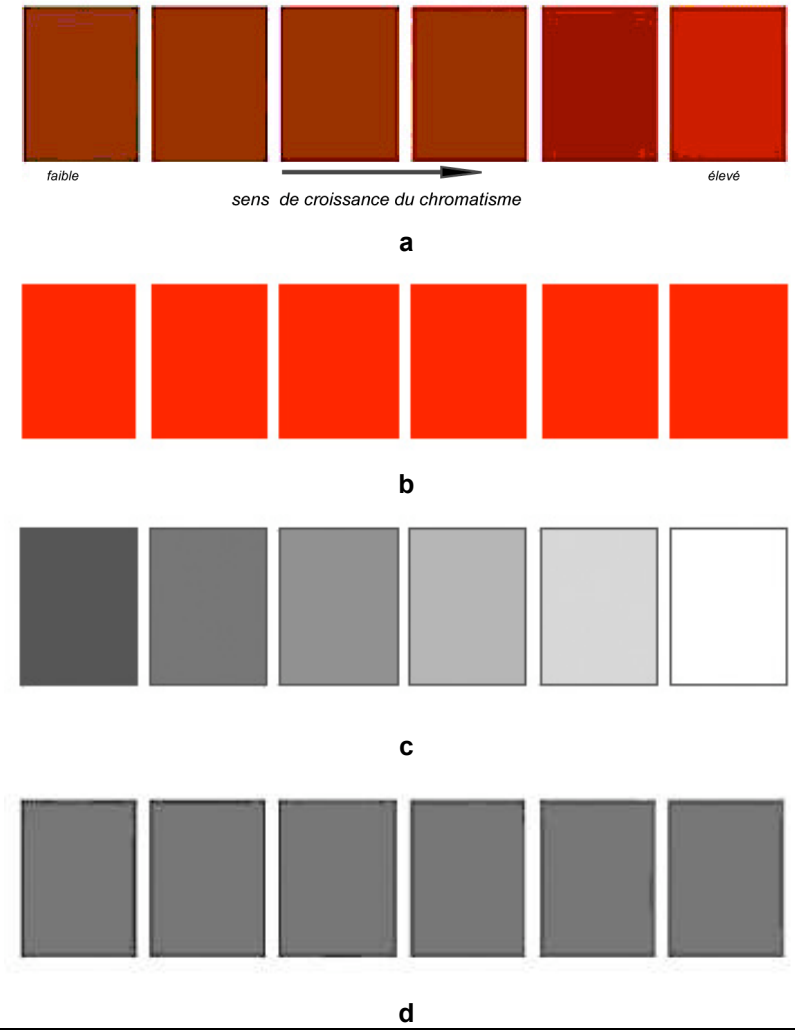


Figure 37: séparation en composante TSL (Teinte, Luminosité, Saturation) de la planche VR 11 Vivid Red de la Charte de Munsell

a. planche de base. **b.** composante teinte (T). **c .** composante saturation (S). **d.** composante luminosité (L).

VI. Conclusion

Comme tout schéma de modélisation, ce chapitre a fait de nombreuses simplifications pour pouvoir concevoir un dispositif simple à mettre œuvre.

En tenant compte du fait que dans la majorité des cas, en zone tropicale humide, ce sont les gradients thermiques (Young & Young, 1992) et hygrométriques (Hasley et *al* [1998]) qui, agissent pour initier l'altération physique à l'origine des microfissurations qui dans la plupart des cas, précèdent et favorisent l'action chimique de l'eau (Bell, 1992), on a donc retenu essentiellement les valeurs extrêmes de ces facteurs climatiques pour concevoir le dispositif et proposer un modèle de fonctionnement.

Ce modèle de fonctionnement quoique simple, peut engendrer des contraintes pendant sa mise en œuvre. En effet, une analyse du tableau n°11 indique la nécessité d'une disponibilité quasi quotidienne du manipulateur au laboratoire. Il y a donc lieu d'envisager son automatisation par exemple, par l'introduction d'un minuteur qui commanderait chacune des durées de marche/arrêt de la lampe halogène et de la pompe à eau.

Evidemment, cette perspective n'est envisageable que si à la suite de cette étude, les essais d'expérimentation qu'on met en œuvre permettaient de valider son principe.

Et de tels essais peuvent ainsi faire l'objet de perspectives, parce qu'on a créé les conditions scientifiques de l'étude de l'évolution de la face polie des échantillons, selon le schéma de mise en œuvre de l'analyse colorimétrique qu'on a élaboré.

Chapitre 3 : mise en œuvre et contrôle du modèle théorique

I. Introduction

Les travaux qui visent la mise en œuvre et le contrôle du modèle théorique procèdent d'abord, à une sélection parmi les gisements ivoiriens, de deux types de roches ornementales. Les roches ainsi choisies, font par la suite l'objet d'une étude pétrographique et d'une analyse de la pétrogenèse.

Ensuite, ce chapitre rend compte des essais qui ont été effectués au laboratoire sur les échantillons de roches ornementales qu'on a élaborés à partir de ces roches. Subséquemment, le mode opératoire selon lequel ces essais ont été effectués a conduit à établir un parallèle entre le milieu expérimental ainsi engendré, et celui de l'environnement naturel de l'altération météorique indiqué au chapitre 2.

Enfin, une analyse colorimétrique de la différence entre les images numérisées à 00 mois et à 12 mois des échantillons testés, suivie d'une interprétation des résultats obtenus complètent ce chapitre 3.

II. Choix des roches ornementales des Gisements d'Okrouyo et de Yakala pour les expérimentations

1. Motivation des choix

L'étude des roches ornementales de la Côte d'Ivoire a démarré dans le milieu des années 1960. Les premières campagnes de prospection, initiées par la Société pour le Développement Minier de la Côte d'Ivoire (SODEMI), une société d'Etat, et conduites par H. Madon entre 1969 et 1973 ont révélé au total quatre vingt (80) gîtes. Ces massifs, tous d'origine magmatique sont partagés entre granitoïdes (60%) et formations basaltiques (40%).

Au début des années 1990, sur la base de critères relatifs à la connaissance du gîte et à la qualité des surfaces obtenues par polissage, des études ont été entreprises en vue de susciter des investissements dans le secteur des carrières de pierres ornementales. Elles ont porté sur dix huit gisements *(fig. n°38)*. Parmi eux, ceux de Okrouyo et Yakala se révèlent les plus intéressants, au regard de la taille et de l'accessibilité des réserves, des premières études de rentabilité, et enfin de la qualité exportable de leurs polis. Depuis 1998, dans le souci d'intéresser les investisseurs internationaux à la mise en valeur de ces ressources, la SODEMI a entrepris une campagne sur les pierres ornementales d'Okrouyo et Yakala .

Ces deux gisements ont d'ailleurs déjà connu des phases d'exploitation, soit à des fins expérimentales, soit pour des travaux ponctuels de carrelage, lors de la construction d'édifices publics.

C'est ainsi que dans les années 1970, l'on a exploité les matériaux de Yakala et d'Okrouyo, respectivement pour le revêtement des escaliers intérieurs du Lycée Scientifique de Yamoussoukro et le carrelage intérieur de l'immeuble ALPHA 2000

d'Abidjan. Au début des années 1980, l'on a encore utilisé le matériau d'Okrouyo, pour le revêtement intérieur de l'immeuble du Centre de Commerce International d'Abidjan.

La réalisation de ces anciens travaux ponctuels sur ces deux gisements a l'avantage, pour notre étude, d'avoir laissé à disposition, des blocs encore *« sains »*, critère qui, conjugué avec la taille de ces blocs, est des plus importants, lorsque l'on ambitionne le façonnage des échantillons.

A l'issue des travaux de terrains, on a donc convenu de retenir ces deux massifs pour le façonnage des échantillons devant permettre d'éprouver le dispositif expérimental. Ce qui, subséquemment, pourrait aussi conduire à appréhender un *aspect* du « vieillissement » de ces deux types de matériaux de revêtements, lorsque ceux-ci, en conditions d'utilisation, seront soumis à l'action des facteurs de l'altération météorique.

Les critères qui ont conduit à choisir les gisements des massifs d'Okrouyo et de Yakala peuvent donc être résumés comme suit :

- la disponibilité de blocs « primaires » pour le façonnage des échantillons ;
- l'accessibilité des sites ;
- les perspectives de mise en valeur de ces deux gisements qui devraient conduire des recherches relatives au comportement de ces matériaux, notamment, si ceux-ci sont en conditions d'utilisation, dans un environnement urbain.

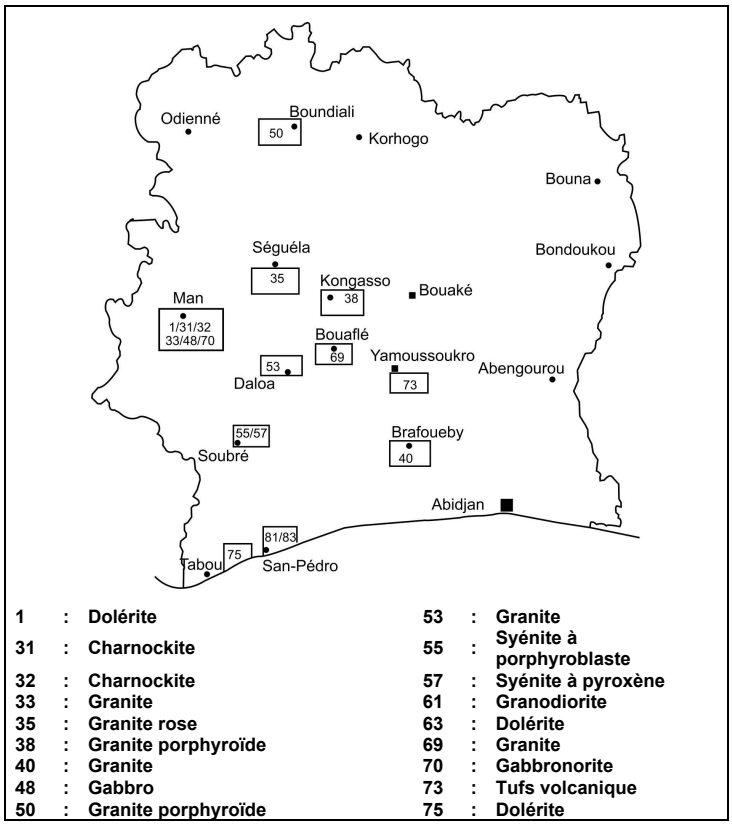


Figure 38: localisation des gisement des pierres ornementales en Côte d'Ivoire

source SODEMI [1969]

2. Géologie du Gisement d'Okrouyo

Le « Gisement d'Okrouyo » doivent leur dénomination à Okrouyo, chef lieu de sous-préfecture et de canton situé à 30 km de la ville de Soubré son chef lieu de Département *(fig. n°39)*. La ville de Soubré est elle-même situé respectivement à 135 km du Port de San Pedro, à 98 km de Gagnoa (capitale de Région), à 450 km du Port d'Abidjan (Capitale économique) et à 240 km de Yamoussoukro (Capitale politique de la Côte d'Ivoire). Le « gisement d'Okrouyo » est constitué par l'ensemble des trois massifs du mont Troquoi.

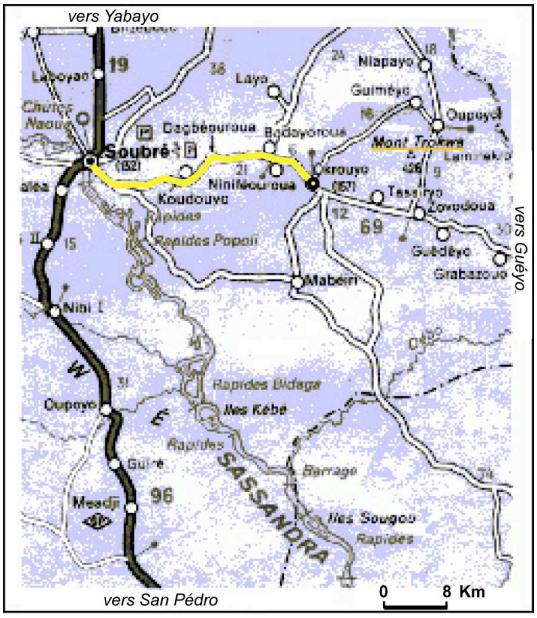


Figure 39: localisation des Mt Troquoï

Extrait de la carte Michelin 957 - édition 2000

2.1. Géographie et morphologie régionale

Sur le plan orographique, la région de Soubré se présente comme une pénéplaine légèrement ondulée, d'altitude moyenne 160 mètres et, inclinée vers la mer, avec une pente moyenne de 0,1%. Les reliefs de ce paysage sont :

- les Monts Troquoi dont les trois sommets, de forme ramassée, dominent avec leurs côtes respectives de 426, 444 et 445 mètres *(fig. n°40)* ;
- les petites hauteurs alignées au Sud de Téréagui, dont les côtes du Sud au Nord sont respectivement de 225, 216, 208, 388, 219, 246 mètres.

L'hydrographie, caractéristique du Sud–Ouest de la Côte d'Ivoire, est marquée par un « chevelu hydrographique » dense et un régime irrégulier des rivières. La région est traversée par le fleuve Sassandra et ses principaux affluents régionaux tels le Nawa, le Bou, le Manié etc.

Au plan climatique, Soubré est à la lisière de la Zone Climatique Sud de la Côte d'Ivoire. Les précipitations annuelles, pour 111 jours de pluies par an avoisinent 1700 mm.

La température et le degré hygrométrique prennent des valeurs remarquablement constantes au cours de l'année à savoir :

- environ 26 à 32° pour la température ;
- environ 75 à 90 % pour le degré hygrométrique.

Les vents sont généralement faibles, à dominance Sud. Cependant, au début du mois de janvier, on observe pendant quelques jours un refroidissement de la température dû à l'Harmattan, vent sec venant du Nord.

Le couvert végétal autrefois constitué par une forêt primaire avec des essences rares, tend à faire place à une forêt dégradée ou en reconstitution, et à de grandes plantations industrielles.

Au plan socio-économique, la région de Soubré regroupe de nombreuses plantations de palmiers à huile et d'hévéas auxquelles s'ajoutent des champs de caféiers et de cacaoyers, propriétés de petits planteurs villageois.

A coté de ces produits de rente, on y pratique également les cultures de riz, de maïs, de tubercules (igname, tarot, manioc, etc.), de banane plantain ainsi que des légumineuses et autres plantes potagères. L'élevage de bovins et de caprins y est dans une phase d'introduction.

Le tissu industriel peut se résumer aux installations de premier traitement des graines de palme et de la sève d'hévéa auxquelles s'ajoute l'industrie du bois.

Cette « richesse » économique a fait affluer vers Soubré des ivoiriens du Nord et du Centre ainsi que des africains des Pays limitrophes (Ghana, Mali, Niger, Burkina Faso, Guinée, Libéria, etc.). Ce qui fait de cette région l'une des plus peuplées de la Côte d'Ivoire.

2.2. Géologie locale

La géologie de Soubré est marquée par les formations libériennes qui débutent l'histoire géologique régionale. Les faciès dominant sont les gneiss de composition tonalitique, migmatisés et recoupés par des veines de mobilisats leucocrates, de compositions granitiques (Kouamelan, 1996). Ces Auteurs considèrent ces gneiss migmatisés comme des reliques archéennes au sein des formations birimiennes.

Ce socle libérien est intrudé par des massifs de granites, granodiorites, et syénites « type Mont Troquoi » selon la classification adoptée par Papon [1973] pour les roches plutoniques du Mégacycle Eburnéen *(annexe IV)* du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire.

Les travaux sur roche totale et feldspath potassique de Papon *et al* [1973] qui datent l'intrusion syénitique du Mont Troquoi d'environ 1550 M.a. situent la mise en place, probablement métasomatique, de ces formations à la phase tardive de l'orogénie géotectonique éburnéenne.

Les sols sont constitués par une juxtaposition de sols ferrallitiques, qui subissent un début de lessivage suite à la disparition de la couverture de forêt primaire, et de sols ferrugineux tropicaux, dérivés des colluvions sablonneuses.

Figure 40: une vue des collines du Mt Troquoi

2.3. Minéralisation et réserves

2.3.1. Etude pétrographique des syénites du Mt Troquoi

2.3.1.1. Analyse macroscopique

Lors des travaux de terrain, on a pu observer, au bas de la plus grande colline des blocs rocheux avec des aspects suggérant un caractère porphyroïde à l'observateur *(fig. n°41).* Les feldspaths alcalins qui constituent l'essentiel de la roche peuvent atteindre parfois 2 à 6 cm de long *(fig. n° 41)*.

Ils paraissent sub-automorphes et, quelque fois, ont des bordures quelconques, au contact avec des minéraux leucocrates *(fig. n° 41)*. Par endroits, on observe un alignement de ces cristaux traduisant ainsi des lignes d'écoulement lors de la cristallisation du magma.

Une observation beaucoup plus attentive de la figure n°41, exprimée par une carte qui met en exergue les contours de ces feldspaths alcalins *(fig. n° 42)*, semble indiquer que la roche a une texture orientée.

La texture fortement orientée, est caractérisée par des empilements de grandes lattes parallèles de feldspaths alcalins gris-rosâtres *(Fk)* à contacts jointifs, laissant peu de place pour un « mortier » de ferromagnésiens et de plagioclases.

Ce mortier se concentre essentiellement entre des piles de lattes Fk voisines, ainsi que dans des zones de cisaillement de la trame originelle des Fk.

Il est difficile d'imaginer que l'orientation des grandes lattes feldspathiques soit due à la convection magmatique. Il semble plus probable que ces grandes lattes soutirées du magma convectif se soient accumulées par gravité et effet de tuilage dans une zone particulière du réservoir magmatique probablement une bordure du pluton ou une paroi d'un conduit magmatique.

Dans l'empilement de lattes feldspathiques $\mathbf{a_2}$ par exemple, on dénombre plus d'une dizaine de cristaux de feldspaths alcalins empilés les uns sur les autres dans le sens des grandes dimensions. En s'appuyant sur les travaux de Bard [1980], on déduit que cet agencement des minéraux traduit une *texture de cumulats*.

Une telle texture est très rare avec des feldspaths alcalins et, c'est probablement là un des éléments qui fait la rareté et la beauté de cette roche.

Les phénocristaux d'orthoses représentent le minéraux orthocumulats, alors que les plagioclases et les minéraux ferromagnésiens représentent les minéraux intra cumulus. On remarque qu'une partie des plagioclases forme des couronnes discrètes en périphéries des lattes de feldspaths alcalins (*pseudo auréoles Rapakivi*).

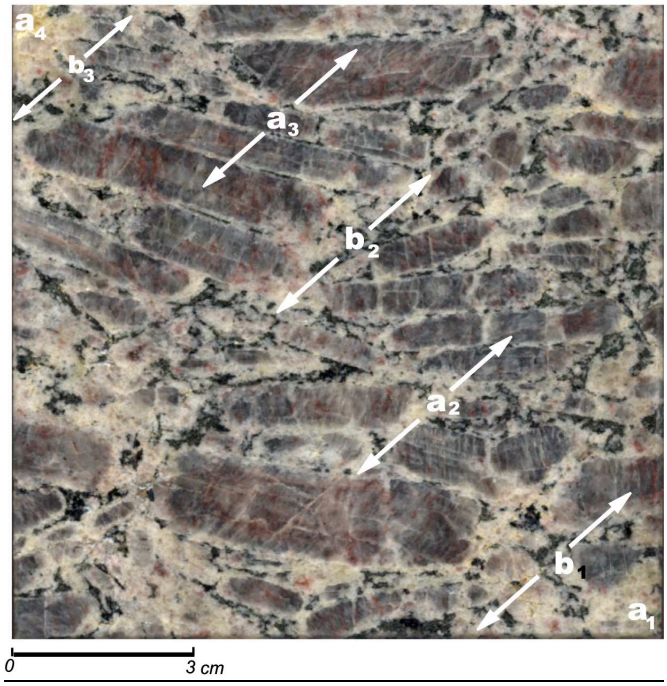


Figure 41: plaque polie de la syénite d'Okrouyo.

On observe les empilements (**a**) de grandes lattes des feldspaths alcalins entre lesquels viennent s'intercaler (**b**) les plagioclases et les minéraux ferromagnésiens.

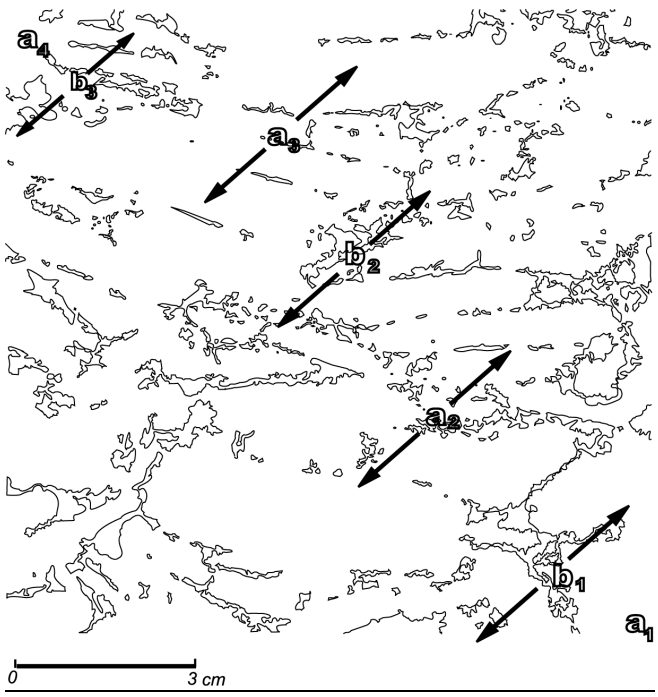


Figure 42: carte soulignant l'alternance des phénocristaux et des ferromagnésiens

Remarques :

Certains phénocristaux des feldspaths alcalins apparaissent courbés voire pliés dans leur partie médiane. L'observation de détail montre que ces cristaux ont été fracturés de manière précoce au contact de cristaux voisins, par écrasement de l'assemblage des phénocristaux alors que le magma résiduel était encore liquide.

Il est également remarqué que les plus grandes zones à plagioclases et amphiboles dominants sont sub-parallèles entre elles et forment un angle d'environ 45° à 60° (fig. n° 49) avec la direction d'allongement moyenne des phénocristaux.

Ceci nous amène à penser que le cumulat de phénocristaux a subi une déformation avant la solidification du magma résiduel lors de laquelle ont cristallisé les plagioclases et les amphiboles.

2.3.1.2. Analyse microscopique

En lame mince *(fig. n°s 43, 44 et 45)*, les phénocristaux sont des microclines perthitiques et des orthoses. Ils composent la roche à près de 45%. Entre ces grands cristaux apparaissent le plagioclase (40%), le microcline, le quartz (rare), les amphiboles, les pyroxènes, la titanite et les oxydes (4 à 6%). Les plagioclases ne montrent aucune orientation préférentielle et sont maclés "albite" ou "carlsbad", avec une composition d'oligoclase et d'albite. Le microcline en très faible quantité se retrouve parfois en inclusions dans le plagioclase. Le quartz, dont la proportion est très faible, est quelques fois globuleux ou bipyramidé. Les amphiboles sont vert-bleutées et peuvent se retrouver en inclusions dans certains pyroxènes

(pœciloblastes). La titanite (sphène) se présente en grands cristaux automorphes, sub-automorphes ou xénomorphes en contact avec les pyroxènes et les amphiboles. Les oxydes de fer (magnétite) sont parfois abondants dans les zones où l'on retrouve la titanite. La présence de titanite, d'oxydes de fer, de pyroxènes pœcilitiques peut être exprimée par l'équation suivante (adaptée de Liou et *al*., 1974) :

$$\textit{Pyroxène} + \textit{Plagioclase (oligoclase)} + H_2O + Fe_2O_3$$
$$\Rightarrow \textit{Albite} + \textit{Epidote} + \textit{Amphibole} + \textit{Quartz} \pm \textit{Chlorite.}$$

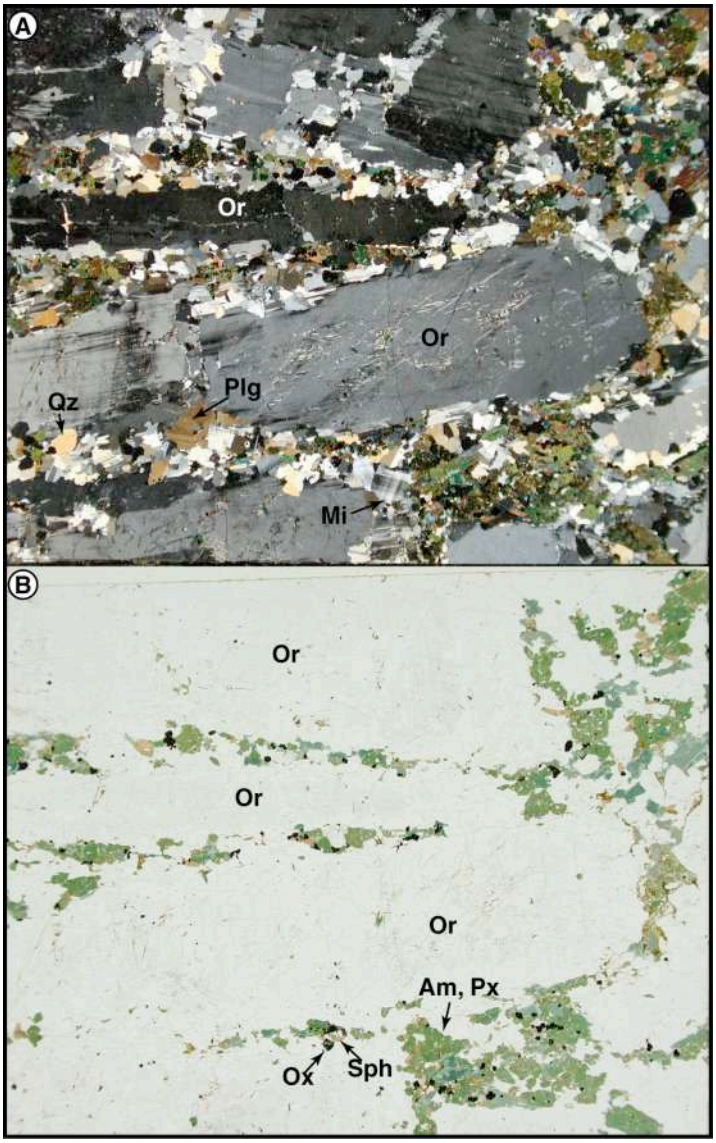


Figure 43: planches photographiques de lames minces montrant la texture globale de la roche.

(A = lumière polarisée ; B = lumière naturelle)°

Grossissement 4X.

Ox = oxydes; **Qz** = quartz; **Plg** = plagioclase; **Or** = orthose; **Mi** = microcline; **Am** = amphiboles; **Px** = pyroxène; **Sph** = sphène.

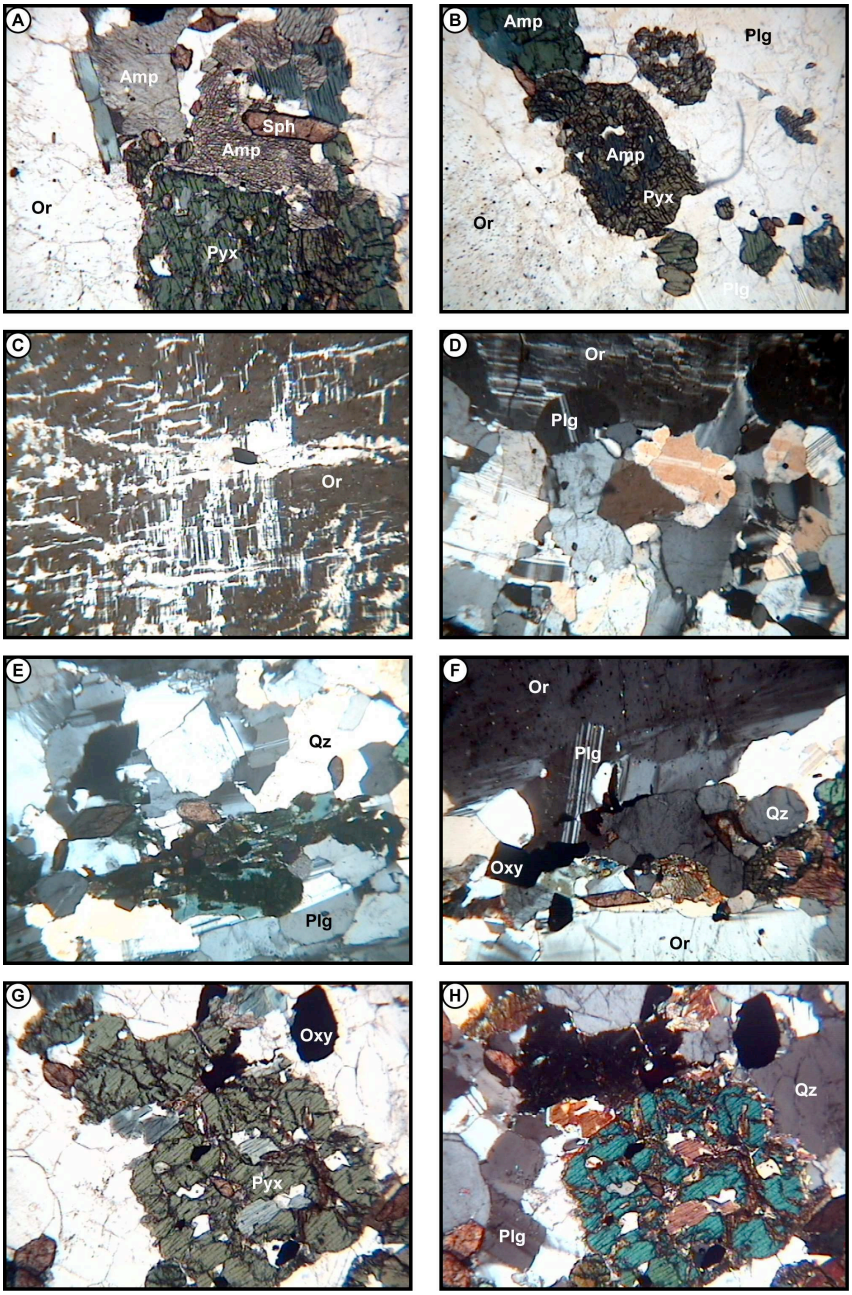


Figure 44: planches photographiques de lames minces montrant quelques minéraux.

(Lumière polarisée sauf les images B et G). Grossissement 20X.

Oxy = oxydes; **Qz** = quartz; **Plg** = plagioclase; **Or** = orthose; **Mi** = microcline; **Amp** = amphiboles; **Pyx** = pyroxène; **Sph** = sphène.

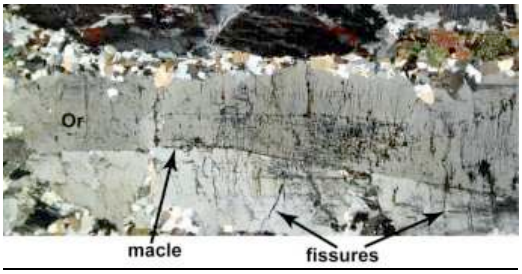


Figure 45: cristal d'orthose (Or) montrant une macle et de nombreuses fissures.

2.3.2. Analyse de la microfissuration

L'observation des lames minces montre deux types de microfissuration *(fig. n°46)*. Le premier type est une simple fissuration des minéraux. Ceci pourrait être dû au façonnage de la lame mince. Le second type constitue des microfractures (dans les phénocristaux de feldspaths alcalins) remplies par du quartz microcristallin qui n'est pas forcément en continuité optique avec les quartz situés entre les phénocristaux de feldspaths alcalins. Cela témoigne de la cristallisation postérieure du quartz microcristallin.

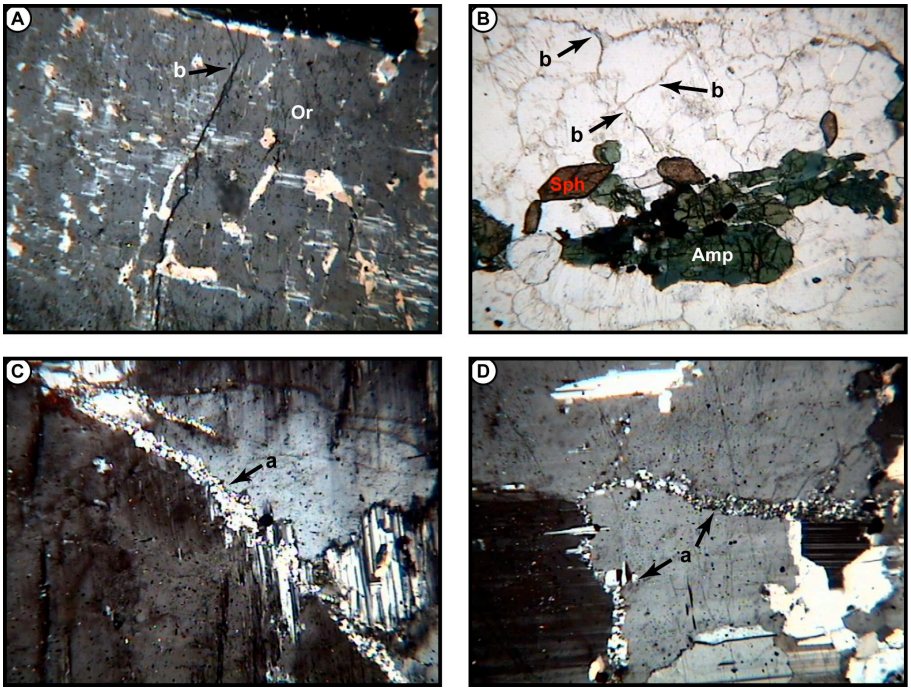


Figure 46: fissurations dans la syénite d'Okrouyo indiquées par les flèches.

Grossissement 20X.

a = fissures primaires "magmatiques" remplies secondairement par du quartz microcristallin; **b** = fissures provoquées par le façonnage de la lame mince ?.

2.3.3. Indications sur la pétrogenèse

Pour amorcer une approche de la genèse des syénites du Mt Troquoi, ces travaux se réfèrent, de nouveau, à l'étude sur les « Microtrextures des Roches Magmatiques et Métamorphiques » de Bard [1980], et s'inspirent notamment des « Textures des Systèmes Précipitant des Phases Solides de Densités Différentes ».

Dans les roches cumulatives, les premiers cristaux qui se forment en s'accumulant par gravité ou par cristallisation in situ sont appelés *cristaux cumulus*. Ils sont automorphes à sub-automorphes distincts des autres *cristaux post-cumulus* xénomorphes qui proviennent de la cristallisation du liquide interstitiel. Dans le cas présent, on assisterait précisément à une descente par gravité puis à un tuilage dû à un flux laminaire au plancher du pluton *(fig. n°47).*

Les minéraux les premiers formés dans la chambre magmatique, seraient les phénocristaux d'orthose. En l'absence de brassage très violents consécutifs à l'existence de mouvement convectifs et, d'une prise sur place du liquide magmatique, on peut concevoir que ces phénocristaux ont quitté lentement l'endroit où ils se sont formés pour descendre vers un plancher.

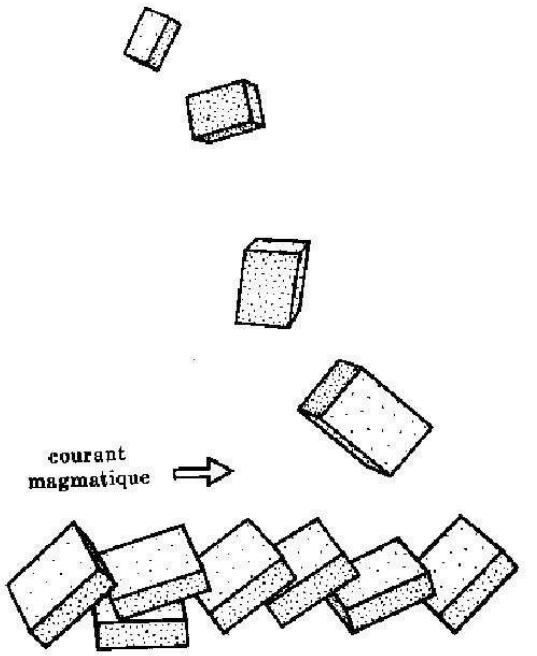


Figure 47: processus [(1)]de (tuilage) à l'origine des textures cumulatives
source : Bard [1980]

(1) Descente par *gravité*, des minéraux plus denses que le liquide résiduel et allure qui sera prise par les cristaux vers le *« plancher »* de la chambre magmatique lorsqu'il existe un courant de matière de faible amplitude *« texture en tuiles »*

Cette décantation reste gouvernée par la loi de Stocke à savoir :

$$V = \frac{2r^2(\Delta d)g}{\partial\eta}$$

Où : V = vitesse de chute d'un objet sphérique ;
r = rayon de l'objet ;
g = accélération de la pesanteur ;
Δd = différence de densité entre l'objet et le milieu ambiant ;
η = viscosité du milieu ambiant.

Le plagioclase, le microcline, les rares quartz, les ferromagnésiens et les oxydes seraient donc des minéraux interstitiels *germés* à partir du magma du plancher. Dans la terminologie de Bard [1980], ceux-ci sont des minéraux *intra-cumulus*, par rapport aux minéraux-cumulus (les phénocristaux).

Les plagioclases, qui se présentent en fait comme des couronnes discontinues des phénocristaux *(fig. n°41)*, sont contemporains de la cristallisation des phases inter-cumulus.

De ce qui précède, ont peut donc préciser, selon la classification de Bard [1980], que les syénites du Mont Troquoi ont une texture en *orthocumulats* de type gîtes de ségrégation (Baronnet, 1988). Ce qui va à l'encontre des hypothèses de Papon [1973] qu'on a rappelées à la page 56.

Les minéraux cumulus qui ont *germés* en un point plus haut de la chambre magmatique, donc certainement en milieu acide, ont du s'accumuler dans un environnant plutôt basique (composition gabbroïque de la roche si on ne tient pas compte des minéraux cumulus). Cela pourrait, au demeurant, expliquer l'aspect sub-automorphe de ces phénocristaux dont les faces paraissent corrodées *(fig. n°48)*. Cette forme corrodée serait donc le résultat d'une réaction chimique entre ceux-ci et le liquide magmatique interstitiel.

Enfin, on remarque aussi, que la forme de certains phénocristaux *(fig. n°49)*, semble témoigner d'une réponse à des contraintes. Ces contraintes dont les causes restent à préciser, peuvent avoir été induites par le poids de cristaux d'empilement ou par des forces intra-magmatiques. Elles pourraient avoir généré des couloirs de dislocations dans ces minéraux *(fig. n°49)*.

Ces couloirs de dislocation ont certainement favorisé la distribution de couleurs rouges, presque parallèles les uns aux autres, et qui s'y seraient installées. D'où la *texture mosaïque* de ces minéraux. On rappelle que les couloirs de dislocation sont des zones favorables à l'altération.

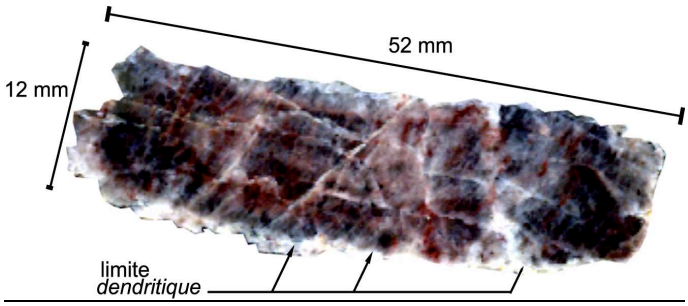


Figure 48: image mettant en évidence les formes des phénocristaux d'orthose perthitique

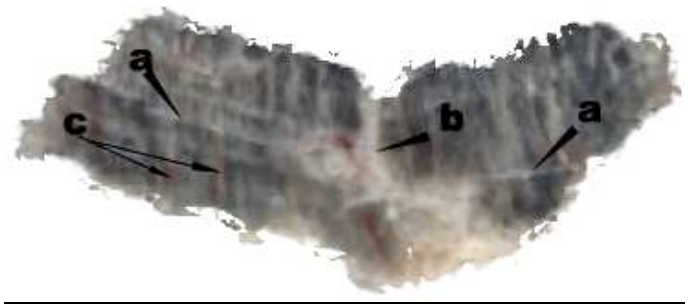


Figure 49: phénocristaux disloqué en deux morceaux

a. macle se poursuivant de part et d'autre de la cassure et témoignant que les deux morceaux proviennent d'un même cristal. **b.** cristallisation de minéraux post-dislocation. **c.** coloris rouge soulignant les couloirs de dislocation. On remarque que ces coloris sont parallèles à la trace de la cassure

2.3.4. Les réserves

Le gisement d'Okrouyo est formé par deux collines qui dominent (250 m) le paysage environnant. Chacune des collines contient 70 millions de m^3 de syénite (SODEMI, 1998). La production envisagée sera orientée principalement vers le marché local et le marché des Etats de l'Union Européenne.

3. Géologie du Gisement de Yakala

Le « gisement de Yakala », comme ceux de Okrouyo, doit sa dénomination au village de Yakala sis au PK 17 sur l'axe routier Séguéla-Béoumi *(fig. n°50)*. Séguéla, le chef lieu de Département, est distant de Yamoussoukro, du Port de San Pedro et du Port d'Abidjan respectivement de 270 km, 362 km et 628 km.

3.1. Géographie et morphologie régionale

La région de Séguéla a connu sa période d'abondance économique, d'abord avec l'exploitation industrielle des occurrences détritiques diamantifères dans les années 1960 et milieu 1970. Dans les années 1980, l'avènement de l'exploitation artisanale et semi-industrielle de l'or et du diamant a dynamisé de nouveau la région. Et cela s'est traduit notamment par une affluence de maliens, burkinabés et guinéens vers la région. Toutefois, avec environ 20 habitants au km^2 Séguéla est aujourd'hui classée parmi les régions les moins peuplées de la Côte d'Ivoire.

En plus de plantes potagères et autres légumineuses, la grande partie de cette population cultive des céréales (riz, mil, maïs, sorgho), et des tubercules (ignames et manioc). On rencontre aussi quelques champs de caféiers et de cacaoyers. La culture la plus soutenue est le coton. L'activité industrielle se limite d'ailleurs aux usines d'égrenage construites pour un premier traitement du coton. Séguéla est aussi une zone à élevage de bovins : à côté des éleveurs traditionnels, une activité d'élevage extensif (*ranching)* traduit le dynamisme de ce secteur.

L'orographie est celle des plateaux avec altitudes moyennes au-dessus de 200 m. Ce relief plat est cependant tourmenté en de nombreux endroits par des collines souvent dénudées, dont celles des Mt Mariame de Yakala (250m).

Sur le plan hydrographique, Séguéla fait partie du bassin du Bandama. Les cours d'eau régionaux sont le Yani et la Marahoué. Le Yani est un affluent de la Marahoué appellation locale du Bandama.

Le sol est latéritique. Il y pousse une végétation faite de savane arbustive typique du climat de transition de la zone tropicale. Les précipitations oscillent entre 1200 et 1300 mm avec 80 jours de pluies par an. Les températures maximales et minimales à l'ombre sont respectivement de 38° et 23° et l'humidité relative est, plus proche de 75%. Le vent dominant est l'Harmattan.

3.2. Géologie locale

La géologie de la région de Séguéla est dominée par les constituants des massifs intermédiaires de Korhogo : les granites rubanés (Tagini, 1971). D'après cet auteur, les massifs intermédiaires sont des noyaux antébirimiens *(annexe IV)* qui se présentent le plus souvent comme des zones allongées, parfois de plus de 500 km pour 25 à 100 km de large. Toutefois, certains forment des dômes en « dos de baleine », grossièrement circulaires. Ils sont hétérogènes : on y reconnaît, d'une part des roches granitoïdes libériennes (divers granites) et, d'autre part, des granitoïdes éburnéennes souvent difficiles à identifier. Quoique constitués de matériels originels libériens, ils sont classés comme structures éburnéennes par la géotectonique régionale.

Aux environs de 2000 M.a. l'unité structurale de Korhogo a connu les intrusions par les granites éburnéens qui traduisent aujourd'hui les nombreuses collines dénudées dont celles de Yakala *(fig. n°51)*.

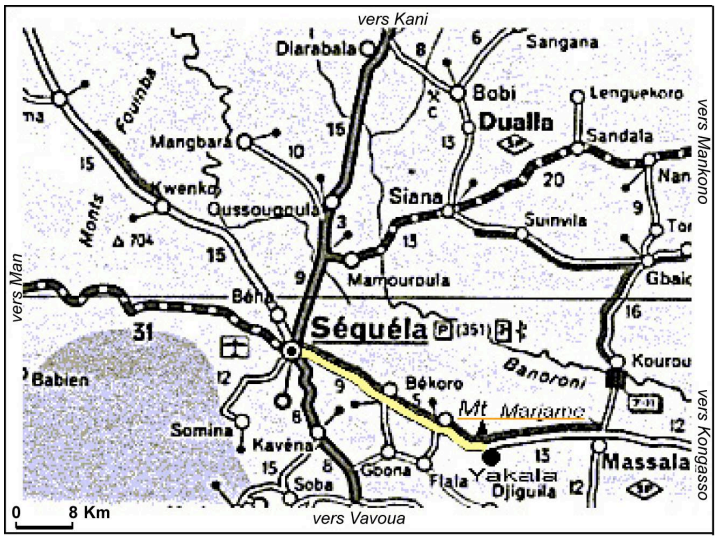


Figure 50: localisation des gisements de Yakala

Extrait de la carte Michelin 957 - édition 2000

Figure 51: une vue des collines du Mt Mariame

3.3. Minéralisation et réserves

3.3.1. Etude pétrographique des granites « roses » de Yakala

3.3.1.1. Analyse macroscopique

Les collines du mont Mariame montrent plusieurs faciès pétrographiques. Ce sont principalement des granites à biotite, des aplites, des pegmatites et les granites roses.
Dans ces granites *(fig. n°52)*, les minéraux roses sont de taille moyenne et laissent entrevoir une texture initialement plus ou moins porphyroïde.

Ces minéraux qui seraient des feldspaths rose (orthose et microcline) sont en forte proportion dans la roche (60%). Les analyses macroscopiques révèlent aussi le quartz et les plagioclases qui forment ensemble 35 à 38% des constituants de la roche. En ce qui concerne le quartz, on remarque qu'il est parfois en inclusion dans les feldspaths roses. On note enfin de la biotite (2 à 5%).

Une carte des contours des grains de feldspaths roses *(fig. n°55)* indique les formes à tendance parfois polygonales bien régulières de ces minéraux.

Par ailleurs, on remarque que, des fragments de cristaux maintenant séparés par d'autres minéraux de la matrice, semblent avoir été autrefois être jointifs *(fig. n°56)*.

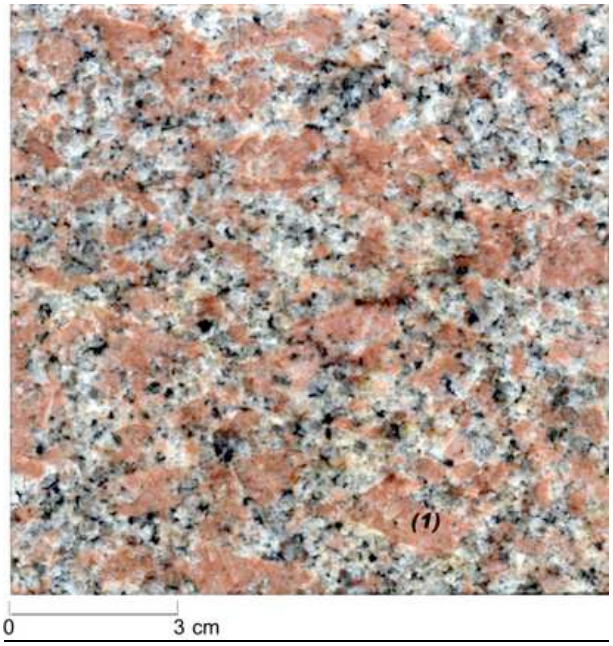


Figure 52: plaque polie du granite rose de Yakala.
(1)cristal repris par les figures n°s 56 et 57.

En **« rose »:** les feldspaths alcalins porphyroclastes. En **« blanc »** : quartz et plagioclases. En **« noir » :** la biotite et les oxydes.

3.3.1.2. Analyse microscopique

En lame mince *(fig. n°s 53, et 54)*, la texture est grenue ± porphyroïde. Le microcline est perthitique et peut contenir des inclusions de quartz ± globuleux présentant une forte extinction roulante.

Entre les feldspaths alcalins, le quartz est parfois automorphe et peut présenter des structures (sous-grains) en échiquier "chess-board".
Ces structures seraient le témoin d'une déformation à l'état solide et à haute température (déformation intervenant avant la cristallisation complète du magma) selon Bouchez *et al*., [1992]. Le plagioclase (albite) est souvent altéré (saussuritisation).

Les minéraux les moins abondants sont la biotite brunâtre à verdâtre en voie de chloritisation, quelques muscovites qui semblent secondaires, des épidotes et quelques zircons.

Des microfissurations apparaissent dans les minéraux et sont peut-être en relation avec le façonnage de la lame mince *(fig. n°54)*. Très peu de fractures sont remplies par des minéraux.

3.3.2. Indications sur la pétrogenèse

La compilation des résultats des précédentes analyses indique, en définitive, que les granites roses de Yakala ont une texture grenue avec des figures cataclastiques. Dans de son étude des « Microtextures des Roches Magmatiques et Métamorphiques » Bard [1980] a révélé que, les roches de ce genre de type de gisement, proviendraient d'un stock granitique hypovolcanique.

Dans le cas des granites du Mt Mariame, les feldspaths roses apparaissent comme les *porphyroclastes* qui ont *éclaté* en plusieurs fragments. Lors de ce phénomène, ces feldspaths se sont *« cassés »* suivant les clivages *(fig. n° 58)*. Ces clivages seraient dus à un accolement des cristaux, tel que expliqué par Shelley [1993] reprenant Vance [1961].

L'origine du mécanisme de cataclase des feldspaths roses est à rechercher dans les conditions d'ascension de cette roche alors que celle–ci renfermait encore un liquide résiduel. Le quartz, les plagioclases, les biotites et les autres minéraux seraient donc post-cataclase, et viennent colmater les cristaux de feldspaths roses démantelés. C'est l'aspect bréchique donné par les feldspaths roses qui est le trait principal de la texture du matériau et qui en fait sa richesse et son esthétique.

3.3.3. Réserves

Selon des études récentes conduites par la SODEMI [1998] dans le cadre de la promotion des pierres ornementales de Yakala, les réserves sont estimées à plus de 5 millions de m^3 commercialisables à 70%. La production envisagée sera orientée en grande partie vers le marché national et le marché de la sous-région.

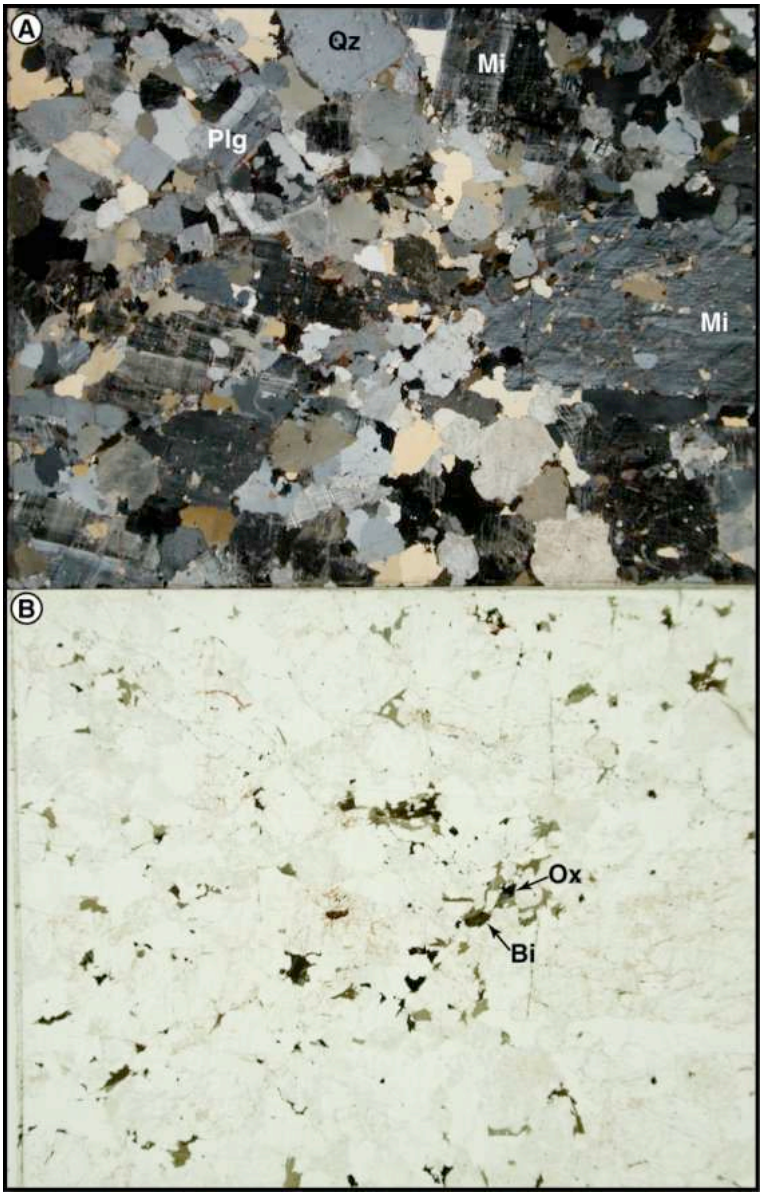


Figure 53: planches photographiques de lames minces du granite rose de Yakala montrant la texture globale

Grossissement 6X.

(**A** = lumière polarisée ; **B** = lumière naturelle).

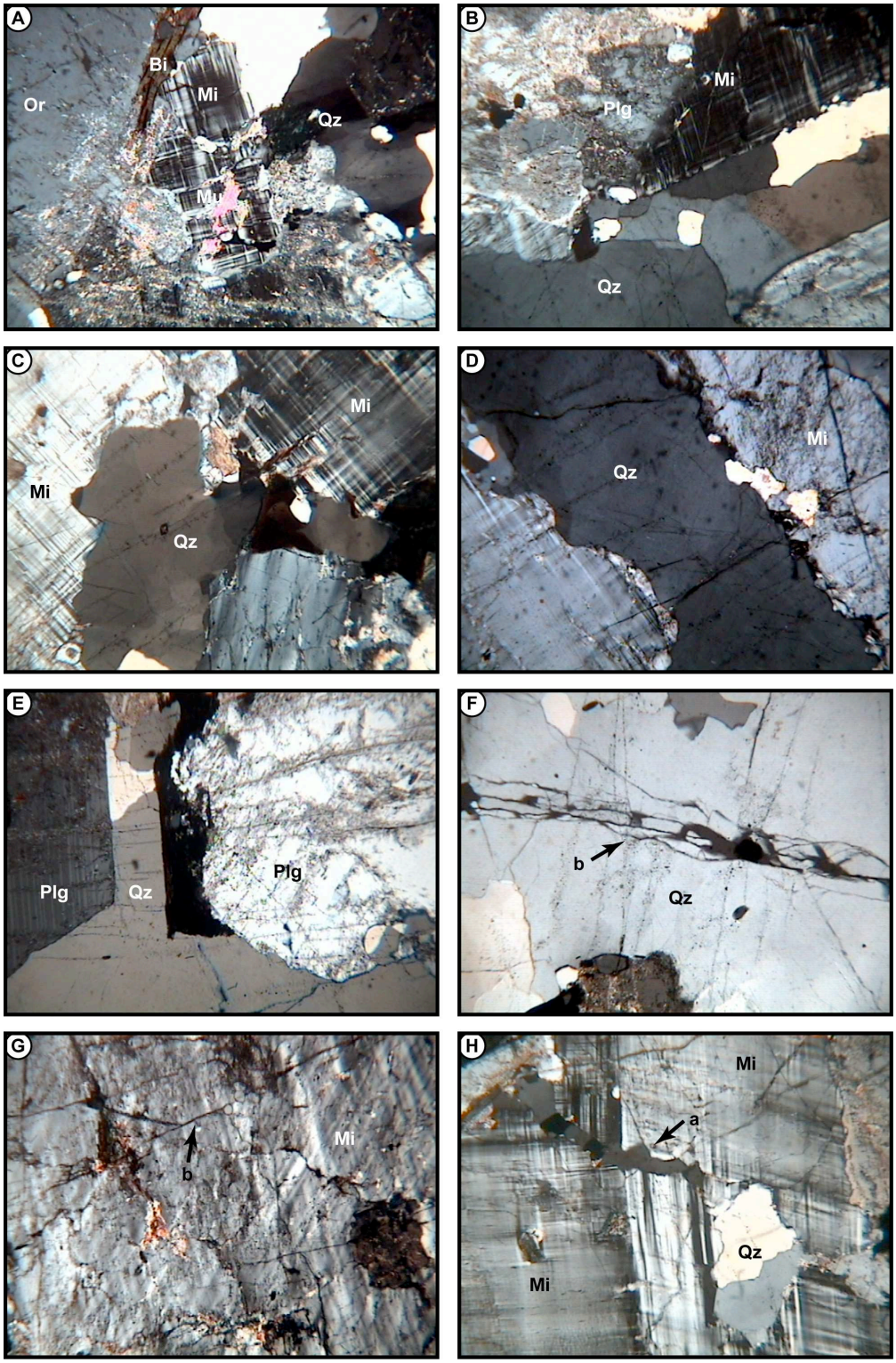


Figure 54: planches photographiques de lames minces du granite rose de Yakala montrant quelques minéraux (Lumière polarisée).
Grossissement 20X.

De **A** à **D** : Principaux minéraux; De **E** à **H** : Fissurations dans le granite (**a** = fissures primaires "magmatiques" remplies secondairement par du quartz microcristallin; **b** = fissures provoquées par le façonnage de la lame mince ?).

Or =orthose ; **Bi** = biotite ; **Mi** = microcline ; **Mu** = muscovite ; **Qz** = quartz ; **Plg** = plagioclase.

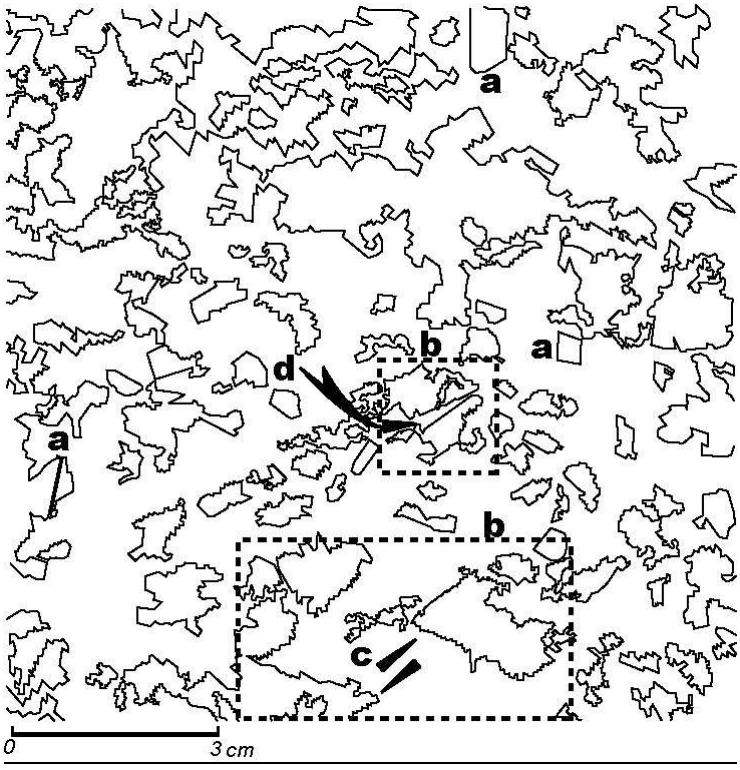


Figure 55: carte des contours des grains
des cristaux de feldspaths roses

a. quelques porphyroclastes sub-automorphes. **b.** exemple de cristaux de feldspaths roses démantelés **c.** disjonction des cristaux après la phase d'éclatement. **d.** exemple de ré-assemblage des cristaux d'orthoses démantelés.

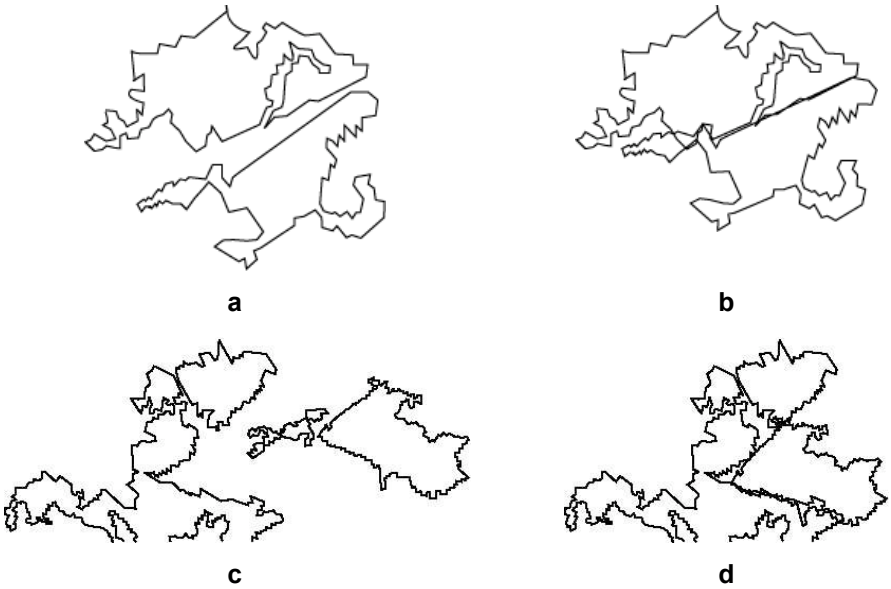


Figure 56: exemple de cristaux à jonction simple

a. & c. cristaux de feldspaths roses disjoints. **b. & d.** exemple de possibilité de jonction

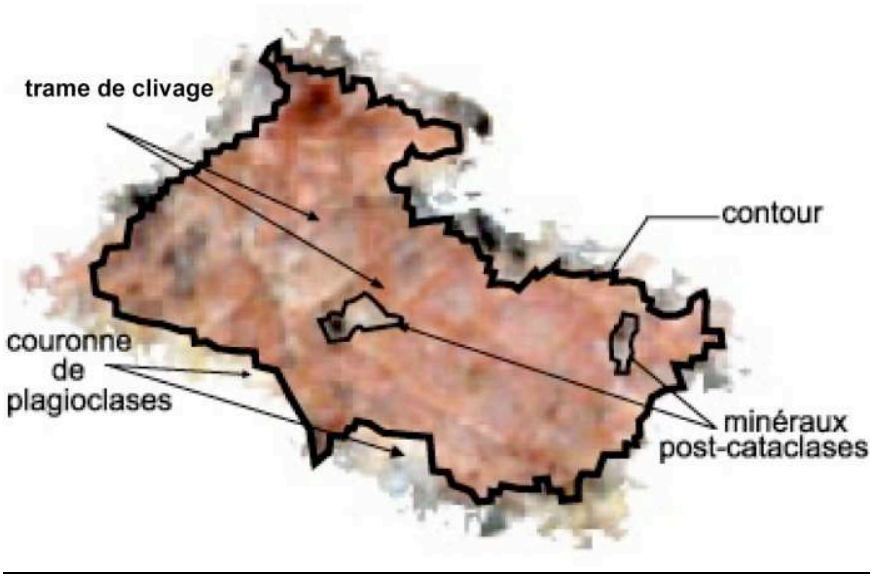


Figure 57: une vue des clivages d'un feldspath rose du granite de Yakala
Grossement 5 X

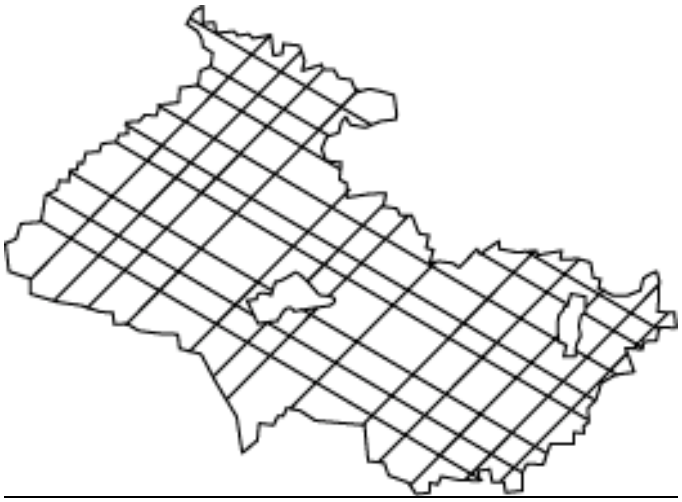


Figure 58: représentation schématique de la distribution des clivages.
Grossissement 5 X

<u>Remarques</u> :

On y voit que le démantèlement des feldspaths roses s'opère suivant les clivages

III. Conditionnement des échantillons

1. Préparation des échantillons

Lors de la campagne de terrain, on a procédé au prélèvement de blocs de roche de volume avoisinant *40cm x 40cm x 20cm*, pour chacun des massifs retenus. Les critères de sélection de ces blocs, basés sur la faiblesse de la densité de fissuration et la fraîcheur des faces, devaient permettre d'y confectionner les échantillons selon les spécifications de la figure n° 59.

La confection de ces échantillons utilise le procédé de façonnage des roches ornementales *(fig. n° 1).*

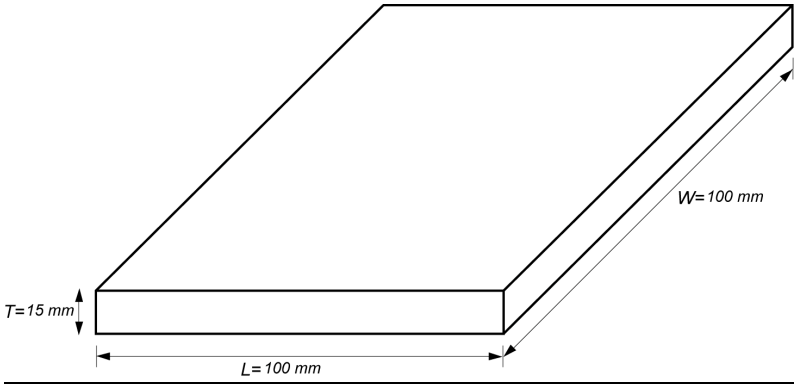


Figure 59: schéma relatif aux spécifications des échantillons

Dans le cadre de ces travaux, le procédé de façonnage a tenu compte des caractéristiques de l'outil de sciage pour retenir les longueurs et largeurs. Pour l'épaisseur, on a essayé de se rapprocher des indications relatives à la majeure partie des revêtements existant sur le marché.

Au cours de ces opérations, des précautions sont prises afin que les fissures apparues lors de l'extraction ne soient pas intersectées. Par la suite, les plaques vont subir le polissage de l'une des deux grandes faces. Le but visé étant de les transformer en matériaux satisfaisant aux normes définissant les roches ornementales.

2. L'essai *« d'altération météorique »* accélérée des échantillons

Dans la pratique, les intempéries ne se succédant guère avec une périodicité marquée, on a donc choisi au cours de ces expériences, deux types d'environnement. Pour l'un, l'échantillon subit le système *humidité-pluie-soleil* sur une période de 24 heures et, pour l'autre, sur une période de 48 heures, sans que l'alternance des deux types d'environnement ne soit régulière.

Même si l'échantillon dans son entièreté est concerné par les effets des cycles d'état, c'est la face polie de la roche ornementale qui est principalement exposée aux

intempéries. La partie non polie repose sur le support en verre et, les autres faces latérales sont *libres*.

Sur une période de 24 heures, l'échantillon subit les *intempéries* suivantes :

- une pluie laminaire à débit régulier d'une durée de 12 heures (de 19H du soir à 07H du matin) ;
- un ensoleillement à intensité maximale d'une durée de 08 heures (de 09H du matin à 17H de l'après midi).
- entre les deux, une période, sans *pluie* et sans *soleil*, *de* progression ou de régression de l'humidité de l'échantillon vers l'humidité ambiante (HR = 85 %) du local d'expérimentation.

Lorsque ces expériences sont conduites pendant 48 heures, les phases de pluies et de soleil sont portées à 24 heures chacune.

Lors de ces opérations de l'altération météorique, les échantillons sont disposés sur les supports de verre, avec une inclinaison de 45° par rapport à l'horizontale : ce qui induit le sens de ruissellement principal précisé sur les images des revêtements qui suivront.

Cette disposition est choisie comme un compromis entre les conditions horizontales et verticales de pose du matériau. En construction, ces conditions sont en relation avec l'utilisation des revêtements décoratifs pour le carrelage ou pour la protection des façades d'immeubles

3. Paramètres contrôlés au cours de l'expérience

3.1. L'eau servant à l'altération météorique

Afin d'approcher l'environnement naturel des roches ornementales, on capte directement, au moment des averses, de l'eau de pluie dans des bassines en PVC. Lors de cette opération, on évite tout contact entre cette eau et des substances métalliques. L'eau des bassines est par la suite distillée au laboratoire et, stockée dans des bonbonnes de verre de vingt litres. La distillation et le stockage sont réalisés en condition Soxhlet (Pédro, 1964).

Au cours de l'altération météorique, on note à l'issue de chaque cycle de *pluie*, des pertes en eau de l'ordre de 20% du contenu initial du bac. Ces pertes sont presque entièrement dues au fait qu'avec la hauteur de chute, une quantité d'eau assez importante, après rebondissement sur les échantillons, retombe hors du bac.

Cela conduit au renouvellement de l'eau dans le bac toutes les semaines, avec l'avantage de soumettre l'échantillon à un environnement comparable à l'environnement urbain des roches ornementales en condition d'utilisation. Bien entendu, à l'exception de l'air susceptible d'être pollué par les émanations caractéristiques de l'activité humaine dans les grandes villes.

3.2. Le « régime de pluviosité »

Dans le cadre de ces expériences, deux paramètres renseignent sur le « régime de pluviosité » à savoir :

- les dimensions de l'échantillon ;
- le débit sous lequel fonctionne la pompe à eau.

Pour déterminer le débit sous lequel fonctionne la pompe à eau, on utilise un récipient de mesure, du genre bocal de verre, de un (1) litre et, de dimensions adéquates pour pouvoir *contenir* la « pomme d'arrosoir » du dispositif expérimental.

On procède par la suite à la mise en marche de la pompe et, en cours de fonctionnement, on mesure le temps nécessaire au remplissage du récipient de un (1) litre.

Après plusieurs mesures, on a estimé une moyenne des temps égale à dix (10) secondes. Ce qui permet de calculer, dans ces conditions spécifiques d'utilisation, que le débit de fonctionnement de la pompe est de 360 litres par heure. En terme de pluviométrie, cela donne une intensité moyenne de précipitation *forte de 25,7 m. h^{-1}*

On rappelle que le diamètre de la « pomme d'arrosoir » est de 70 millimètres. La surface de chaque échantillons (100mm x 100mm) est donc arrosée par la *totalité* des eaux qui sont remontées par la pompe à eau et qui, par la suite, chutent en écoulement laminaire sur les dites surfaces.

3.3. La température à la surface de l'échantillon

Lors de la phase de *l'altération météorique*, le relevé des températures est effectué aux échéances suivantes :

- chaque heure, avant la mise en marche de la pompe ;
- à l'arrêt de la pompe ;
- chaque heure, avant la mise en marche de la lampe halogène ;
- pendant le fonctionnement de la lampe halogène.

Pendant le fonctionnement de la lampe halogène, portes et fenêtres du local où sont conduites les expériences sont maintenues ouvertes. Ce qui permet d'aérer ledit local et, donc, d'éviter une trop grande concentration de la chaleur.

Les mesures de températures sont faites à l'aide d'un thermomètre de verre à mercure, gradué de –10°C à 110°C. Sont concernées par ces mesures : la surface des échantillons, l'eau d'arrosage et, enfin, l'intérieur du local.

Pour relever les températures de la surface de l'échantillon, lorsque la lampe halogène est allumée, des dispositions sont prises pour que seul le réservoir de mercure, qui est au contact de l'échantillon, soit irradié par la source de chaleur.

Pour éviter une dilatation du film de mercure, on protège de ce fait, le tube gradué à l'aide d'un *« isolant thermique »* (carton épais ou paquet de rame de papier). En effet, avec cette dilation, on court le risque de surestimer la température de la surface des échantillons.

En phase de fonctionnement de la lampe halogène, les températures relevées à la surface des échantillons se stabilisent autour de 76°C. Dix minutes après l'extinction de la lampe halogène, les mesures indiquent des températures qui oscillent en moyenne autour de à 57°C. Une heure après, le thermomètre affiche 37°C.

Deux heures après, soit l'instant avant que ne soit actionnée la pompe à eau, les lectures sur le thermomètre indiquent en moyenne 31°C. A cet instant, le thermomètre de contrôle de la température du local marque 29°C en moyenne; soit un différentiel de 2°C. Dans le bac, les mesures de la température de l'eau indiquent, quant à elles, en moyenne 27°C. Ces données permettent ainsi de calculer, au moment de la mise en marche de la pompe à eau, le différentiel de température entre l'échantillon et l'eau d'arrosage, qui est de +4°C.

En phase de fonctionnement de la pompe à eau, il est apparu difficile de relever les températures à la surface des échantillons : les mesures indiquant à la fois celle de la surface de l'échantillon et de l'eau d'arrosage. Cette température se stabilise d'ailleurs, au bout de cinq minutes, autour de 26°C.

A l'arrêt de la pompe à eau, les températures relevées à la surface des échantillons sont en moyenne de 24°C. La moyenne des températures du local, à cet instant se situe aux alentour de 26°C, tandis que la température de l'eau dans le bac, oscille entre 23 et 24°C.

Un heure après l'arrêt de la pompe à eau, les mesures de température du local indiquent 26°C en moyenne. A ce moment, la température de l'eau passe à 26°C. Deux heures après, tandis que la température de l'eau se maintient à 26°C, celle du local, cependant, progresse pour atteindre la moyenne de 28°C.

On arrive ainsi, certainement avec un très faible risque d'erreur, à établir une corrélation entre la température de l'eau, une heure après le début de l'arrosage, et la température à la surface des échantillons.

Deux heures après l'arrêt de la pompe, soit l'instant avant la mise en marche de la lampe halogène, les températures de l'échantillon ont faiblement évolué : elles avoisinent en moyenne 25 °C.

Dès la mise en marche de la lampe halogène, ces températures évoluent très rapidement. Une heure après, on enregistre, des valeurs moyennes de 59°C.

Ces mesures permettent de calculer, heure par heure, les différentiels thermiques mentionnés dans le tableau n°12.

Tableau 12: différentiels thermiques associés au changement de l'environnement météorique des échantillons

Environnement *météorique* de l'échantillon	Vitesse de variation de température (en °C/Heure)
1 H après la mise en marche de la lampe halogène	+34
1H après l'extinction de la lampe halogène	-39
1 H après la mise en marche de la pompe à eau	-7
1H après l'arrêt de la pompe à eau	+1

3.4. Les phases de numérisation

On rappelle que le mode d'investigation choisi impose des supports d'analyse que sont les images des échantillons acquises par numérisation.

Dans le cadre de ces travaux, on a choisi de *capturer* ces images tous les 90 jours ; la conduite des expériences devant s'étaler sur une période de un (1) an.

L'échantillon est numérisé *à 300 pixels par pouces (chapitre 2 paragraphe V-2.1)*, après la période *d'ensoleillement.* La numérisation est réalisée avec un scanner à plat. Les images brutes sont archivées sous fichier « Joint Photographic Expert Group » (JPEG) dans un micro-ordinateur.

Le format JPEG a un fort pouvoir de compression. Mais, il présente des inconvénients telle la perte de certaines données de l'image. Il a été cependant retenu pour des raisons pratiques : les images devaient être transmises par Internet au CGI-EMP, en vue d'une révision des travaux réalisés en Côte d'Ivoire. Il fallait donc éviter que les fichiers soient trop lourds.

C'est d'ailleurs dans le souci d'établir un équilibre entre cette contrainte, et le poids des fichiers que l'on a opté pour la résolution 300 ppp (pixels par pouce). Toutes les images relevant de ces paramètres, on estime que cela n'aura pas de conséquences qualitatives majeures sur les interprétations.

Pour procéder à la numérisation d'un échantillon, on le laisse *refroidir* à la température ambiante du laboratoire (29° à 30°C). Auparavant, l'on a pris la précaution de faire une marque sur la face non polie, afin de retrouver et de conserver le sens de la numérisation.

IV. Analogie entre le modèle de laboratoire et les facteurs naturels de l'altération météorique

L'environnement climatique produit par le dispositif expérimental conçu permet de réaliser une succession des phases « d'insolation » aux phases de « pluies laminaires ». Ce principe de fonctionnement du dispositif imposé par le paramétrage des facteurs climatiques, souhaitable pour une altération météorique accélérée conduit, pour les données climatiques artificielles, à des valeurs qui nécessitent d'être mises en parallèle avec les valeurs en milieu naturel.

L'objectif de cette mise en parallèle est de vérifier comment l'environnement climatique artificiel introduit par le dispositif expérimental se compare aux conditions d'essais de l'altération météorique *in vitro,* rappelées par Pédro [1964], lors d'études préliminaires en vue de définir un mode de fonctionnement de l'Extracteur Soxhlet.

On indique que l'inconvénient majeur qui affecte ces types d'essais, demeure la *lenteur* des processus de transformation à l'échelle d'une vie humaine : ce qui conduit à accélérer les facteurs de l'altération météorique.

En tout état de cause, cette accélération ne devra pas introduire de facteurs qui selon Pédro [1964], conduiraient à enregistrer, par rapport au profil d'altération en milieu naturel, des modifications inhabituelles dans le matériau constitutif de la roche.

1. Le différentiel thermique

Les taux de variation de température les plus élevés (-39°C/heure, et +34°C/heure) sont observés à l'extinction et à l'allumage de la lampe halogène. A ce jour, aucune étude météorologique ne fait état de variations aussi brusques en Côte d'Ivoire. Il faut dire que ces mesures sont rarement faites en surface d'affleurement rocheux, mais plutôt en abri météorologique.

Cependant, une analyse du tableau n°9 *(page 32)* conduit à relever que 70% des averses orageuses se produisent aux mois de Février, Mars, Avril et Mai, donc, lorsque l'énergie calorifique à la surface du sol est la plus élevée.

Par ailleurs, ces averses orageuses, avec des intensités moyenne de 4 à 5 millimètres par heure (ASECNA, 1979), interviennent, par fort ensoleillement. D'où les maximales de la tension de vapeur d'eau constatées sur la même période (fig.n°24).

A partir de ces analyses, on est en droit de conclure que, même si ces variations brusques de températures ne sont pas journalières, comme c'est le cas pour le « climat » artificiel du dispositif, elles n'en demeurent pas moins un phénomène naturel.

En reproduisant ces variations, avec une fréquence de deux fois par jour, le dispositif expérimental, ne ferait qu'amplifier le phénomène et, donc, ne contribuerait qu'à en accélérer les conséquences.

2. La pluviosité

Lors du contrôle du débit de la pluie artificielle créée par le dispositif expérimental, on a calculé qu'il tombait au total une hauteur d'eau équivalente à une pluviosité de 25,7 mètres d'eau par heure en milieu naturel. Cette valeur qu'on ne peut pas comparer aux maximales du milieu naturel (2 mètres d'eau par an) est la conséquence de la nécessaire prise en compte, de la vitesse de chute des gouttes de pluies.

Par la suite, la prise en compte, sur une durée de 24 heures, de la majorité des périodes de pluies, puis, de l'état hygrométrique nocturne des roches ornementales a conduit à maintenir en fonctionnement la pompe à eau, de 19 heures du soir à 7 heures du matin.

Un tel mode de fonctionnement de la pompe à eau, a pour conséquence, de maintenir un régime de pluviosité horaire important, de 25,7 mètres par heure, sur une durée totale de 12 heures par jour.

Par ailleurs, les échantillons étant disposés sur leur support avec un angle de 45° par rapport à l'horizontal, l'impact du ruissellement artificiel dû à cette inclinaison est aussi un facteur à prendre en considération

On rappelle que la valeur de l'angle d'inclinaison est un compromis entre les possibilités de disposer la roche ornementale verticalement et horizontalement. On ne s'attardera donc pas sur les forces de ruissellement qui, évidemment agiront en fonction de l'inclinaison de la roche ornementale. On est alors tenu de se contenter de l'analyse comparative de la durée des ruissellements en milieu artificiel et naturel.

En condition artificielle, la durée du ruissellement est de 12 heures. En milieu naturel selon ASECNA [1979], en saison de forte pluviosité (Mai, Juin, Juillet), il n'est pas rare que des pluies continues et durables s'étendent sur une période de 24 heures, voire 48 heures.

Le ruissellement en milieu artificiel n'aurait donc de caractère exceptionnel, qu'au regard de sa fréquence chaque jour.

3. Imbibition et séchage des échantillons

Les phases d'allumage de la lampe halogène et d'activation de la pompe à eau, génèrent au niveau des échantillons, des états d'imbibition et de séchage des échantillons

En milieu naturel, l'imbibition et le séchage de la roche ornementale en condition d'utilisation sont commandés à la fois par la saturation hygrométrique nocturne

(en période de basse latitude du F.I.T.), par les pluies diurnes et nocturnes, et par les phases d'ensoleillement.

En saison sèche, la durée de la phase d'imbibition de la roche ornementale est réduite aux saturations nocturnes. En saison des pluies, elle est principalement fonction de la durée des pluies : il s'agit de pluies qui interviennent en majorité, entre 0 heure et 9 heures du matin.

On s'aperçoit donc, que l'alternance des cycles d'imbibition et de séchage produite par le dispositif expérimental, reflète quasiment ce qui se passe en milieu naturel.

Remarques :

Selon les analyses, les cycles d'état climatique artificiels observeraient les conditions d'essai de l'altération météorique *in vitro*. Cependant, on se gardera des conclusions hâtives quant à la validité du dispositif expérimental conçu ; observant en cela la même prudence que Pédro [1964].

V. Analyse colorimétrique des images numérisées

La caractérisation de la couleur, est l'un des outils qui ont permis à la science, au cours de son développement, d'étudier les phénomènes auxquels l'être humain est assujetti. En Pédologie par exemple, depuis les débuts des années 1960, le Code Munsell normalise la couleur des horizons, lors de l'étude d'un profil d'altération.

Avec le développement de la colorimétrie, l'examen de la couleur est devenu, depuis le début des années 1990, l'un des axes de performance des techniques d'analyse d'images numérisées.

Très utilisée par la recherche en microbiologie (Pitts *et al*, 1998), dans le suivi des installations sur les sites nucléaires (Wienhold *et al*, 1995), etc., la *CIA*, de l'Anglais *Colour Image Analysis,* est ici utilisée comme alternative aux moyens usuels, pour révéler une éventuelle altération météorique de matériaux façonnés à partir de roches plutoniques saines et, soumis sur une période relativement courte (12 mois), à l'action des gradients thermiques et hygrométriques.

1. Le pré-traitement préalable des images numérisées

La nécessité du traitement d'une image obtenue à partir d'un capteur s'est imposée aux scientifiques, depuis 1960, avec l'avènement des premières images transmises par satellites et, dans le domaine du traitement et d'analyse des images, de nombreux logiciels, basés sur des concepts d'analyse du signal ou de morphologie mathématique, ont été développés.

Avant le traitement, certaines fonctions de ces logiciels permettent d'effectuer un pré-traitement des images afin de corriger certains défauts des images numérisées. En

effet, la chaîne d'acquisition introduit, de façon systématique, des distorsions qui, dans le cas spécifique de ces travaux, peuvent s'expliquer par les raisons suivantes:

- l'éclairement des échantillons scannés à des moments différents, n'est pas uniforme ;
- le contraste n'est pas suffisant ;
- la numérisation s'accompagne de l'ajout d'un bruit assez important à l'image ;
- au cours des opérations différentes, la position de l'échantillon sur le plat du scanner n'est pas rigoureusement identique ;
- des vibrations mécaniques modifient légèrement la position ou l'orientation de l'échantillon en cours de numérisation.

1.1. Correction des écarts de luminosité et contraste, élimination du bruit

Le pré-traitement des images numériques est basé sur la transformation des histogrammes de couleurs pour la correction des écarts de luminosité et contraste et, sur le filtrage pour l'élimination du bruit. Nous faisons l'hypothèse pour tout ce qui concerne le traitement des images que les variations de couleur (y compris luminosité et contraste) apparaissant lors de l'essai sont faibles. Les écarts normaux de luminosité moyenne et de contraste moyen des images attribuables non pas à la surface de l'échantillon, mais à une mauvaise fidélité et reproductibilité du dispositif de numérisation des images peuvent être corrigées partiellement grâce aux fonctionnalités de Visilog 5.4 (Noesis, 2001).

Ces opérations de correction sont menées de telle sorte que les histogrammes de luminosité ainsi que des composantes RVB des images, capturées à des périodes différentes, se superposent au mieux. Mathématiquement, cette superposition impose une égalité entre les moyennes des histogrammes des images numérisées après différentes durées d'essai, ainsi que de la dispersion autour de ces moyennes. Une erreur de 2% sur la luminosité moyenne, ainsi que sur la largeur à mi-hauteur des histogrammes est cependant tolérée pour tenir compte d'un éventuel manque de reproductibilité du scanner d'une numérisation à l'autre.

Le bruit correspond dans une image numérique, à une variation aléatoire d'un pixel isolé par rapport à un pixel voisin. Le bruit est induit par l'électronique ou la lampe du scanner. Lorsque l'objectif de l'analyse d'image est de pratiquer des mesures quantitatives, sur des parties de l'image supposées homogènes, l'élimination des bruits apparaît indispensable.

Le bruit est corrigé par les fonctionnalités de filtrage du logiciel. Il existe deux sortes de filtres : les filtres linéaires et les filtres morphologiques. L'utilisation des filtres linéaires a pour origine les traitements du signal et son extension au traitement des images numériques. Les filtres morphologiques, par contre, ont été conçus directement en vue d'application à des images numériques.

1.2. Redressement des images

Pour conduire cette étude, les échantillons sont numérisés tous les 90 jours. Ce qui impose d'enlever puis, de repositionner les échantillons après 90 jours, sur le plat du scanner. Des écarts de positionnement, aussi minimes soient-ils s'introduisent et génèrent des distorsions dans le cadrage des images.

Afin de rendre les images superposables, avec une tolérance admise, qui est de 1 à 2 pixels d'erreur près, les fonctionnalités de Visilog, notamment la fonction de déformation (ou *« warping »*), sont utilisées pour réaliser des corrections géométriques sur les images. Pour conduire ces corrections, neuf points communs aux images sont identifiés et marqués, selon la figure n°60, avec une couleur (violette) qui ne *figure* pas dans les coloris des minéraux. Par l'intermédiaire de leurs coordonnées, on calcule par la suite la longueur ainsi que l'orientation, des segments de droite qui les relient deux à deux. Ce qui conduit à définir au total trente six vecteurs.

Le logiciel procède également à une commutation des vecteurs et, permet donc de définir un cadre commun à toutes les images. Cela permet, enfin, de recadrer chaque image en fonction de ces paramètres communs. Le redressement est une étape très importante pour l'analyse colorimétrique à réaliser. Il permet de quantifier les réalisations des primaires RVB, sur des images qui proviennent de sources identiques. Subséquemment, pour chacun des groupes d'images, les populations de pixels sont donc égales.

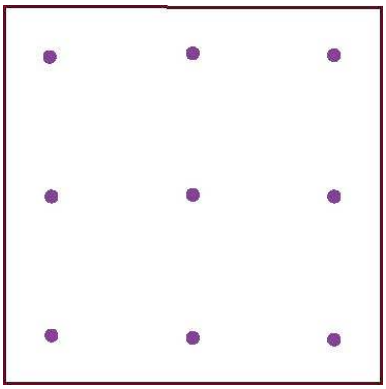


Figure 60: schéma relatif au mode de choix des points communs et à leur marquage

Remarques :

A l'issue de l'opération de redressement, les images d'un même échantillon prises après différentes durées d'essai sont superposables en tout point avec une précision généralement de plus ou moins un pixel et qui dépasse rarement plus ou moins deux pixels dans les directions haut-bas et gauche-droite.

2. Les images support des analyses

On rappelle que le paramètre le plus important, lors de la sélection d'un gisement de roches ornementales est l'aspect esthétique du matériau façonné à partir de ces roches (Rozes, 1993). Cet aspect esthétique se ramène à une apparence visuelle et,

particulièrement aux coloris qui composent la roche. L'aspect esthétique de la roche est, bien sûr, appuyé par l'agencement de ces coloris c'est à dire la texture de la roche. On s'intéressera donc à chacun de ces coloris. Et, lorsque des minéraux d'aspect visuel différent, mais de couleurs assez semblables se regroupent en amas, on considérera ce regroupement comme une entité. Le tableau n° 13 montre, pour la syénite d'une part et le granite rose d'autre part, une mise en correspondance entre le couleur et la nature minéralogique des constituants

Tableau 13: phases de coloris et leur composition minéralogique

Désignation	Echantillon de syénite			Echantillon de granite rose		
	Phase de Coloris rouge	Phase de coloris blanc-grisâtre	Phase de coloris sombres	Phase de Coloris rouge	Phase de coloris blanc-grisâtre	Phase de coloris sombres
Nature minéralogique	orthose perthitique;	plagioclase quartz	amphibole pyroxène magnétite titanite	orthoses à inclusions microclines	plagioclase quartz	biotite ilménite magnétite

2.1. Segmentation des images pré-traitées

Pour obtenir une image spécifique à chaque phase, on a exploité la fonctionnalité des logiciels Visilog 5.4 et Paint Shop Pro en vue d'effectuer des segmentations sur une images. La segmentation est une étape très critique de l'analyse d'image. Elle conditionne la qualité des mesures qui seront effectuées. La segmentation permet d'isoler, dans une image, une population d'objets sur laquelle doit se porter l'analyse. Ceci autorise l'analyse statistique de chaque population de constituants représentée sur la surface polie de l'échantillon. Elle conduit donc à séparer, dans l'image, les régions d'intérêt, du fond. Il existe plusieurs techniques pour conduire la segmentation. La plus simple, celle qui a été mise en œuvre dans le cadre de cette étude est le seuillage.

A titre d'exemple, pour les syénites, afin d'obtenir uniquement, les images avec les « coloris rouges », on a procédé à un segmentation manuelle, à partir des bornes inférieures et supérieures des valeurs des composantes RVB de ces coloris. S'agissant des « coloris grisâtres », et des « coloris sombres », on a mis en œuvre la procédure de segmentation automatique de Visilog 5.4. La segmentation par seuillage automatique est basée sur l'analyse de la distribution en fréquence des niveaux de gris associés à l'image. Son objectif est de déceler deux « populations » sur l'histogramme et, de proposer la valeur qui permet de les séparer. L'automatisation de cette opération impose un contraste suffisant entre les objets à extraire et le fond de l'image.

2.2. Images susceptibles de révéler les changements.

Jusqu'à 12 mois, le mode d'acquisition des images *(chapitre 2-V)* conduit à l'hypothèse que tout changement au niveau des revêtements se traduira par une modification des données relatives aux images. Pour mettre en relief ces modifications, en vue de les analyser, on a donc envisagé une opération de

soustraction entre images. La fonctionnalité « image opération » du logiciel Paint Shop Pro, permet de pratiquer entre les données d'images différentes, des opérations arithmétiques telles la soustraction. Cette opération a permis de soustraire les « images de départ » (0 mois), des images scannées à l'issue des périodes de 90 jours.

Pour l'échantillon de syénite, les opérations ont concerné les images des 0 et 12 mois. Les images des 3, 6 et 9 mois ne pouvaient pas être exploitées pour cause d'aggravation des distorsions systématiques due à une mauvaises manipulation du scanner ; ce qui ne permettait pas de limiter à 2 pixels près la tolérance de la superposition avec les autres images.

En ce qui concerne l'échantillon de granite rose et, pour les mêmes raisons, on a retenu les images 0 et 12 mois. Cette opération de soustraction entre images est une étape très importante. En effet, à l'issue du conditionnement, ce sont ses résultats qui devront témoigner des éventuelles modifications survenues dans les échantillons.

3. Analyse des images

Afin d'appuyer les analyses faites à partir des paramètres du référentiel TSL, on a choisi d'associer, pour chacune des images susceptibles de révéler des changements, une étude des histogrammes de la répartition de la couleur des pixels selon les niveaux de luminosité de chacun des primaires R,V, et B. La méthodologie de construction de ces histogrammes de la répartition de la couleur des pixels est rappelée au *chapitre 2-II*, notamment, en son point relatif au « *Mode de quantification d'une image numérisée* ». La description de la répartition de la couleur des pixels est soutenue par l'analyse des moyennes et des déviations standards.

Lors des études de données statistiques, groupées comme dans les cas présents, ces paramètres qui permettent de décrire les distributions sont, ici, définis par les relations mathématiques suivantes :

$$m = \frac{\left(\sum_{i=0}^{255} n_i \, X_i\right)}{J} \qquad \ldots[25]$$

$$s = \left[\frac{\left(\sum_{i=0}^{255} n_i \left(X_i - m\right)^2\right)}{J}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \ldots[26]$$

avec : m : la moyenne des niveaux de luminosité des pixels, pour chaque couche ;
s : la déviation standard autour de la moyenne ;
n_i : l'effectif de pixels de chacune des 256 classes de niveaux de luminosité de la couche ;
X_i : le niveau de luminosité de la classe ;.
J : le nombre de pixels qui composent la couche.

Le raisonnement qui guide l'étude des histogrammes des images numérisées, est orienté par le fait qu'à l'issue des opérations de soustraction entre images, s'il n'y a aucune modification de coloris par rapport à l'image de départ, les équations 25 et 26 manifesteront, en chacun des primaires R, V et B, une distribution des pixels, *normale* autour du niveau de luminosité, de valeur égale à 128. Cette valeur de chromaticité caractérisera alors, à la fois, la moyenne, le mode et la médiane de la distribution.

Les graphiques de la distribution de la couleur des pixels des images sont tracés par l'ordinateur à partir de la fonctionnalité « *histogramme* » du logiciel Visilog 5.4. Ce logiciel à l'avantage de mettre à disposition, le nombre de pixels de chacune des classes des 256 niveaux de luminosité RVB de l'image, ce qui permet, par la suite, de calculer les moyennes et autres écart-types à partir d'un programme Excel.

3.1. Après 12 mois de conditionnement de l'échantillon de syénite

La figure n°61 indique les *images sources* à partir desquelles les études qui concernent les échantillons de syénite sont conduites. Les travaux suivants ont consisté à réaliser les opérations de soustraction entre images, puis à l'ajout d'un gris neutre (chapitre 2.III-3) aux vecteurs « différences ». Ce qui nous a permis d'obtenir les images de la figure n°62. Par la suite, l'application de la fonctionnalité *« décomposition en composante TSL »* du logiciel Paint Shop Pro à l'image de la figure n°62-a, nous a permis d'aboutir aux résultats indiqués par la figure n°63.

Sur la figure n°63-b, on constate que la saturation moyenne de l'image est relativement faible. Ce qui va de paire avec une faible variation de la couleur sur cette période de douze mois d'essai. On s'en rend d'ailleurs compte, sur les images de la figure n°61. Il est quasi impossible, à la perception visuelle humaine, de faire la différence entre les images 61-a et 61-b.

Toujours sur la figure n°62-b, on constate un bruit important dans la partie gauche inférieure de l'image. Ceci est corrélé avec un fort contraste dans la même zone, sur l'image de la composante L *(figure n°63-c)*. Le même phénomène est exprimé par des teintes plus bleues et cyan de l'image de la composante T *(figure n°63-a)*. Ceci est dû à la numérisation des images. Dans cette zone, l'erreur commise sur la superposition des images *t égale à 0 mois* et *t égale à 12 mois* est plus grande. Dans la partie inférieure droite de ces images, un phénomène identique, bien que d'amplitude moins grande, est constaté également. Les parties centrales ne présentent pas ce phénomène. C'est donc sur elles qu'observations et mesures doivent se concentrer.

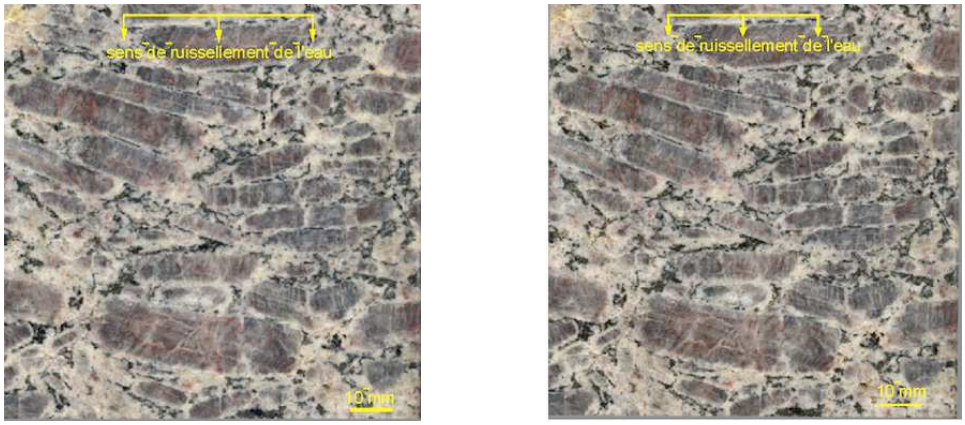
Sur la figure n°64 relative à un détail de l'échantillon de la syénite, on observe qu'autour d'un minéral ferromagnésien sombre, les minéraux blancs voient leur couleur devenir plus brune et leur teinte orangée. On peut identifier sur l'image en composante L, des plages de luminosités homogènes qui correspondent aux grains des différents minéraux. En douze mois d'essais, certains grains montrent une diminution de leur luminosité, alors que d'autres voient leur luminosité croître. De même, à la bordure supérieure gauche de l'échantillon, reprise par la figure n° 65, une zone très claire située en haut et à gauche de l'image possédant une teinte

jaune en début d'essai devient plus grise, c'est à dire moins jaune ou plus bleue, en cours d'essai. Il s'agit d'une décoloration locale de la surface de l'échantillon. Alors qu'à proximité des minéraux ferromagnésiens sombres (figure n°66), la teinte des minéraux clairs devient plus orange ou rouge, celle des minéraux ferromagnésiens devient plus bleue c'est à dire moins rouge.

En ce qui concerne les phénocristaux perthitiques, on observe sur la figure n°67 que la variation de couleur et de teinte est différente entre les lamelles potassiques et les sodiques du cristal à microstructure perthitique.

L'image de la figure n°68 est le résultat de la variation de teinte, après 12 mois d'essai. Cette image correspond à la transformation TSL vers RVB, de la carte des variation de couleur dont on a conservé la teinte, mais imposé à tous les pixels, une luminosité L égale à 128, et une saturation S égale à 255. De la sorte, on conserve la teinte et on s'affranchit du bruit qui affecte les images S et L. A partir de cette image de la figure n°68, et de celle qui singularise les différentes phases minéralogiques (figure n°69), on a obtenu la variation de teinte pour les phases minéralogiques des phénocristaux de feldspaths perthitiques, *(fig. n°71-a)*, minéraux clairs *(fig. n°71-b)* et des minéraux sombres *(fig. n°71-c)*.

L'hypothèse qui a présidé au pré-traitement des images numériques, implique que la variation moyenne de teinte sur l'ensemble de la surface étudiée de l'échantillon soit négligeable. Les variations de teinte cartographiées amplifient le résultat d'une faible rotation du vecteur RVB en chaque pixel. On constate, sur les cartographies effectuées que les teintes de la série *vert-jaune-orange-rouge* prédominent dans la carte des variations de teinte des minéraux blancs. De manière générale, ce sont les minéraux clairs qui présentent les variations de teintes les plus fortes, avec en moyenne une variation de teinte *orange* à *rouge* plus forte à proximité de certains minéraux ferromagnésiens sombres. Ce qui s'accorderaient avec une libération du fer par altération partielle de ceux-ci, puis fixation du fer dans les microfissures, joints de grains et clivages des minéraux clairs.



a **b**

Figure 61: image de l'échantillon de syénite

a. image en début d'essai. **b.** image après douze mois d'essai.

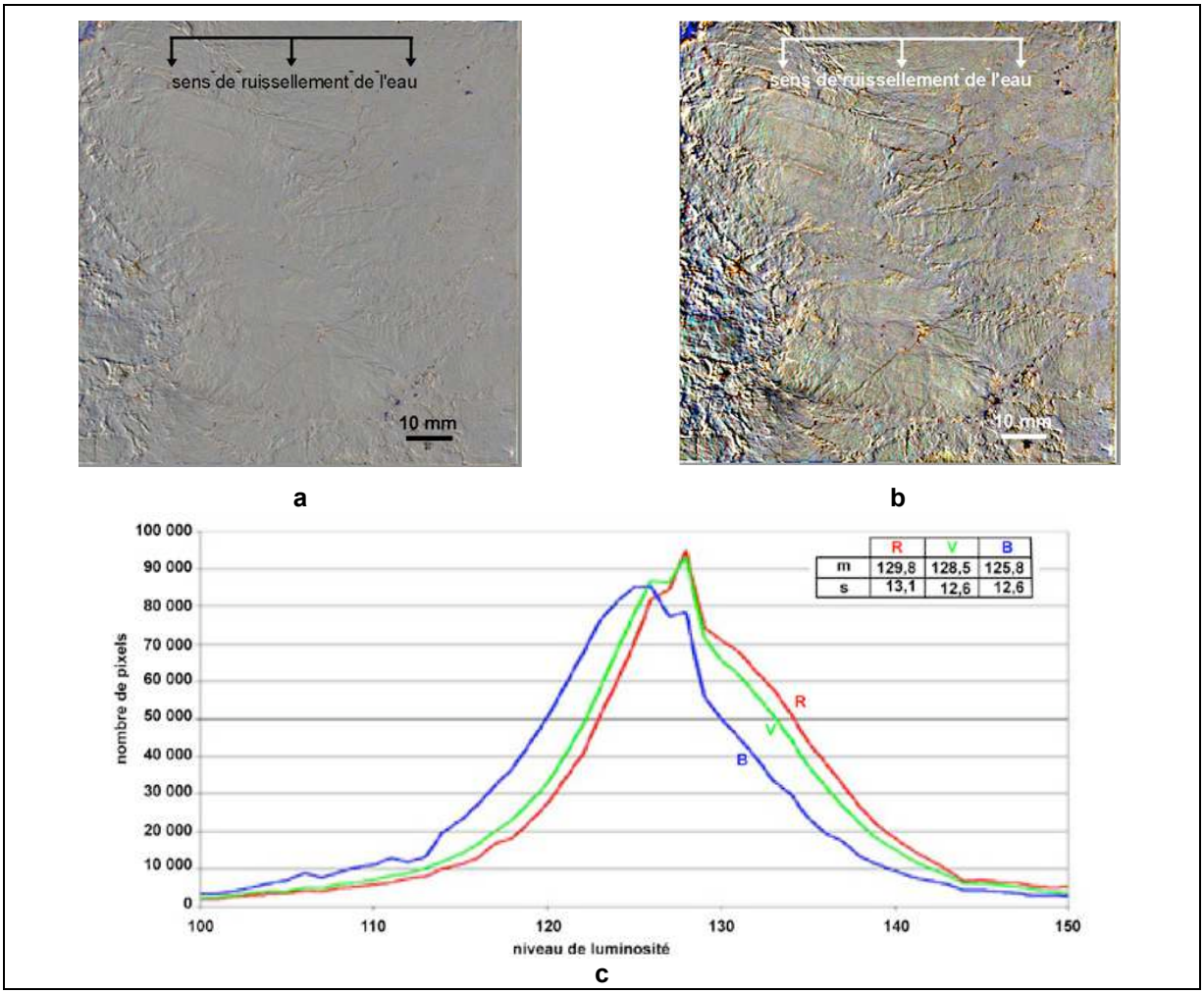


Figure 62: variation de couleur entre t= 0 et t=12 mois de l'échantillon de syénite.

a. image résultant de l'opération [(image à t=12mois) – (image à t=0mois)] +gris moyen[(1)]. **b.** même image mais contraste augmenté de 80%. **c.** histogramme RVB de la répartition des pixels de l'image résultant de l'opération [(image à t=12mois) – (image à t=0mois)] +gris moyen[(1)].

(1)- Le gris moyen correspond à des composantes RVB toutes égales à 128.

Remarques :

Seul le primaire « Vert » est resté quasiment normal autour de 128, la valeur médiane. On note que le « Bleu » s'est déplacé autour de la médiane 125, inférieure à 128. Quant au « Rouge », il s'est déplacé autour de la médiane 129, supérieure à 128. On relève par ailleurs que d'une couleur primaire à l'autre la dispersion des pixels autour de la moyenne quasiment à la même valeur.

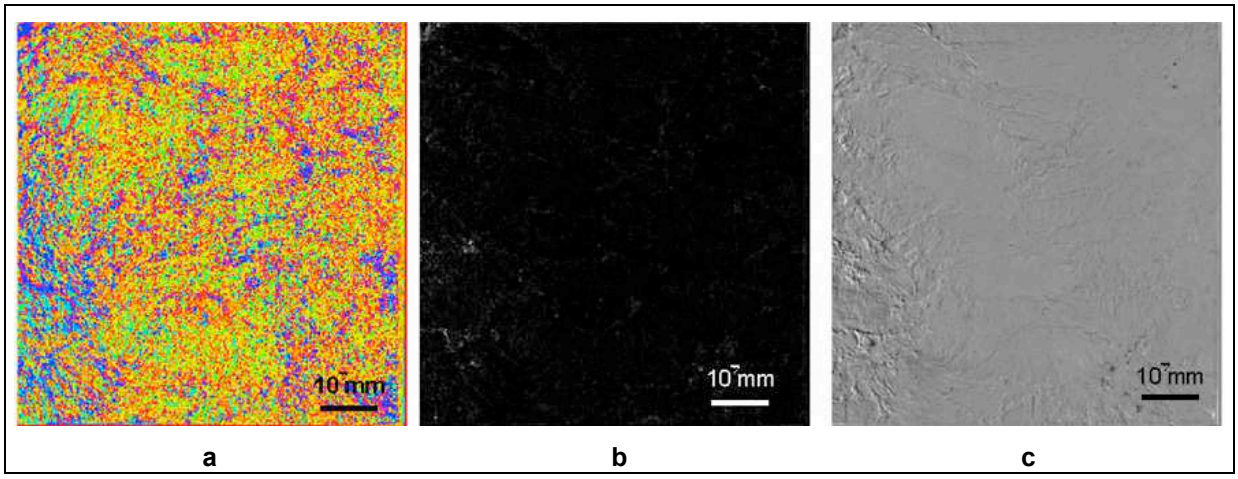


Figure 63: décomposition en composante TSL de l'image variation de couleur résultant de l'opération [(image à t=12mois) – (image à t=0mois)] +gris moyen

a. image en composante T (teinte). **b.** image en composante S (saturation) **c.** image en composante L (luminosité).

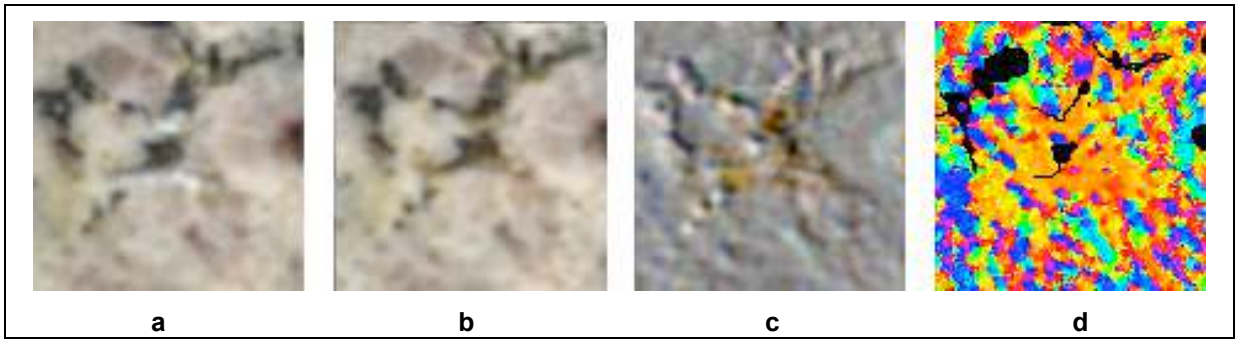


Figure 64: un détail de la surface de l'échantillon de syénite cadrée selon les coordonnées X=100, et Y = 600

Grossissement : 4X

a. image à 00 mois. **b.** image à 12 mois. **c.** différence de couleur entre 00 mois et 12 mois. **d.** teinte de la différence de couleur entre 00 mois et 12 mois

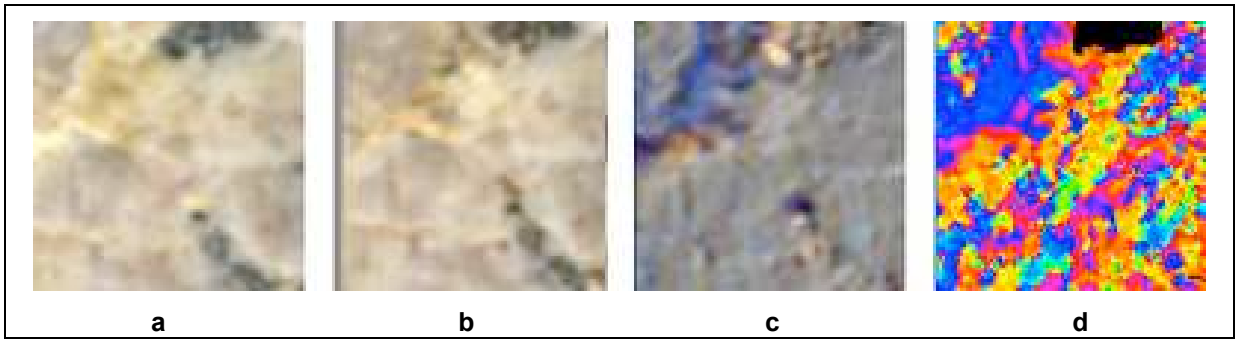


Figure 65: un détail de la surface de l'échantillon de syénite cadrée selon les coordonnées X=00, et Y = 00

Grossissement : 4X

a. image à 00 mois. **b.** image à 12 mois. **c.** différence de couleur entre 00 mois et 12 mois. **d.** teinte de la différence de couleur entre 00 mois et 12 mois

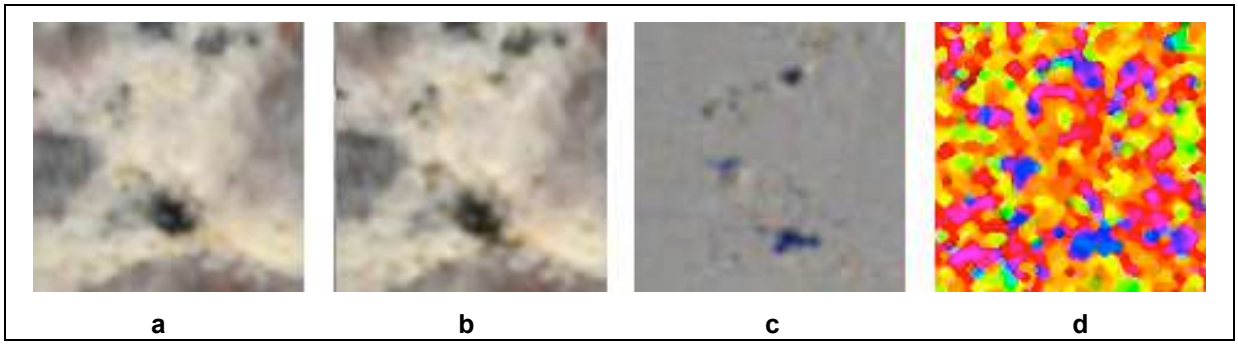


Figure 66: un détail de la surface de l'échantillon de syénite cadrée selon les coordonnées X=1000, et Y = 100

Grossissement : 4X

a. image à 00 mois. **b.** image à 12 mois. **c.** différence de couleur entre 00 mois et 12 mois. **d.** teinte de la différence de couleur entre 00 mois et 12 mois

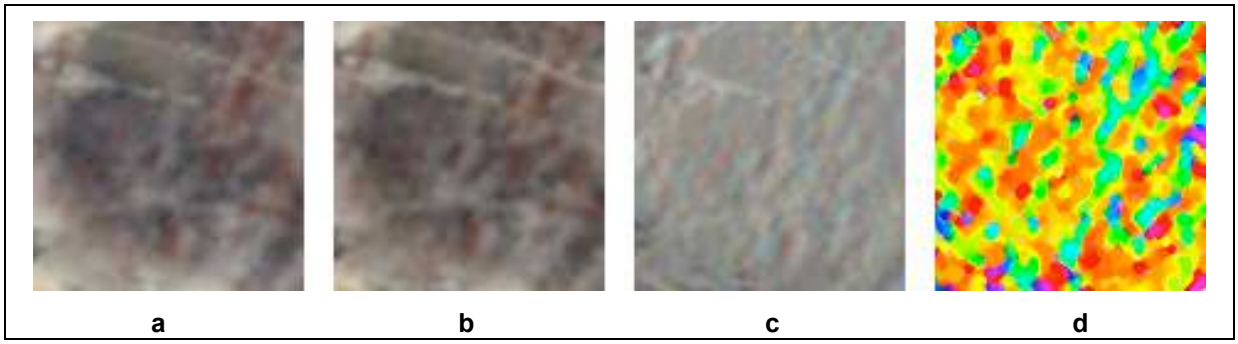


Figure 67: un détail de la surface de l'échantillon de syénite cadrée selon les coordonnées X=170, et Y = 870

Grossissement : 4X

a. image à 00 mois. **b.** image à 12 mois. **c.** différence de couleur entre 00 mois et 12 mois. **d.** teinte de la différence de couleur entre 00 mois et 12 mois

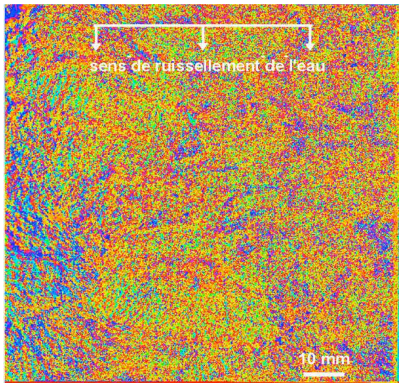


Figure 68: carte de la variation de teinte après 12 mois d'essais sur l'échantillon de syénite

image résultant de l'opération [(image à t=12mois) – (image à t=0mois)] + gris moyen à laquelle on a imposé T (Teinte = 128) et S (Saturation = 255).

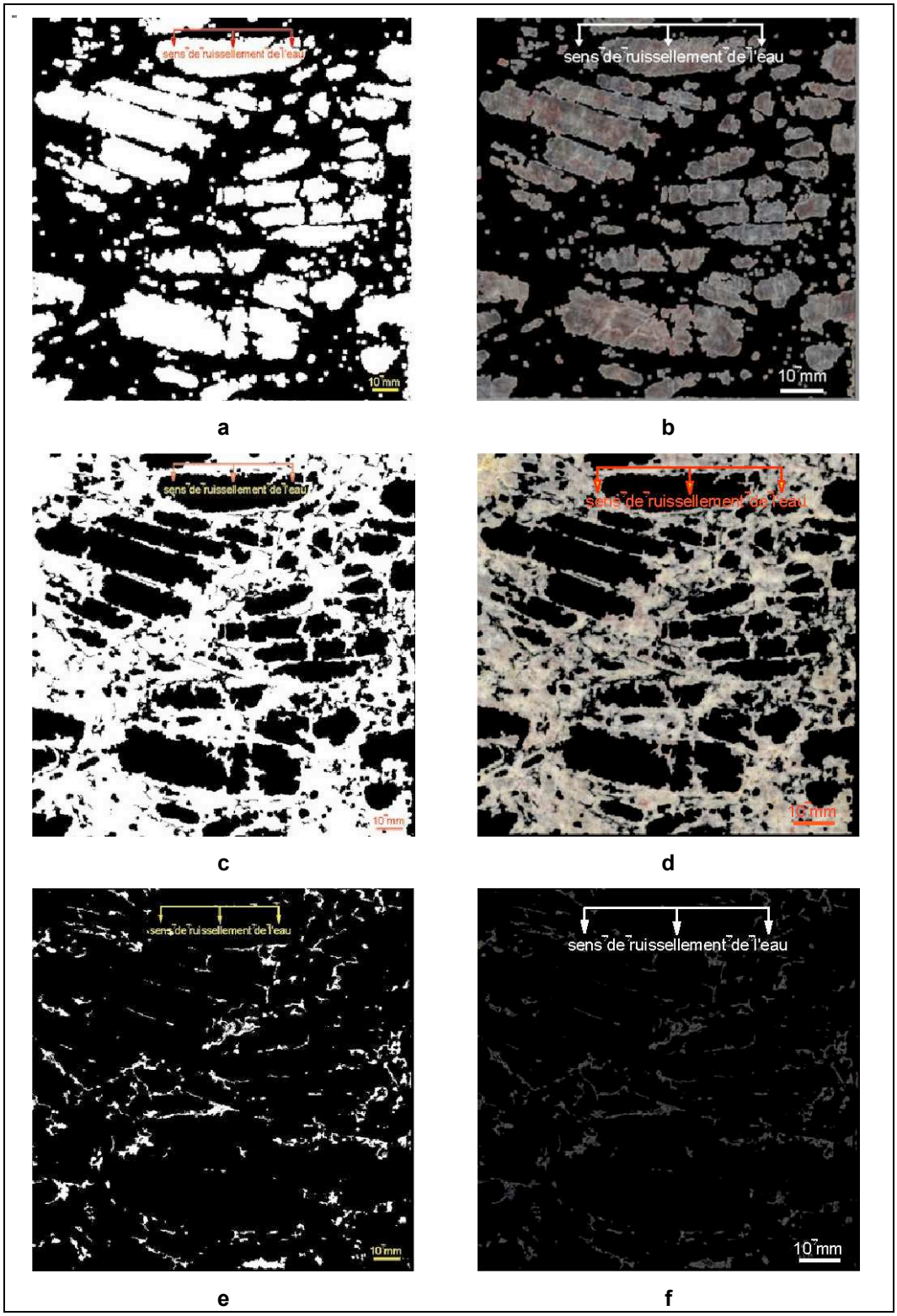


Figure 69: images des différentes phases minéralogiques de l'échantillon de syénite

a. masque pour la segmentation des phénocristaux de perthite. **b.** phase minéralogique des phénocristaux de perthite. **c.** masque pour la segmentation des minéraux clairs. **d.** phase minéralogique des minéraux clairs. **e.** masque pour la segmentation des minéraux sombres. **f.** phase minéralogique des minéraux sombres.

Remarques :

Le résultat des opérations de segmentation permet de définir la proportion de chacune des phases de coloris de l'image de l'échantillon de la syénite (tableau n° 14). Les données de ce tableau indiquent une valeur inférieure à la proportion en phénocristaux perthitiques (45%) calculée à l'issue des travaux d'observation en lames minces. Cette différence s'explique par le fait que les analyses microscopiques n'ont pas dissocié de ces phénocristaux, les plagioclases intra-phénocristaux cristallisés dans les cassures.

Tableau 14: proportion des phases de coloris de l'image de l'échantillon de syénite

Désignation	Proportion (en %)	Nature minéralogique
Phase de coloris rouge	41,44	orthose perthitique
Phase de coloris blanc-grisâtre	53,9	Plagioclase quartz
Phase de coloris sombres	4,7	Amphibole-pyroxène Magnétite -titanite

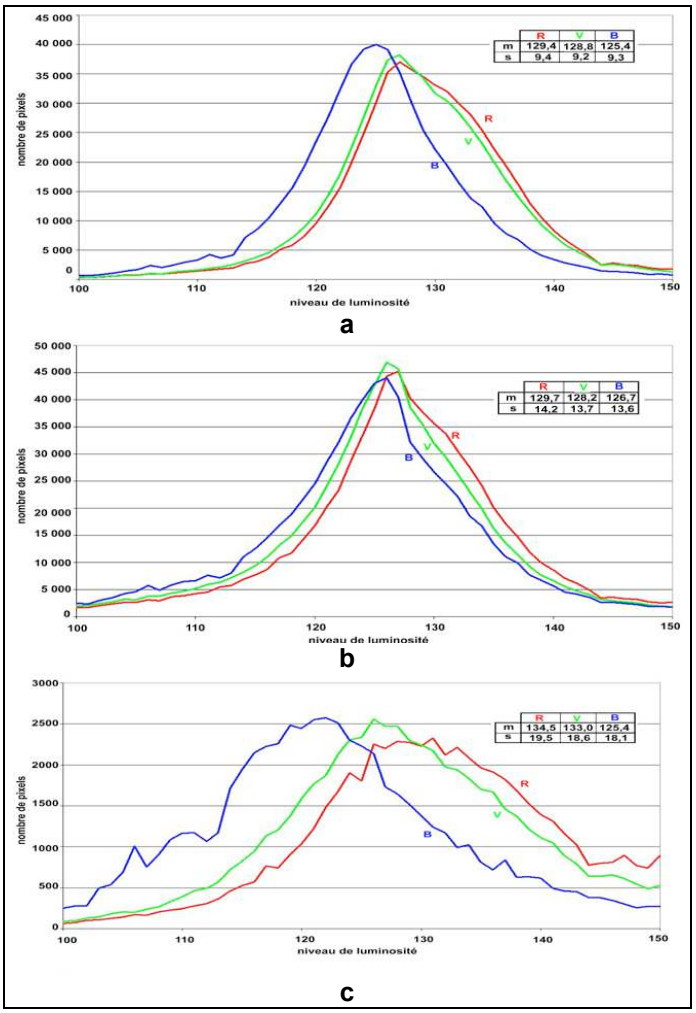
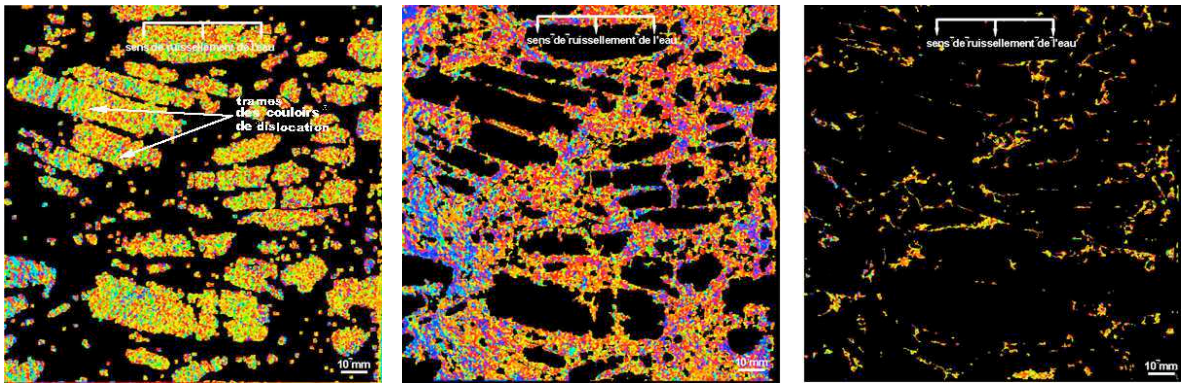


Figure 70 : histogramme des composantes RVB des images de variation de couleur en 12 mois des différentes phases minérales de la syénite

a. histogramme RVB des orthoses perthitiques. **b.** histogramme RVB des minéraux blancs. **c.** histogramme RVB des minéraux sombres.

Remarques :

Pour les phénocristaux *(fig. n°70-a)*, les pixels « Verts » en primaire sont distribués autour de 128,8 ; et les « Rouges » autour de 129,4. Pour la phase minéralogique des minéraux sombres *(fig. n°70-c)*, les valeurs sont respectivement de 133,0 et 134,5. Au niveau de la phase minéralogique des minéraux blancs *(fig. n°70-b)*, on note l'évolution du « Rouge » avec m égale à 129,7.



a b c

Figure 71: carte de la variation de teinte après 12 mois d'essai sur l'échantillon de syénite

a. phase des orthoses perthitiques. **b.** phase des minéraux blancs. **c.** phase des minéraux sombres .

Remarques :

Sur la figure n°71-a, on peut relever les couleurs jaunes et rouges qui soulignent les couloirs de dislocation. On rappelle que dans la synthèse additive, la conjugaison des primaires « Vert » et « Rouge » donne le Jaune (annexe IV-3). On peut donc continuer de penser à une accumulation du fer dans ces couloirs.

3.2. Après 12 mois de conditionnement de l'échantillon de granite

La figure n°72, indique les *images sources* à partir desquelles les études qui concernent les échantillons de granite sont conduites. En suivant la même démarche que pour la syénite, on a obtenu les images de la figure n° 73. L'application de la fonctionnalité *« décomposition en composante TSL »* du logiciel Paint Shop Pro, à l'image de la figure n°73-b a permis d'aboutir aux résultats indiqués à la figure n°74.

Sur la figure n°74-b, on constate que la saturation moyenne de l'image est relativement faible. Ce qui traduit une faible variation de la couleur de la face polie de l'échantillon, au bout de douze mois d'essai. On s'en rend d'ailleurs compte, sur les images de la figure n°72. Il est quasi impossible, à la perception visuelle humaine de relever des différences notables entre l'image 72-a et l'image 72-b.

Sur la figure n°74-b, on relève un bruit important dans la partie droite de l'image. Ceci est corrélé avec un fort contraste dans la même zone, sur l'image de la composante L *(figure n°74-c)* et par des teintes plus violettes et rouges de la composante T *(figure n°74-a)*. Ce qui indique un problème survenu lors de la

numérisation des images. Dans cette zone, l'erreur commise sur la superposition des images *t égale à 0 mois* et *t égale à 12 mois* est grande. Dans la partie gauche de ces images, un phénomène identique bien que d'amplitude moins grande est constaté également. Les parties centrales ne présentent pas ce phénomène. Comme pour la syénite, c'est donc sur elles sur que les observations et mesures doivent se concentrer.

Sur la figure n°75-c, on peut identifier sur l'image en composante L, des plages de luminosités homogène qui correspondent aux grains des différents minéraux. En douze mois d'essai, certains grains montrent une diminution de leur luminosité, alors que d'autres voient leur luminosité croître. La luminosité moyenne de la composante L étant fixé à 128 du fait de l'hypothèse de la superposition des histogrammes de luminosité aux divers temps d'essai, on constate que généralement, les zones de diminution de luminosité correspondent à une sous-division de la population des minéraux clairs peu colorés. Corrélativement, par effet de balancier, la luminosité des orthoses roses, ainsi que celle d'une autre sous-division de la population des minéraux clairs peu colorés, paraît augmenter. Une observation à la loupe binoculaire montre que cette sous-division correspond à des grains initialement assez microfissurés. L'accroissement de leur luminosité correspondrait à une ouverture, voire une multiplication des fissures.

L'image de la figure n°78 est le résultat de la variation de teinte, après 12 mois d'essai. Cette image correspond à la transformation TSL vers RVB, de la carte des variation de couleur dont on a conservé la teinte, mais imposé à tous les pixels, une luminosité L égale à 128, et une saturation S égale à 255. De la sorte, on conserve la teinte et on s'affranchit du bruit qui affecte les images S et L. A partir de cette image de la figure n°78, on a obtenu la variation de teinte pour les phases minéralogiques des orthoses *(fig. n°79-a)* et minéraux clairs *(fig. n°79-b)*. Les minéraux sombres ayant des dimensions relativement faibles, ont été négligés.

Ces cartes de variation de teinte de ces phases minéralogiques ont été obtenues à l'issue de l'application d'un masque *(fig. n°76)* sur la partie centrale de la carte de variation de teinte après douze mois d'essai.

L'hypothèse qui a présidé au pré-traitement des images numériques, implique que la variation moyenne de teinte sur l'ensemble de la surface étudiée de l'échantillon soit négligeable. Les variations de teinte cartographiées amplifient le résultat d'une faible rotation du vecteur RVB en chaque pixel. On constate sur les cartographies effectuées que seules les teintes des séries *rouge-orange-jaune* d'une part et *violet-bleu-cyan* d'autre part prédominent. Les teintes vertes sont rares. Ceci amène à faire l'hypothèse que cette composante de la couleur des images n'est modifiée qu'en des points très rares. On peut penser que la rotation du vecteur RVB se fait autour de l'axe V. On peut dire d'un point de vue relatif, que les minéraux décrits comme clairs et peu colorés ont tendance à prendre une teinte plus ocre et que les orthoses roses, par effet de levier deviendraient bleues.

Les cartes de variation de couleur (teinte + saturation + luminosité) montrent que certains minéraux clairs prennent une teinte brun-ocre que l'on associe généralement à un mécanisme d'altération impliquant le fer.

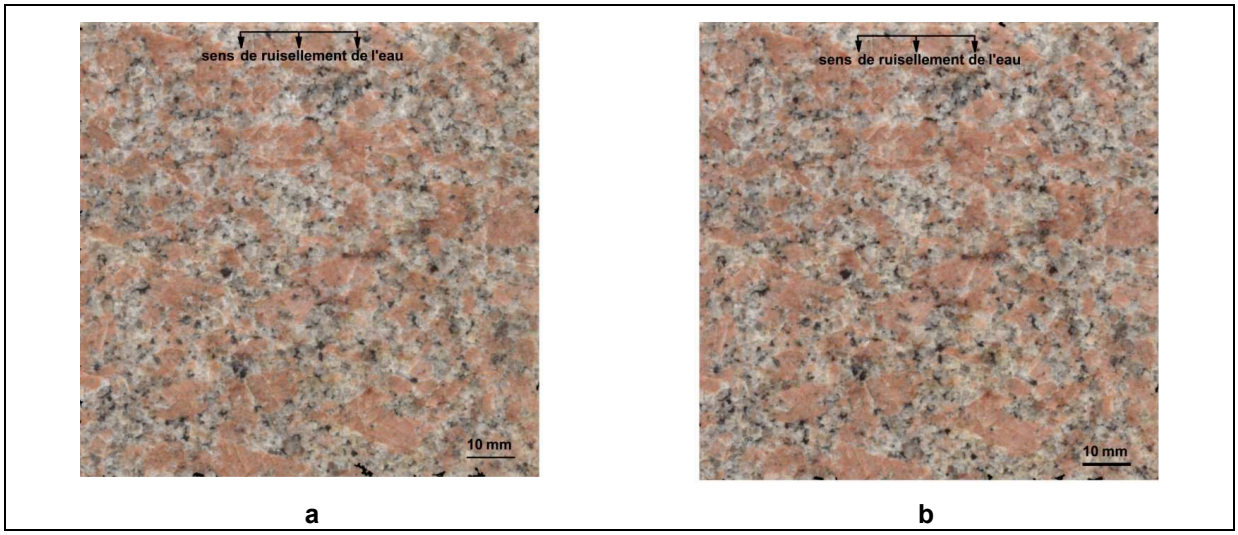


Figure 72: image de l'échantillon de granite rose

a. image en début d'essai. **b.** image après douze mois d'essai

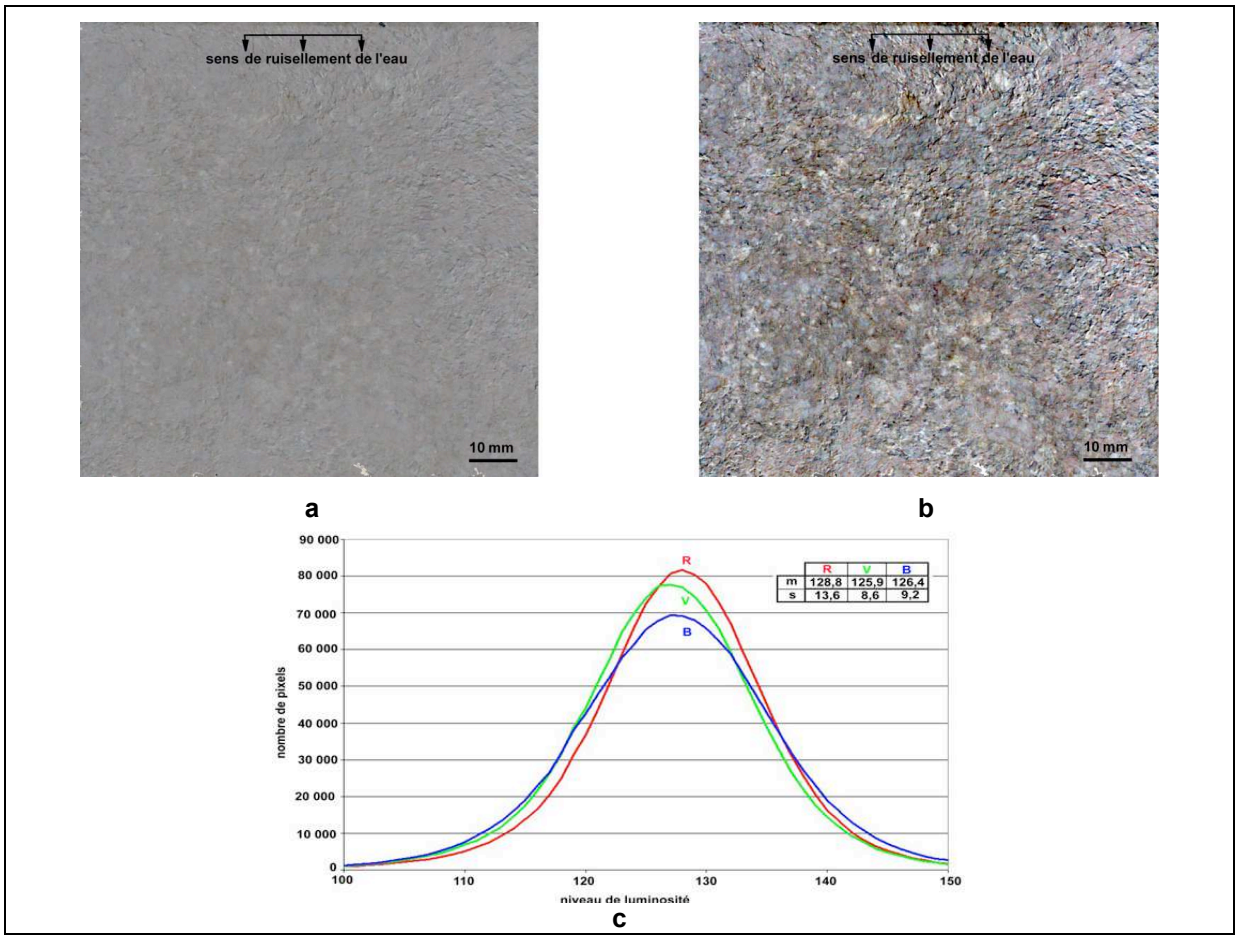


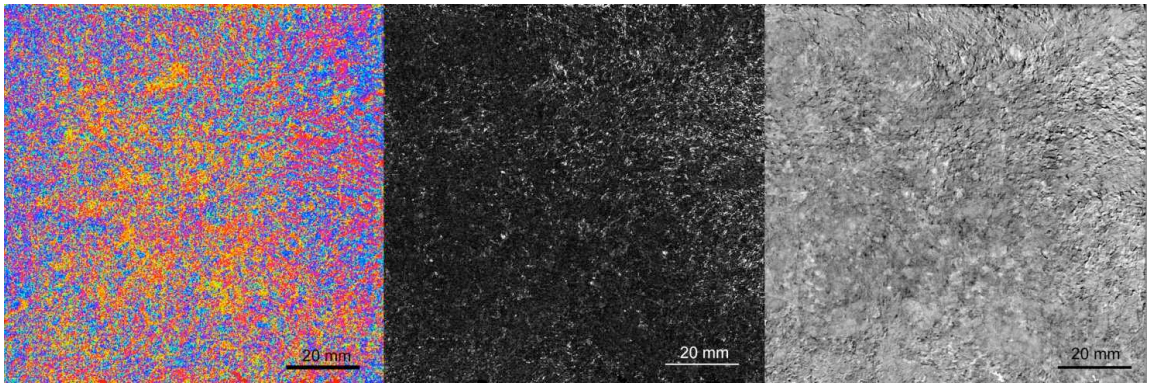
Figure 73: variation de couleur entre t= 0 et t=12 mois de l'échantillon de granite rose.

a. image résultant de l'opération [(image à t=12mois) – (image à t=0mois)] +gris moyen[(1)]. **b.** même image mais contraste augmenté de 80%. **c.** histogramme RVB de la répartition des pixels de l'image résultant de l'opération [(image à t=12mois) – (image à t=0mois)] +gris moyen[(1)].

(1)- Le gris moyen correspond à des composantes RVB toutes égales à 128

Remarques :

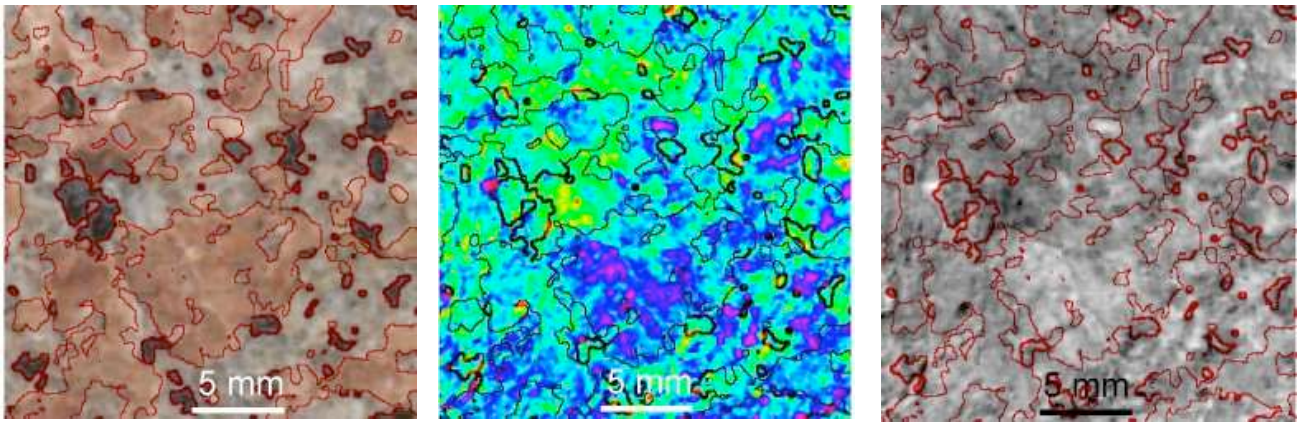
Sur l'histogramme, le primaire « Vert » s'est légèrement déplacé et, est maintenant normal autour de 125,9 sa nouvelle valeur médiane. Le « Bleu » s'est déplacé autour de la médiane 126,4 inférieure à 128. Le « Rouge », a légèrement progressé. Il s'est déplacé autour de la médiane 128,8.



a b c

Figure 74: décomposition en composante TSL de l'image variation de couleur résultant de l'opération [(image à t=12mois) – (image à t=0mois)] gris moyen avec contraste augmenté de 80%

a. image en composante T (teinte). **b.** image en composante S (saturation) **c.** image en composante L (luminosité).



a b c

Figure 75: un détail de la surface de l'échantillon de granite rose avec les contours des minéraux

a. détail de la surface de l'échantillon **b.** carte de la composante L (luminosité) de la variation de couleurs en 12 mois exprimée en *fausses* couleurs[(1)]. **c.** carte de la composante L (luminosité) de la variation de couleurs en 12 mois exprimée en teinte de gris

(1)- La couleur cyan (annexe I-3), exprime une variation négligeable de la luminosité. Les couleurs allant de bleu à violet expriment une augmentation de la luminosité. Les couleurs allant de turquoise à jaune expriment une diminution de la luminosité.

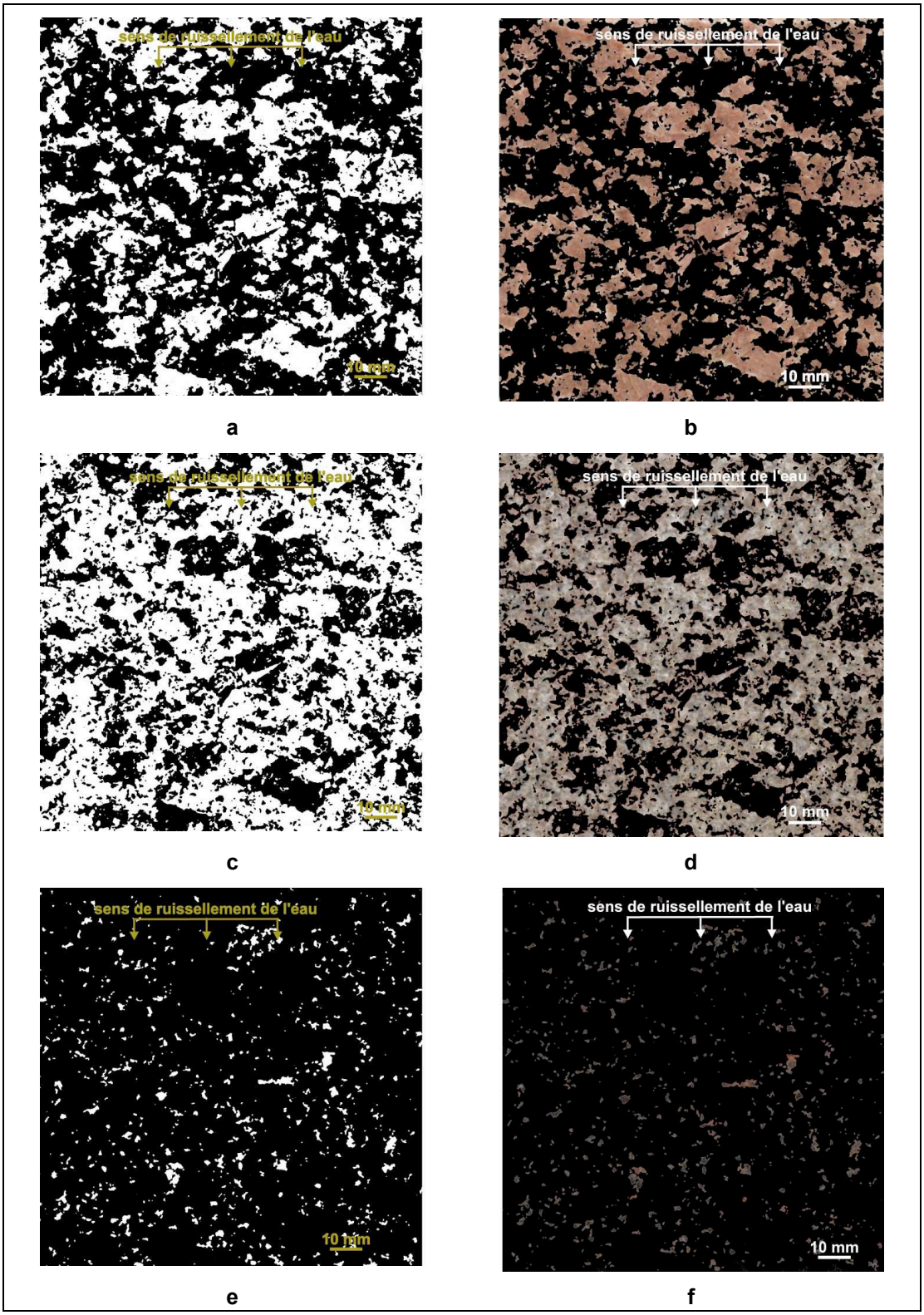


Figure 76: images des différentes phases minéralogiques de l'échantillon de granite

a. masque pour la segmentation des orthoses. **b.** phase minéralogique des orthoses. **c.** masque pour la segmentation des minéraux clairs. **d.** phase minéralogique des minéraux clairs. **e.** masque pour la segmentation des minéraux sombres. **f.** phase minéralogique minéraux sombres.

Remarques :

Le résultat des opérations de segmentation permet de définir la proportion de chacune des phases de coloris de l'image de l'échantillon de granite (tableau n° 15). Comme pour la syénite, on note un décalage (feldspaths roses : 60 % pour les analyse macroscopiques contre 37,7% selon les résultats de la segmentation). Cela s'explique par le fait qu'au contraire de ces analyses macroscopiques, la segmentation a pu dissocier de ces phénocristaux, les plagioclases intra-prophyroclastes.

Tableau 15: proportion des phases de coloris de l'image de l'échantillon de granite

Désignation	Proportion (en %)	Nature minéralogique
Phase de coloris rouge	37,7	orthose (porphyroclastes) à inclusions microclines
Phase de coloris blanc-grisâtre	57,1	Plagioclase quartz
Phase de coloris sombres	5,1	Biotite ilménite magnétite

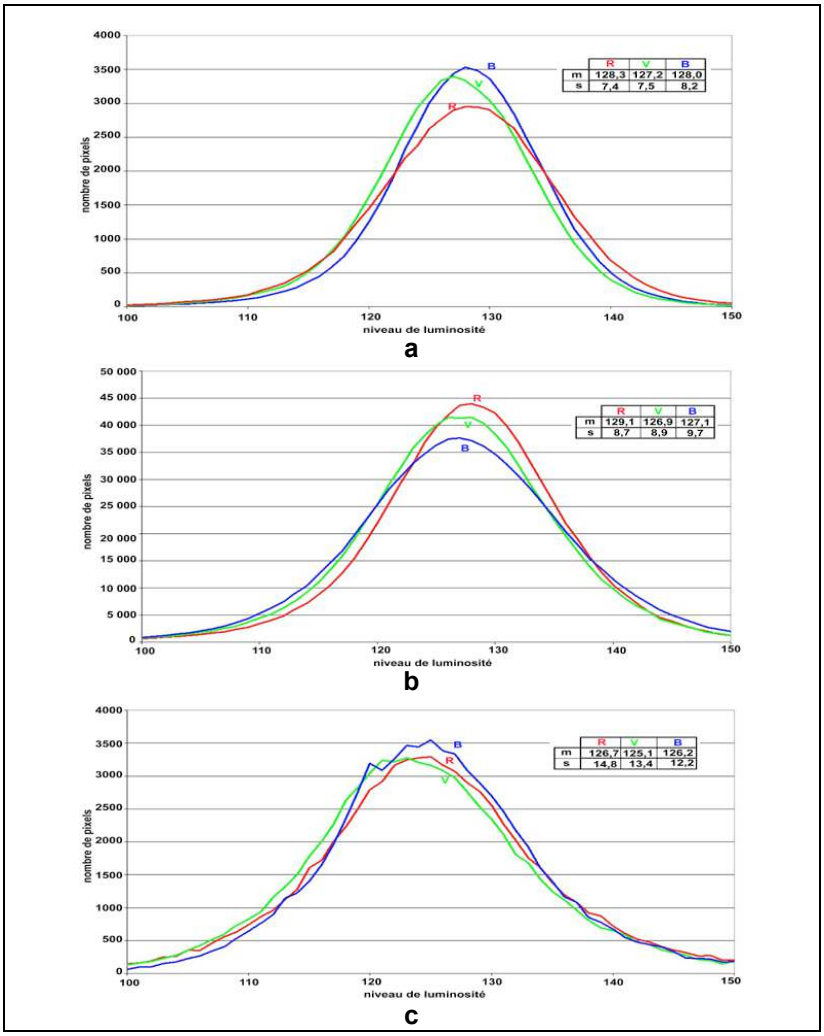


Figure 77: histogramme des composantes RVB des images de variation de couleur en 12 mois des différentes phases minérales du granite.

a. histogramme RVB des orthoses perthitiques. **b.** histogramme RVB des minéraux blancs. **c.** histogramme RVB des minéraux sombres.

Remarques :

Pour les phases de coloris rouges et blancs-grisâtres, on relève que les primaires « Rouge » évoluent avec une distribution de pixels autour de moyennes supérieures 128. Par contre, au niveau des ferromagnésiens on note que *m (126,7)* est inférieure à 128. Sur les histogrammes, on note aussi que la moyenne des pixels s'exprimant avec le primaire « Vert » reste dans tous les cas inférieure à 128.

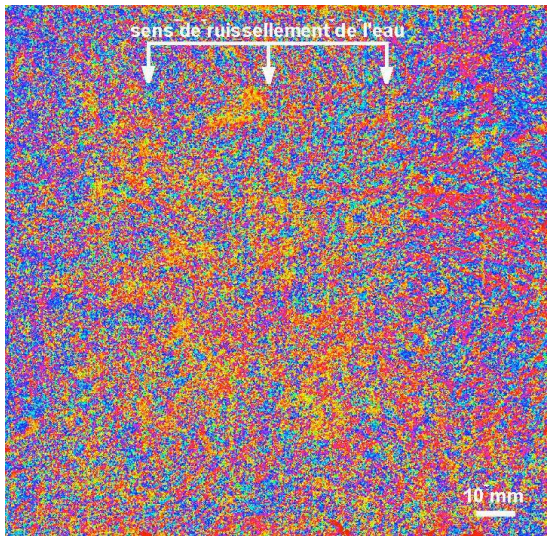


Figure 78: carte de la variation de teinte après 12 mois d'essai sur l'échantillon du granite

image résultant de l'opération [(image à t=12mois) – (image à t=0mois)] + gris moyen à laquelle on a imposé T (Teinte = 128) et S (Saturation = 255).

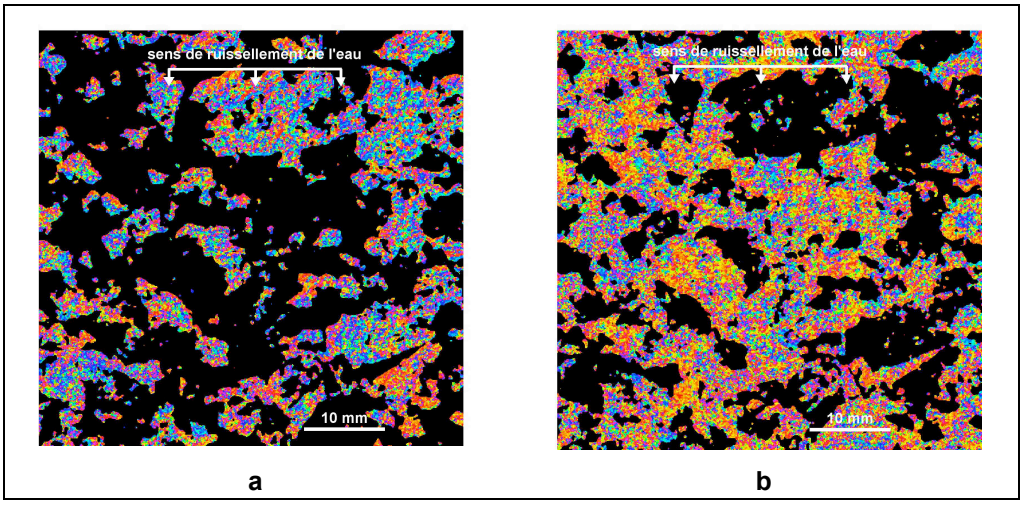


Figure 79: carte de la variation de teinte après 12 mois d'essai sur l'échantillon du granite pour les phases minéralogiques

a. phase minéralogique des orthoses. **b.** phase minéralogique des minéraux clairs .

VI. Interprétations des résultats de l'analyse colorimétrique

1. Prise en compte du mode de fonctionnement du scanner

A l'issue de l'analyse des variations de luminosité, on a enregistré des pixels avec des valeurs de niveaux de gris inférieures ou supérieures à 128.

Pour les pixels ayant des valeurs de niveaux de gris inférieures à 128, le mode de fonctionnement du scanner *(chapitre deux, paragraphe III-2)*, conduit à déduire que, lors de la numérisation à 12 mois, les capteurs ont enregistré, pour ces parties, une intensité de luminosité inférieure à celle à laquelle ils avaient été sensibles au départ. Ce qui pourrait introduire deux axes d'interprétation.

On peut, en une première approche, expliquer cela par un processus qui conduirait à la néo-formation de minéraux à réflectance plus faible et ce, à l'issue du conditionnement des échantillons.

En seconde approche, on peut lier ce phénomène à l'ouverture de microfissurations. Ces microfissurations auraient alors, par *emprisonnement* de photons entre les micro-parois, réduit la lumière devant revenir vers les capteurs, après réflexion sur la face polie de la roche ornementale.

Ce type de variations de luminance étant localisé aux limites des cristaux, et sur les vacuoles préexistantes (mais provoquées par les opérations de façonnage), on peut en déduire qu'elles sont la signature de l'amorce d'une ouverture des joints.

Les valeurs de niveaux de gris supérieures à 128 concernent, principalement, les minéraux qui s'expriment presque entièrement en terme de coloration. Il est donc pertinent de conjuguer son interprétation, avec celle portant sur les variations de chrominance.

En ce qui concerne les variations de la chrominance, on rappelle que lors de l'enregistrement des couleurs, le scanner fonctionne selon le principe de la synthèse additive (annexe I, paragraphe 3. 2. 1.).

Il ressort donc de ce principe, qu'à l'issue des différentes étapes de conditionnement, la perception par le scanner de la progression du « Rouge », traduit un renforcement de cette teinte dans les coloris qui composent les échantillons.

A l'inverse, la perception que le « Bleu » régresse, manifeste une diminution de la présence de cette teinte. Quant au « Vert », pour lequel dans la plupart des cas, la distribution des pixels est restée quasiment normale autour de 128, on peut conclure de sa stabilité vis à vis des opérations de conditionnement

2. Evolution des revêtements

Parmi les causes qui sont à la base de la coloration des minéraux et des roches, on distingue usuellement :

- l'absorption sélective des cations d'éléments de transition ;
- la coloration due aux transferts de charge ;
- la coloration par les centres colorés ;
- la coloration expliquée par la théorie des bandes ;
- et les phénomènes élastiques d'interaction lumière-matière.

Si les autres sont exclusivement physiques, les causes, en relation avec les phénomènes d'interaction lumière-matière, notamment, en ce qui concerne la diffusion, se conjuguent avec les mélanges mécaniques, qui conduiraient à l'apparition dans le cristal, de minéraux absents au moment de sa genèse.

C'est ainsi que, l'hématite par exemple, est un pigment fréquent, qui colore les minéraux en rouge ; la chrysoprase, une variété cryptocristalline verte, est habituellement colorée en vert par de la chlorite.

De même, des inclusions d'eau peuvent rendre le quartz hydrothermal laiteux. Une dispersion microscopique d'aiguilles de rutile peut causer la diffusion de la lumière bleue, et confère au quartz sa couleur rose. Si les aiguilles sont plus grandes, le rouge est également diffus, et le quartz est bleu.

La présence de carbone en fine dispersion, soit amorphe, soit sous la forme de graphite, peut être la cause de nuances allant de gris à noir pour certains minéraux. On rappelle que la diffusion est due à la réflexion aléatoire de la lumière dans de nombreuses directions. L'observateur perçoit donc des combinaisons de lumière qui émanent de nombreuses sources. Par ailleurs, avec la diffusion, ce sont : la diffraction ainsi que la réfraction, qui manifestent les phénomènes élastiques d'interaction lumière-matière.

Les causes de la coloration des minéraux et des roches, conjuguées avec les remarques faites lors de l'analyse colorimétrique des images numérisées, amènent donc à traduire l'augmentation du « Rouge », comme l'amorce d'une ferruginisation des échantillons, à la suite des opérations de conditionnement.

Cette ferruginisation affecte toutes les phases minéralogiques. On rappelle que selon le niveau de l'imprégnation, la ferruginisation peut quelquefois, s'exprimer en des coloris jaunâtres (Leneuf, 1959).

Cette déduction, en relation avec le fait que l'évolution de la face polie des revêtements traduit une ferruginisation, rejoint aussi les conclusions des travaux de Pédro [1964].

Lors de ses travaux expérimentaux avec l'Extracteur Soxhlet, ce scientifique avait noté qu'au sein de la *zone atmosphérique*, se développait une très nette

ferruginisation des fragments de roches. Par ailleurs, on remarquera que cette constatation de la progression du « Rouge », confirme la perception visuelle de la face polie des revêtements, après 12 mois de conditionnement.

3. Analogie entre l'évolution du fer en milieu naturel et le mode de ferruginisation en milieu expérimental

Le phénomène de la ferruginisation dans le processus d'altération des roches en milieu naturel, a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Ainsi, dans son étude relative à « *l'évolution minéralogique des roches aux altérites* », Chatelin [1974], se basant sur les travaux de Delvigne [1965], a rappelé que la ferruginisation nécessite, outre les bonnes conditions de drainage, la minéralisation des eaux en hydroxydes de fer.

En milieu naturel, l'enrichissement des eaux interstitielles en hydroxydes de fer, est réalisé lors de l'attaque et la transformation de minéraux primaires riches en fer (biotites, pyroxènes, amphiboles, sulfures et oxydes de fer, etc.) et, présents dans la roche. Cet enrichissement se réalise selon un processus chimique contrôlé par un pH d'abrasion des minéraux proche de 10 et 11 (Stevens et Carron, 1948).

Durant toute cette transformation du minéral primaire, les eaux acides ont échangé leurs ions H^+ contre les cations, suivant le processus chimique indiqué par Stevens et Carron [1948] et, rappelé au paragraphe II-2.2.2. du chapitre un.

Le pH atteint alors, dans le réseaux de fissuration, des valeurs proches de celles du pH d'abrasion. A ces valeurs de pH, le fer libéré du réseau cristallin des minéraux ferromagnésiens se trouve dans le domaine d'instabilité et, il se précipite en hydroxydes selon la réaction rappelée par Loughnan [1969] :

$$2\,Fe_2O_3 + 3\,H_2O \rightarrow 2\,Fe_2O_3 \bullet 3\,H_2O$$

Par la suite, on a un transfert du fer aux autres minéraux, qui est consécutif à de faibles déplacements que favorisent les pores et les microfissurations (Chatelin, 1974). Ces microfissurations seraient aussi, à l'origine des valeurs de niveaux de gris supérieures à 128, dans les minéraux de feldspath. Ces valeurs de niveaux de gris supérieures à 128, seraient consécutives à une amorce de *« blanchiment »* des échantillons.

Selon Leneuf [1959], ce *« blanchiment »* est la conséquence de la microdivision des plagioclases, ainsi que des autres feldspaths, au début de l'altération des roches de la famille des granites.

Les tableaux n°^{s}16 et 17 récapitulent spécifiquement, les valeurs des paramètres de distribution des pixels qui s'expriment en primaire « Rouge ». Le tableau n°16 précise que les ferromagnésiens ont la valeur médiane de distribution la plus élevée (134,5), viennent ensuite les plagioclases (129,7), et enfin les phénocristaux (129,4). Au niveau du tableau n°17, ce sont plutôt les plagioclases et quartz qui ont la valeur

médiane la plus élevée (129,1). Les autres minéraux suivent avec 128,3 pour les porphyroclastes et 126,7 pour les ferromagnésiens.

Tableau 16 : valeur des paramètres de distribution des pixels « Rouge » pour chacune des phases minéralogiques de la syénite

Phase minéralogique	Valeur médiane *(m)*	Déviation standard *(s)*
Orthose perthitique	129,4	9,4
Plagioclase, quartz	129,7	14,2
Amphibole, pyroxène, magnétite Titanite, etc.	134,5	19,5

Tableau 17 : valeur des paramètres de distribution des pixels « Rouge » pour chacune des phases minéralogiques du granite

Phase minéralogique	Valeur médiane *(m)*	Déviation standard *(s)*
orthoses à inclusions microclines	128,3	7,4
Plagioclase, quartz	129,1	8,7
Biotite, ilménite, magnétite	126,7	13,4

Tableau 18: composition chimique primaire des principaux minéraux de la syénite d'Okrouyo et du granite de Yakala

Désignation	minéraux					
	(1) Feldspaths potassiques	(2) plagioclases	Quartz	Biotite	(3) Amphiboles	(4) Pyroxène
Composition chimique	K, Na $[Si_3\ AlO_8]$	Na $[Si_3\ AlO_8]$; Ca $[Si2\ Al_2\ O8]$	$Si\ O_2$	K $(Mg, Fe)_3$ $[Si_3AlO_{10}\ (OH, F)_2]$	-$(Mg, Fe)_7\ [Si_8O_{22}]$ $(OH, F)_2$ -$Ca_2\ (Mg, Fe)_5$ $[Si_8O_{22}]\ (OH, F)_2$ -$(Ca, Na, K)_2\ (Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Al)_5$ $[Si_6\ (Al, Si)_2\ O_{22}]$	-$(Mg, Fe)_2\ (SiO_3)_2$ -$(Ca, Mg, Fe)_2$ $(SiO_3)_2$ -Al Li (SiO_3) -Al Na $(SiO_3)_2$ -Fe3+ Na $(SiO_3)_2$

Source: Foucault et al [2000]

(1) feldspaths potassiques comprenant le microcline, l'orthose et la sanidine.

(2) de l'albite (An $_{0\text{-}10}$) à l'anorthite (An $_{90\text{-}100}$).

(3) amphiboles respectivement ferromagnésiennes, calciques et sodiques.

(4) on a respectivement : les orthopyroxènes, les clinopryroxènes ferromagnésiennes, et calciques et enfin les clinopryroxènes alcalins

Cependant, une analyse du tableau n°18 fait remarquer que seule la phase minéralogique ferromagnésienne est susceptible de libérer le fer, responsable de la dynamique de l'expression des pixels en « Rouge ».

Ce tableau n°18 indique la composition chimique *primaire* des principaux minéraux de chacune des phases minéralogiques, telle que rappelée par Foucault et *al* [2000]. La syénite et le granite étudiés étant des roches magmatiques, on s'est basé sur cette composition chimique issue de la différenciation magmatique pour tenir compte, s'agissant de la source du fer, des minéraux néoformés et génétiquement liées à la phase de la rétro-diagenèse.

Ces minéraux que sont la chlorite, la magnétite, etc., ont été mis en évidence par les analyses pétrographiques du chapitre 3-II . La présence de ces minéraux, par exemple la magnétite (Fe^{2+} Fe^{3+} O_4), pourrait suggérer que la ferruginisation mise en évidence par l'analyse colorimétrique ne soit pas exclusivement consécutive aux opérations de conditionnement des échantillons.

On rappelle que la relation mathématique qui pilote les opérations de soustraction entre images, permettait d'égaliser les valeurs de niveaux de luminosité des primaires RVB des coloris à 128 ;128 ;128, lorsque la phase minéralogique n'a pas été affectée par les facteurs de l'altération météorique du milieu expérimental.

On en déduit donc que la dynamique de la ferruginisation observée est consécutive à une *exsudation* du fer des réseaux cristallins des ferromagnésiens, y compris ceux des minéraux de la rétro-diagenèse.

Il est donc logique, d'en déduire en conséquence, que la ferruginisation des échantillons de roches ornementales étudiés, est un processus qui est exclusivement subséquent des opérations de conditionnement.

Si l'on se réfère au cycle géochimique du fer tel que rappelé par Delvigne [1965], cette ferruginisation serait alors la conséquence des cycles Marche/Arrêt de la pompe à eau et de la lampe halogène.

La mise en marche de la pompe à eau de pluie, qui assure l'hydratation cyclique des échantillons, va ainsi créer l'environnement réducteur responsable de la libération du fer sous sa forme Fe^{2+}. De même, la lampe halogène, mise en marche consécutivement à l'arrêt de la pompe à eau de pluie, en ramenant les échantillons vers une hygrométrie minimale, pilote, ce faisant, le drainage des échantillons et, favorise une précipitation des hydroxydes, et donc, l'environnement d'oxydation. Les cycles Marche/Arrêt des appareillages se répétant, on a assisté à une accumulation du fer.

En milieu naturel, Delvigne [1965] a souligné que cette accumulation se réalise dans les chenaux laissés par les pores et la microdivision des feldspaths. Dans le cadre des présentes expériences, ceci pourrait expliquer, au niveau de ces minéraux, la *forte* médiane des pixels s'exprimant avec le primaire « Rouge ».

La signature de ceci pourrait être, entre autre, la trame rouge /jaune des couloirs de dislocation de la figure n°70-a. Ce mode d'accumulation du fer s'apparenterait au comportement géochimique de ce minéral en milieu ferrallitique (PEDRO, 1964).

Sans aller jusqu'à assimiler cette évolution des revêtements à une transformation de type ferrallitique, ce qui permettrait de dire que l'environnement expérimental, dans lequel se sont effectués les travaux, est bien celui de « *climat tropical humide* », les interprétations expriment qu'on est en présence de l'un des critères géochimiques de caractérisation de ce type de l'altération météorique en milieu naturel. Et ce, malgré la durée *relativement* courte (un an) sur laquelle les expérimentations ont été conduites.

Les autres critères géochimiques, rappelés par Pédro [1964] à savoir :

- une émigration *totale* de la silice, des alcalins et des alcalino-terreux ;
- une accumulation *partielle* de l'alumine et du titane.

permettent, au terme de ce travail expérimental, de relier le phénomène d'exportation totale de la silice à la microfissuration des minéraux, manifestée par les luminances inférieures à 128 pour chacun des primaires RVB et, qui s'accompagne de dissolution et éventuellement de redistribution de matière, tel que indiqué par Chatelin [1974].

Quant à l'accumulation partielle de l'alumine et du titane, précisément en ce qui concerne l'alumine, et rejoignant en cela Chatelin [1974], le blanchiment, consécutif à la microfissuration des feldspaths, peut être le fait d'accumulation, dans ces microfissurations de minéraux alumineux, mais non ferreux.

VII. Conclusion

L'analyse de la pétrogenèse de la syénite du Mont Troquoi et du granite rose du Mont Mariame, permet d'expliquer la spécificité de la texture de ces roches, de laquelle elles tiennent leur beauté qui confère à chacune, la qualité de roche ornementale.

On note que lors de l'examen des « images différences », il est apparu que le bruit qui a affecté les images et qui dérive des conditions d'utilisation du scanner, peut entraver la mise en œuvre de l'analyse colorimétrique.

Dans le cadre de ces travaux, on a contourné cet obstacle en considérant parfois, les parties centrales des images qui, à la suite des opérations de vectorisation, ont eu des réponses plus rigoureuses. Ce qui a favorisé en ces endroits, l'élimination du bruit.

Pour la syénite comme pour le granite, cela a élevé l'objectivité des analyses auxquelles les « images différences » ont été soumises et rendu possibles les interprétations qui traduisent la ferruginisation des échantillons de roches ornementales.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude relative à la Proposition d'une méthode d'étude expérimentale pour appréhender l'altération superficielle de parements en dalles de granitoïdes sous climat tropical humide a été envisagée, dans un cadre de réflexion qui s'inscrit dans la perspective de la mise en valeur des ressources ivoiriennes en matière de gisements de roches ornementales.

L'étude a été conduite selon deux axes principaux. Le premier axe, qui visait la construction d'un dispositif destiné à mettre en œuvre des expérimentations *in vitro*, a dégagé un modèle d'*environnement climatique urbain.* Ce modèle s'est appuyé sur le climat de la zone de l'agglomération d'Abidjan qui, en Côte d'Ivoire, est la zone soumise aux phénomènes météorologiques typiques du climat tropical humide.

A la suite de simplifications, qui conservaient cependant un parallélisme avec les cycles d'état relatifs au climat tropical humide, la vitesse d'impact des gouttes de pluie au sol, les valeurs liées à l'hygrométrie, ainsi qu'aux différentes températures à la surface du sol ont été retenues comme paramètres devant être pris en compte par les études en vue de la conception du dispositif expérimental.

Le dispositif expérimental a donc été conçu de sorte qu'il permette de reproduire la vitesse d'impact des gouttes de pluie au sol (2,3 m/s), une température à la surface des échantillons variant entre 24 °C et 76°C et, une hygrométrie entre la saturation et un état d'humidité relative HR avoisinant 85 %. Le fluide de ce système d'agression, est constitué par de l'eau de pluie, traitée au laboratoire pour la débarrasser des charges solides et, protégée de toute contamination possible par des substances métalliques, grâce à sa manipulation en conditions Soxhlet (Pédro, 1964).

La mise en œuvre du dispositif expérimental, dans le cadre de mesures visant sa validation, a nécessité le façonnage de deux types d'échantillon de revêtement, à partir des gisements de roches ornementales d'Okrouyo (syénite) et de Yakala (granite rose). Ces gisements ont été suggérés par la présence sur ces sites, de blocs *sains* laissés par d'anciens travaux de découpage. A l'issue du façonnage de ces blocs, on a obtenu des échantillons de dimensions 100 mm X 100 mm X 15 mm.

La validation du dispositif a été pilotée par une analogie entre le mode de l'altération météorique du milieu expérimental, et celui de ferrallitisation qui caractérise les processus de transformation des roches magmatiques en climat tropicale humide.

Pour ce faire, dans un premier temps, on a mis en parallèle les facteurs de l'altération météorique générés par le dispositif, avec ceux usuellement responsables de l'évolution minéralogique des roches en milieu de ferrallitisation.

Cela a permis de se rendre compte que, par rapport à la façon dont agissent ces facteurs propres au milieu naturel, la mise en œuvre du dispositif ne fait qu'amplifier les actions de la variation de température, de la pluviosité, ainsi que celles du cycle

imbibition/séchage des échantillons. Ce qui confirme les conditions d'essais de l'altération météorique *in vitro* rappelées par Pédro[1964].

Le second volet de la démarche, de loin le plus important, a consisté à caractériser le type de transformation survenu dans les échantillons. Cette phase a été pilotée par une analyse colorimétrique d'images numérisées.

Ce mode d'analyse a été retenu, parce qu'il permettait, à l'issue des échéances des observations réalisées tous les 90 jours, de scanner les échantillons et, de poursuivre ensuite les expériences, *préservant* ainsi, *l'entièreté* des « revêtements ».

A ces échéances, on a donc été amené, à l'aide des logiciels Visilog 5.4 (Noesis, 2001) et Paint Shop Pro 5.0 (Jasc Software, 1998), à mettre en œuvre une démarche innovante que cette obligation de préserver l'entièreté des revêtements a amené ce travail à *conceptualiser.*

Cette démarche consistait à ajouter un gris neutre (R = 128, V = 128 et B = 128) aux vecteurs différence entre images, pour pouvoir traiter la diminution même assez forte, d'une ou plusieurs composantes chromatiques R, V, ou B, consécutive aux transformations susceptibles d'affecter les images à la suite des essais.

De ce fait, sur « l'image différence », que l'on peut traduire par l'expression mathématique :

$$[\ (\text{image à } t = 12 \text{ mois} - \text{image à } t = 00 \text{ mois}\ )\ ] + [128\ ;128\ ;128]$$

et qui représente en tout point la différence de couleur, lorsque la valeur de l'une des composantes R, V, ou B est supérieure ou inférieure à $m = 128$, cela a traduit respectivement un renforcement ou une diminution de la composante chromatique.

C'est cette démarche qui a permis, dans les systèmes colorimétriques TSL et RVB, d'étudier les variations de luminance et de chrominance qui ont affecté les matériaux, tant au niveau de l'entièreté de chacune des faces polies, qu'au niveau des phases minéralogiques, sans détériorer les échantillons.

Cette méthode expérimentale qu'on propose tient ses performances de l'objectivité de l'analyse colorimétrique d'images numérisées d'une part, et de la simplicité de la mise en œuvre du dispositif expérimental d'autre part,.

Toutefois, il convient de relever que son exploitation nécessite que les opérations soient conduites selon la rigueur que commande la logique scientifique.

Par exemple, le surfaçage des faces polies devra permettre l'éclairage uniforme des échantillons lors de la numérisation. Et lors de cette numérisation des échantillons, d'une opération à l'autre, la position de l'échantillon sur le plat du scanner devra être rigoureusement identique.

En effet, si ces précautions ne sont pas prises en amont, le fait que les images ne se superposent pas parfaitement rend les « images différences » inexploitables à cause du bruit qui les affecte.

La démarche qui, au moment où se réalisent les essais, peut permettre d'éviter un déréglage systématique du scanner dû à un changement de paramétrage lors d'exécution de travaux différents, est son utilisation exclusive pour la numérisation des échantillons.

Dans le cadre de ce travail, pour palier à cette absence de précaution en amont qui a engendré un bruit important sur les « images différence », on a procédé à une transformation vectorielle puis un redressement des images. Ensuite, on a parfois restreint les observations aux parties centrales des images qui, avaient des réponses plus rigoureuses aux opérations de vectorisation et de redressement et donc, où on avait quasiment réussi à éliminer le bruit.

Après 12 mois de conditionnement, on a observé que les échantillons ont été affectés par une ferruginisation, à laquelle les ouvertures de joints dans les minéraux, ainsi que le blanchiment des feldspaths constatés par les analyses de variation de luminance, permettent d'associer une migration de la silice et une accumulation partielle de l'alumine.

Les analyses des « images différences » ont relevé la faiblesse des variations de couleur et cela indique que le phénomène de ferruginisation qui a affecté les échantillons au bout de ces 12 mois serait très superficiel. On rappelle que les minéraux les plus affectés sont les plagioclases (phase à coloris clairs). Viennent ensuite les phénocristaux d'orthoses pour la syénite et les porphyroclastes d'orthoses pour le granite. Le fer provient des réseaux cristallins des ferromagnésiens.

Les phénocristaux, les porphyroclastes et les plagioclases seraient donc plus *sensibles* aux actions de l'altération physique qui est à l'origine de la microfissuration de ces cristaux tandis que les ferromagnésiens seraient plus sensibles à l'altération chimique sous l'action de *l'eau de pluie* utilisée au cours des essais expérimentaux. La libération du fer sous sa forme Fe^{2+} et sa précipitation sous la forme $Fe_2\ O_3$ dans les microfissurations et les couloirs de dislocation est commandées par les cycles Marche/Arrêt de la lampe halogène et de la pompe à eau.

Une telle évolution des échantillons s'apparentant au processus typique de l'altération météorique en climat tropical humide, le système, prenant en compte, à la fois, le dispositif expérimental conçu et, l'analyse colorimétrique d'images numérisées, s'est donc avéré comme une méthode pertinente pour piloter des investigations portant sur le *vieillissement* des roches ornementales d'origine magmatique, aux fins de leur utilisation sous la forme de matériaux de protection.

L'analyse colorimétrique des « images différences » de chacune des phases minéralogiques permet par ailleurs de relever que la progression du « Rouge » est plus accentuée au niveau de la syénite (129,3 pour les phénocristaux, et 129,8 pour les plagioclases) que de celui du granite (128,3 pour les porphyroclastes et 129,1 pour les minéraux blancs). Ce qui permet de déduire que les phénocristaux et les

plagioclases de la syénite sont plus affectés par la microfissuration que les porphyroclastes et les plagioclases du granite.

Une telle déduction oriente certainement le mode d'utilisation de ces matériaux : la syénite pourrait être utilisée exclusivement pour des travaux de revêtement intérieur comme c'est le cas actuellement au niveau de l'immeuble ALPHA 2000 et du Centre de Commerce International d'Abidjan, tandis que le granite pourrait être exploité à la fois pour des revêtements intérieurs et extérieurs.

Ce qui conduit, à ce stade de notre étude, à émettre l'hypothèse que la syénite d'Okrouyo et le granite de Yakala réagissent plutôt bien à l'altération météorique et que leur comportement ne constitue pas une entrave aux perspectives de mise en exploitations de ces gisements. A la suite de 12 mois d'essais d'altération accélérée, on n'observe pas, par exemple, des taches qui auraient suggéré la présence de pyrite.

On suggère cependant, pour tenir compte des conclusions des travaux de Suzuki et *al* [1995], la nécessité de prolonger les investigations sur des durées plus longues de 5 ans voire plus, maintenant que l'on dispose, pour conduire les observations relatives au *vieillissement* des roches ornementales d'origine magmatique en climat tropical humide, d'un outil qui est certes perfectible.

En effet, au terme de cette étude, il importe de relever que malgré sa simplicité, la gestion et le fonctionnement de ce dispositif expérimental imposent des contraintes. On note entre autre, que pour respecter le chronogramme des travaux, il faut une présence obligatoire quotidienne au laboratoire pour mettre en marche et arrêter successivement la lampe halogène et la pompe à eau.

Au chapitre 3, pour palier à cette difficulté, on a suggéré qu'on puisse envisager d'installer un système de minuterie entre la pompe à eau, la lampe halogène, et chacun son secteur d'électricité.

Quant aux problèmes liés à sa gestion, on signalera le fait que tout le long des essais, qu'il a fallu au total changer l'ampoule de la lampe halogène chaque deux semaines.

On peut envisager, pour réduire cette fréquence, intervenir sur la durée de fonctionnement de la lampe halogène. Ce qui conduirait à engager d'autres pistes de réflexion, notamment pour un modèle des facteurs climatiques qui examinerait des durées d'intempéries plus courtes sans toutefois s'écarter de l'objectif principal qui est la génération du climat tropical humide au laboratoire.

Bibliographies

Anon (1995): The description and classification of weathered rock for engineering purposes. Geological Society, Engineering Group Working Party. Quarterly journal of Engineering Geology 28. Pages 207-242.

Ansted D (1871): On some phenomena of weathering of rocks, illustrating the nature and extent of subaerial denudation. Transaction of the Cambridge Philosophical Society. Vol 11. Pages 387-395.

Arnould M (1975): Altération. Support de Cours ENPC de géologie de l'Ingénieur. Pages 199-210.

Arnould M (1961): Etude géologique des migmatites et des granites précambriens du Nord-Est de la Côte d'Ivoire et de la Haute-Volta méridionale. Bulletin de la Direction de la Géologie et de la Prospection Minière n°1 Abidjan. 175 Pagesµ.

ASECNA (1979): Le climat de la Côte d'Ivoire. Ed du service météorologique d'Abidjan. 81 pages

Assemien P, Filleron J, Martin L, Tastet J-P (1970) : LE Quaternaire de la zone littorale de la Côte d'Ivoire. Bulletin Ass. Séné. Etude Quaternaire n°25. W Africa. Dakar. Pages 65-78.

Ballivy G, Daoud M, Saley K (1992): Comportement physico-mécanique des roches sous l'effet de l'humidité relative ambiante. Colloque René Houpert, Pages 247-255.

Bard J-P (1990) : Microtextures des roches magmatiques et métamorphiques. Masson, 2ème édition. 202 pages.

Baronnet A, (1988) : Minéralogie. Collection Géosciences, Dunod. 184 pages.

Bell F. G. (1992) : Engineering in Rock Masses. Butterworth Heinman, Oxford.

Berthoumieux G, Tagini B, Gobert M (1972) : Carte géologique au 1/4 000 000 è de la Côte d'Ivoire. SODEMI.

Bondy J-P (2002) : Redécouvrir les vertus de la pierre. CSTB Magazine n°139. Pages 7-9

Bouchez J L, Delas C, Gleizes G, Nédélec A (1992) : submagmatic microfractures in granites. Geology 20. Pages 35-38.

Brown C (1924): On some effect of wind and sun in the desert of Tumbez, Peru. Geological Magazine. Vol 61. Pages 337-339.

Burdine N (1963) : Rock failures under dynamic loading conditions. Society of petroleum Engineers Journal. Vol 3. Pages 1-8.

Carlier M (1972) : Hydraulique générale et appliquée. Collection du Centre de Recherches et d'Essais du Chatou. Edition Eyrolles. 565 pages.

Carreón–Freyre D C (1995): Influence des discontinuités dans les carrières de roches ornementales sur les méthodes d'exploitation et la récupération du gisement. Thèse de Doctorat. ENSMP. 224 pages.

Casting C, Rabu D (1993): Méthodologie pour la recherche des roches exploitables : exemple des granits armoricains. Mines et Carrières : Les Techniques n° II-III/93. vol. 75. Pages 35-37.

Casanova R (1973) : Géochimie et minéralogie des granitoïdes de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat ès-sciences. Université de Nice, Laboratoire de Pétrologie-Minéralogie. 327 pages.

Cauvin A, Guerrée H (1978) : Eléments d'hydraulique 9ème édition. Edition Eyrolles 256 pages.

Chatelin Y. (1974) : L'altération. Les sols ferrallitiques. Tome III. Office de la Recherche Scientifiques et techniques Outre-Mer. 144 pages.

Chéné G, Bastian G (2000): L'eau, facteur d'altération du tuffeau. 7th International IAEG Congress. Pages 4461-4467.

Dekayir A, El Maâtaoui M (2000): Contribution of image analysis to the study of weathering process in alkaline basalt. Engineering Geology 56. Pages 325-334.

Delvigne J. (1965) : Pédogenèse en zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique. Office de la Recherche Scientifiques et techniques Outre-Mer. 177 pages.

Domone P (1994) : Concrete. *In*: ***Illston J*** (editor): Construction Materials . Their Nature and Behaviour (2nd Ed.). Part 3. Spon, London. Pages 87-96.

Dordet Y. (1990) : La colorimétrie, principe et applications. Editions Eyrolles. Paris. Pages

Doumbia S (1998) : Géochimie, géochronologie et géologie structurale des formations birimiennes de Katiola-Marabadiassa (Centre-Nord de la Côte d'Ivoire). Evolution magmatique et contexte géodynamique du Paléoprotérozoïque. BRGM n°276. 253 pages.

Duclos F (1999) : Gestion des couleurs dans le cadre des chaînes de traitement d'images numériques. Conseil Supérieur Technique de l'image et du son (CST). Dossiers techniques n°18 (CST.fr).

Fookes P. G, Dearman W. R, Franklin J. A. (1971): Somme engineering aspects of rock weathering with field examples from Dartmoor and elsewhere. Quarterly Journal of Engineering Geology. Vol. 4. Pages 139-185.

Foucault A, Raoult J-F (2000) : Dictionnaire de géologie 5è édition. Masson, Dunod, Paris. 380 pages.

Frederickson A. F. (1951) : Mechanism of weathering. Bull. Geol. Soc. Am. Vol 62. Pages 221-232.

Englman R, Gur Y, Jaegger Z. (1983) : Fluid flow through a crack network in rocks. J. Appl. Mech., 50 Pages 707-711.

Epema G F, Riezebos H Th, Utrech (1983): Fall velocity of water drops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain. Jan de Ploey Ed. Pages 1-16.

Eggleton R.A. (1986): The relation between Crystal Structure & Silicates Weathering Rates. *In: Rates of Chemical Weathering of Rocks & Minerals*. Elsevier Science & Technology Books. 603 pages.

Fieldes M, Swindales L.D. (1954): Chemical weathering of silicates in soil formation. J. Sc. Tech. New Zealand. Vol. 56. Pages 140-154.

Garrels R. M, Howard P. (1959): Reaction of feldspar and mica with water at low temperature and pressure. Clays and Clay Miner. Vol. 6. Pages 68-88.

Gevers T., Smeulders A. W. M. (1999): Color-based object recognition. The journal of Pattern Recognition Society. Pages 453-464.

Goldich S. S. (1938): A study of rock weathering. Journal of Geology, vol46 Pages 17-58.

Goldschmidt, V. M. (1937): The principles of the distribution of chemical elements in minerals and rocks. J. Chim. Soc. London. Pages 655-672.

Goudie A (1985) : Salt Weathering. Research paper 33. School of Geography. University of Oxford.

Haimson B (1974): Mechanical behaviour of rock under cyclic loading. *In:* Proceedings of the 3rd Congress of the International Association for Rock Mechanics,. Vol 2. Denver National Academy Science, Washington. Pages 373-378.

Hasley D (1996): The Weathering of Sandstone, with particular reference to buildings in the west Midlands. UK. Ph D Thesis. University of Wolverhampton.

Hasley D P, Mitchell D J, Dews S J (1998): Influence of climatically induced cycles in physical weathering. Quarterly Journal of Engineering Geology 31. Pages 359-367.

Hockman A, Kessler D (1950) : thermal and moisture expansion studies of some domestic granites. U. S. Department of Commerce National Bureau of Standards. RP 2087. Vol 44. Pages 395-410.

Hubermont M (1993): Câbles et disques diamantés. Mines et Carrières : Les Techniques n° II-III/93. Vol. 75. Pages 112-117.

Irfan T. Y, Dearman W. R. (1978) : The engineering petrography of a weathering granite in Cornwall, England. Q. J. Eng. Geol, Vol. 11. Pages 233-244.

Jenny H (1950): in origin of soils. Applied sedimentations. Ed. P.D. Trask. Wiley, New-York. Pages 41-61.

Johnson W, Parsons W (1944): Thermal expansion of concrete aggregate materials. Journal of research NBS. Vol 32. 101 pages.

Kouamelan A N (1996) : Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition Archéen-Protérozoïque. Mémoires de Géosciences Rennes 73. 270 pages.

Kowaliski P. (1978) : Vision et mesure de la couleur. Editions Masson. Pages

Leneuf N. (1959) : L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. Office de la Recherche Scientifiques et techniques Outre-Mer. 210 pages.

Liou J G, Kuniyoshi S, Ito K (1974): Experimental studies of the phase relations between green schist and amphibolites in a basaltic system. Am Journal Science n°274. Pages 762-770.

Loughnan F C (1969): Chemical weathering of the silicate minerals. Am Mineralogist. P 5-25.

Madon H (1969) : Fichier des roches de carrières et de pierres ornementales de Côte d'Ivoire. Rapport n°241. Edition du la SODEMI. 40 pages.

Martin-Bouyer M (2002) : Mesure de la couleur, calibrage des périphériques d'ordinateur : de la prise de vue numérique à l'impression. In Photonique n°5. Pages 41-43.

Mc Connell D. (1951) : Mechanism of weathering. Bull. Geol. Soc. Am. Vol 62. 700 pages.

McGreevy J (1981) : Some perspectives on frost shattering. Progress in Physical Geography. Vol 5. Pages 56-76.

McGreevy J (1985) : Thermal properties as controls on rock surface temperature maxima, and possible implications for rock weathering. Earth Surface Process and Landforms. Vol. 10. Pages 125-136.

Meffre W, Dupont J-F (1998): Sensitométrie et traitement numérique. Conseil Supérieur Technique de l'image et du son (CST). Dossiers techniques n°7 (CST.fr).

Moye D. G. (1955): Engineering geology for the Snow Mountain scheme. Journal of Institution of Engineers. Australia, Vol. 27.Pages 287-298.

Nicholson S. E. (1993): An overview of African rainfall fluctuation of last decade. J. Climl. n°6. Pages 1463-1466.

Odent B (1993): Les ressources de la France en pierres dimensionnelles. Mines et Carrières : Les Techniques n° II-III/93. Vol. 75. Pages 30-34.

Ortega-Calvo J, Hernandez-Marine M, Saiz-Jiminez C (1992) : Experimental strategies for investigating algal deterioration of Stone. *In:* **Rodriguez J, Henriques F; Jeremias F** (Eds) *7th Inter. Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Lisbon, Portugal, 15-18 June 1992*. Pages 541-550.

Ouatarra G (1998): Structure du batholite de Ferkessédougou (secteur de Zuénoula, Côte d'Ivoire). Implication sur l'interprétation de la géodynamique de Paléoprotérozoïque d'Afrique de l'Ouest à 2,1 Ga. Thèse de Doctorat. Orléans-Géoscience- Mémoire 1998. 291 pages.

Papon A (1973) : Géologie et minéralisation du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Synthèse des travaux de l'opération SASCA 1962-1968. BRGM 80. 286 pages.

Pédro G. (1964) : Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. Thèse CNRS. 345 pages.

Pitts B, Hamilton M A, McFeters G A, Stewart P S, Wilse A, Zelver N (1998) : Color measurement as a means of quantifying surface biofouling. *Journal of microbiological Methods*. Vol. 34, Issue 2 1st November 1998. Pages 143-149.

Porokhovoï E (1995) : Stabilité à long terme des talus de mines à ciel ouvert dans les massifs de roches basiques et ultrabasiques. Thèse de Doctorat. ENPC. 225 pages

Reitan P. J. (1998): 3D visualization of color image histograms. Computer Network and ISDN Systems 30. Pages 2025-2035

Robinson P C (1984) : Connectivity, flow and transport in network models of fracture media. Ph. D. thesis, Oxford University. Oxford

Rozes B (1993) : Principales techniques d'extraction dans les carrière de roches ornementales . Ind. Minérale. Les Techniques 2-3/93. Vol.75. LA pierre en France. Supplément à mai. Pages 102-106.

Sacadura J-F (1980): Initiation aux transferts thermiques. Technique et documentation. 445 pages.

Simon P, Amakou B (1984) : La discordance Oligicène et les dépôts postérieurs à la discordance dans le bassin sédimentaire ivoirien. Bulletin Société Géol. Fr (7). 1, XXVI. n°6. Pages 117-125.

Sites Internet :

w w w. bioinformatics.org

w w w. CNRS.fr

w w w. colorsystème.com

w w w. CST.fr

w w w. GretagMacbeth.com

w w w. micrograph.com

w w w. photonique.com

w w w. photoshop.fr

SODEMI (1998) : Fiche projet n°7. Production de pierres ornementales d'Okrouyo et de Yakala. SODEMI

SODEXAM (2001): Compilation des bulletins trimestriels de données météorologiques. éd. SODEXAM, 62 pages.

Steiger M, Zeunert A (1996): Crystallisation properties of salt mixture: comparison of experimental results and model calculations. In: **Riederer J. (ed.):** Proceedings of *8th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, Berlin, Germany, September 30-October 4 1996.* Pages 535-544.

Shelley D (1993): Igneous and Metamorphic Rocks under the Microscope. Classification, Textures, Microtextures and preferred Orientations. Chapman & Hall (éd.) London. Pages 122-123.

Stevens R E, Carron M K (1948): Simple field test for distinguishing minerals by pH abrasion. Am Mineralogist. 33. Pages 31-49.

Struillou R (1969): Prévision de l'altérabilité des matériaux employés en Génie Civil. Bulletin de liaison des Laboratoires Routiers des Ponts et Chaussée 42. p 35-46.

Suzuki K, Oda M, Kuwahara T, Hirama K (1995): Materials property changes in granitic during long-term immersion in hot water. Engineering Geology 40. Pages 29-39.

Tagini B (1972) : Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essais de géotectonique régionale. Publication SODEMI 3-72. 302 pages.

Tastet J P(1997) : Les formations sédimentaires quaternaires du littoral du Togo et du Bénin. Bulletin INOUA, supplément au bulletin AFEQ 50. 175 pages.

Van der Laar J.G.M., David P.(1997): Determination of spore colour alteration by means of colour image analysis. Review of Paleobotany and Palynology 103. Pages 41-44.

Vovard J (1982) : La circulation des fluides et les pompes centrifuges. Réédition. Edition Jeumont-Schneider. 78 pages

Wark P, Smith B (1994) : Short-term rock temperature fluctuation under simulated hot desert conditions : Some preliminary data. *In:* **Robinson D, Williams R** (eds)**:** Rock weathering and Landform Evolution. Wiley, Chichester. Pages 57-70.

Wienhold P, Weschenfelder F, Winter J (1995): Colorimetric measurements of carbon erosion and deposition rates on extended areas of plasma facing component in TEXTOR. *Journal of nuclear Materials* . Vol 220-222. April 1995. Pages 452-456

Yatsu E (1988): The nature of Rock weathering. Sozosha.Tokyo.

Young R, Young A (1992): Sandstone Landforms. Springer. Berlin.

Annexes

I. La mesure des couleurs

La couleur résulte avant tout de l'interaction entre la matière et une source d'énergie, le plus souvent électromagnétique. Les conclusions des Journées scientifiques « couleurs et matériaux », organisées les 4 et 5 Décembre 2000 à Nantes (France) par le Centre National de Recherche Scientifique (CNRS) de la France et, illustrées par la figure n°80, permettent déjà de caractériser le processus dynamique de la vision colorée

Figure 80: exemple vérifiant la relation couleur égale interaction lumière / matière
source :Micrograf [2000]

Remarques :

Seuls deux objets sont colorés, la Terre et la Lune, bien que les radiations lumineuses remplissent l'espace photographié. Ces radiations rencontrant de la matière (eau, air, roches, etc.) inter réagissent ; ce qui donne les couleurs vives de la Terre. Dans le vide, donc en l'absence de matière, on ne voit rien ; de même, en l'absence de radiations qui ne peuvent l'atteindre, la moitié inférieure de la Terre est également noire.

1. La perception de la couleur

Depuis Newton, l'on sait que la couleur est la conséquence d'une diffraction de la lumière blanche solaire *(fig. n°81)*. La lumière solaire est, en effet, constituée de la superposition d'une infinité d'ondes monochromatiques de différentes longueurs d'onde. Quand la longueur d'onde est comprise entre 380 et 780 nm *(fig. n°82)*, l'œil *(fig. n°83)* perçoit une couleur caractéristique de celle-ci.

La couleur se traduit donc comme une sensation créée au niveau du cerveau, à partir de stimuli détectés sous une lumière particulière. Deux principaux organes dans l'œil de l'observateur rendent possible l'existence de ces stimuli : les bâtonnets et les cônes.

Les bâtonnets sont responsables de la perception achromatique des lumières atténuées. Ils sont formés d'une pigmentation, la rhodopsine, sensible à tout le spectre. Ils sont dans la périphérie de la rétine et, donnent une perception de plus faible résolution.

Les cônes sont responsables de la vision chromatique. Ils sont concentrés dans une zone appelée la fovéa. Il y a trois sortes de cônes distingués par leur sensibilité spectrale *(fig. n°s83 et 84)*. Cette sensibilité spectrale est à la base de la théorie de la nature trichromatique (Rouge, Vert et Bleu) de la sensation colorée.

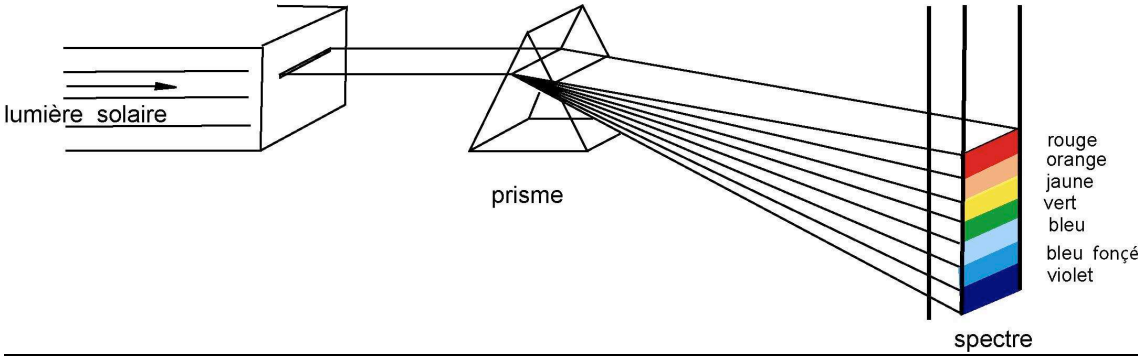


Figure 81 : représentation schématique de l'expérience de Newton, relative à la diffraction de la lumière blanche par un prisme
source : PHOTOSHOP [2003]

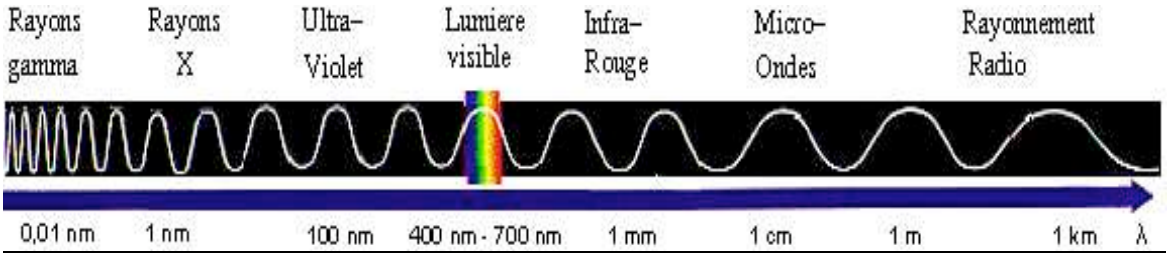


Figure 82: représentation schématique du spectre visible du rayonnement électromagnétique
source : bioinformatics.org

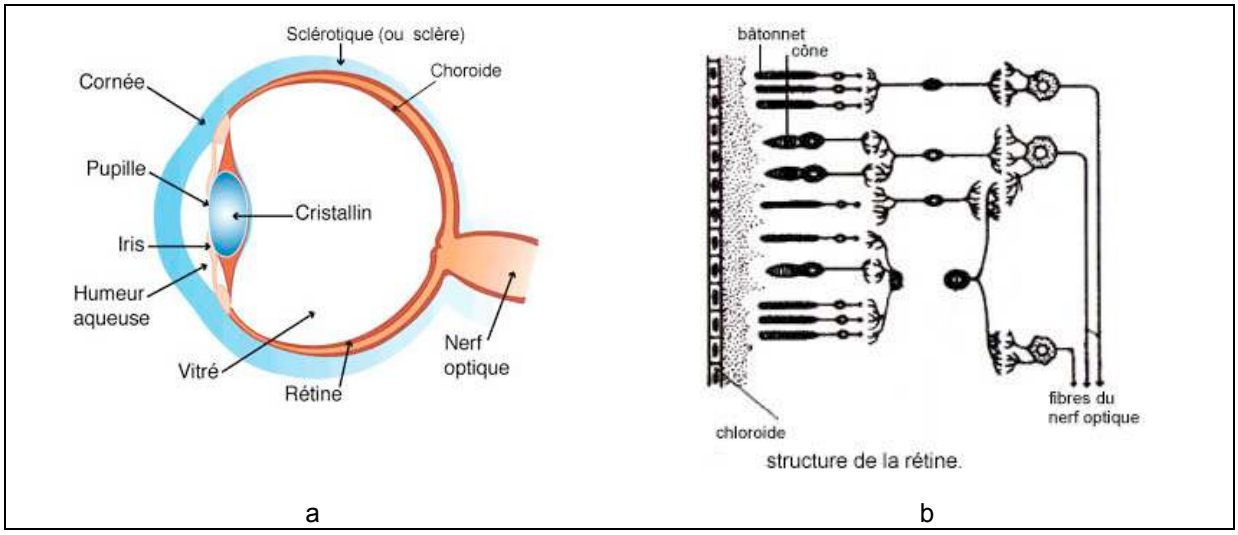


Figure 83: schéma de l'organe humain de la perception visuelle
Source : PHOTOSHOP [2003]

a. coupe schématique de l'œil humain. **b.** une vue des cônes et des bâtonnets

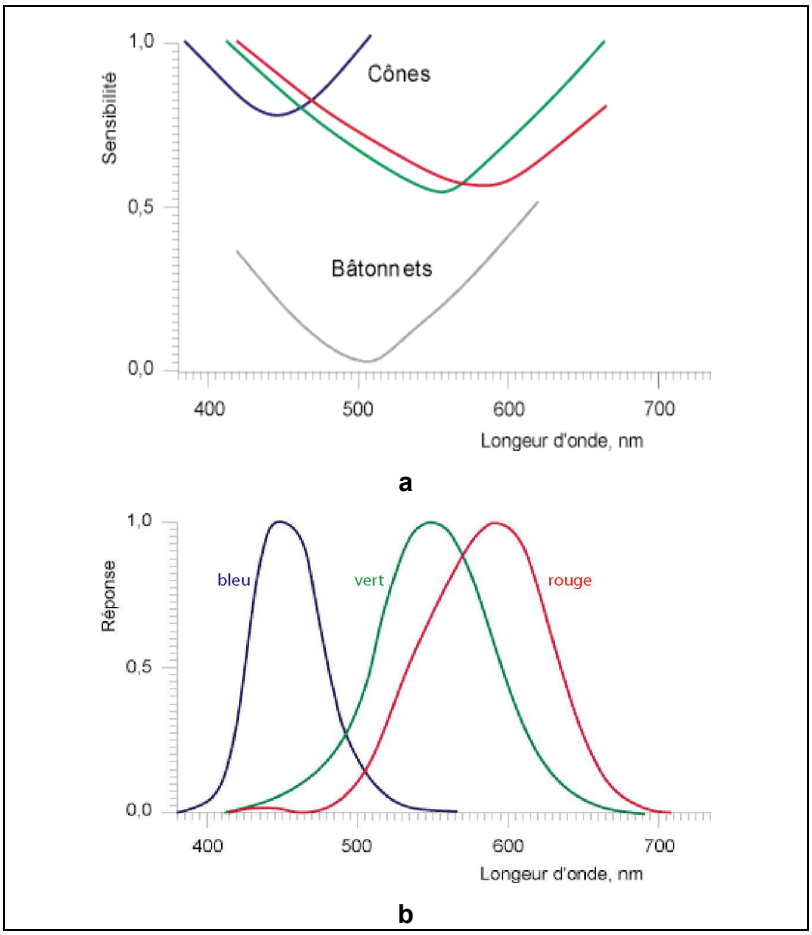


Figure 84: courbe de sensibilité de l'organe visuel aux spectres lumineux
source : Commission Supérieure Technique de l'Image et du Son (CST).
Dossiers techniques n°7 [1998]

2. Les paramètres d'une couleur

La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) est une organisation scientifique de normalisation. Elle est indépendante et est dédiée à l'étude de la lumière et de l'éclairage. Elle fait autorité dans le domaine des études de la couleur.

Même si elles n'ont pas d'existence en elles-mêmes, les couleurs répondent toujours à des caractéristiques :

2.1. La luminosité

La luminosité fait référence à la quantité de lumière qui est absorbée ou réfléchie par la zone colorée. Elle fait donc appel à la sensibilité de la vision humaine aux intensités lumineuses *(fig. n°84).* Cette sensation de perception est très difficile à quantifier.

La CIE définit la luminosité comme une quantité de luminance qui correspond au quotient de l'intensité lumineuse (en candelas) d'une surface par l'aire apparente de cette surface (en mètre carré) pour un observateur lointain. Ce qui permet d'apprécier l'éclat d'un objet.

Dans la pratique, la luminosité est souvent normalisée à 1 ou 100 unités, en fonction de la luminance du blanc de référence. Ainsi, un appareil d'acquisition d'images ayant un blanc de référence dont la luminance Y_n est de 80 candelas/ m^2, on posera Y_n= 1 pour se référer à cette valeur.

La luminosité maximale, pour un observateur standard, se ressentira pour une lumière de longueur d'onde de 555 nm *(fig. n°85)*.

La vision humaine a une perception non linéaire de la luminosité. Une source qui a une luminance de 18% par rapport à son blanc de référence apparaît à « moitié » brillante. La perception de la luminosité peut être appelée *éclat* de la couleur. Il est noté L et est défini par la CIE comme étant la racine cubique modifiée de la luminance :

$$L = 116 \times \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 \qquad \ldots[27]$$

Avec Y : la luminance mesurée.

La perception de la luminosité est grossièrement logarithmique. Ainsi, un observateur peut détecter une différence d'intensité lumineuse entre deux taches de couleur si celle-ci diffère d'au moins 1%. L'image de la figure n°86 rend compte de la variation d'intensité sur une couleur.

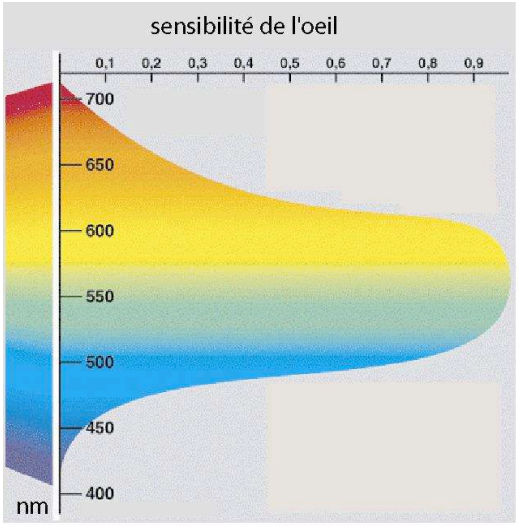


Figure 85: sensibilité de l'œil humain aux radiations

source : Kowaliski [1978]

<u>Remarques</u>

Les radiations _=555 nm correspondent aux colorations jaunes. Après le jaune, l'œil humain est plus sensible aux couleurs vertes.

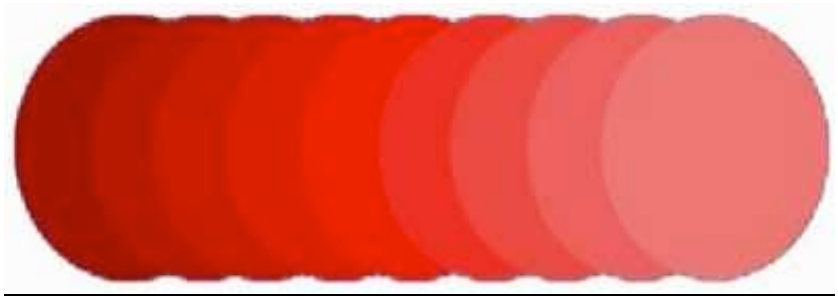


Figure 86: influence de la variation de l'intensité lumineuse sur une couleur

source : Duclos [1999]. CST : Dossiers techniques n°18

2.2. La teinte

La CIE définit la teinte comme étant la capacité de la vision humaine d'associer une zone de couleur à une autre, définie comme étant de couleur *rouge*, *verte* ou *bleue* ou, d'une combinaison de deux de ces couleurs.

Si la longueur d'onde de la lumière éclairant cette zone colorée varie, alors la teinte de la zone varie.

2.3. La saturation

Selon la CIE, la saturation d'une couleur est l'intensité de celle-ci par rapport à sa luminosité. Si la couleur est peu saturée, on obtient une *teinte grise* ; ensuite celle-ci devient *pastel* puis, très colorée au fur et à mesure que la saturation de la couleur augmente.

Plus une densité spectrale est concentrée sur une longueur d'onde, plus la couleur associée sera saturée. On peut *désatur*er une couleur en ajoutant à celle-ci, une lumière qui contient des radiations lumineuses qui comportent toutes les longueurs d'ondes.

3. Approche systémique de la couleur

La perception en couleur des objets est avant tout une sensation physiologique subjective, impérativement liée à la nature de l'objet (type de radiation absorbée), à la nature de la lumière qui éclaire cet objet et, permet à l'œil d'en recevoir le message ainsi qu'aux propriétés de l'œil qui perçoit le message et le transmet au cerveau.

Ces conditions physiques et personnelles entraînent des distorsions importantes *(fig. n°87)* dans l'estimation visuelle de la couleur : deux observateurs n'ont pas exactement la perception de la même couleur.

Depuis Aristote, la nomination des tons des couleurs à l'aide d'une classification systématique a fait l'objet d'élaboration de plusieurs principes (plus de 70) qui ne peuvent que rendre très imparfaitement compte de la perception colorée.

L'ensemble des transformations subies par le signal de départ qui entre dans l'œil étant si complexe. Pour une approche plus rigoureuse, les plus usités de ces trois, pour qualifier et/ou quantifier la couleur, sont ceux de Munsell [1905] et de la CIE [1931]. A partir de 1931, la plupart des travaux scientifiques de normalisation, dans le domaine de la mesure des couleurs, ayant été menés par cet organisme

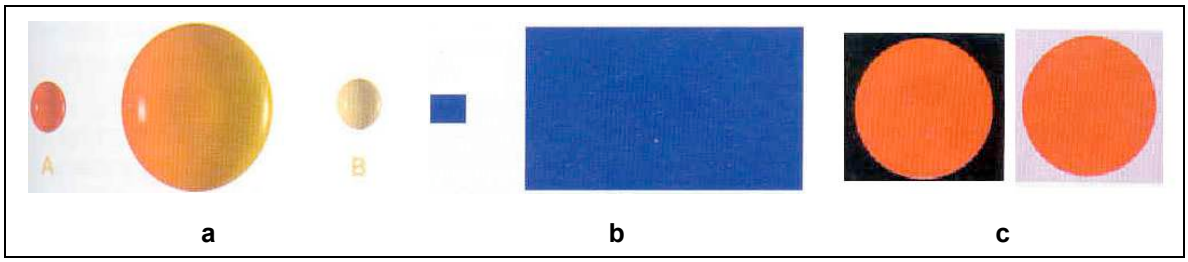


Figure 87 : exemple de distorsions induites par les conditions de visualisation
source : Martin-Bouyer. Photoniques n°5 [2002]

a. Incidence de la nature de source d'éclairement d'une sphère : à droite, éclairage naturel ; à gauche, source artificielle. **b.** Incidence de la taille de l'échantillon sur le rendu des couleurs : les grandes surfaces paraissant plus vives et plus agressives. **c.** Incidence du fond sur l'apparence de la couleur : le fond coloré paraît plus terne sur un fond clair et plus lumineux sur un fond sombre

3.1. Le nuancier de couleurs de Munsell

Que ce soit en Géologie, en Astronomie et en Pédologie, le Code Munsell, du nom du peintre américain Albert Henry MUNSELL [1905], édité en 1929 a partir du « The Atlas of the Munsell Color System [1915] » révisé en 1943 par la Société Américaine d'Optique, sert encore à la caractérisation visuelle de la couleur des roches, des sols, des découvertes archéologiques, etc. .

Le Code Munsell est fondé sur l'égalité de distanciation correspondant à la sensation. Munsell y propose une classification *développée naturellement* et ordonnée autour d'une série verticale de gris, que l'on appelle aussi « arbre chromatique » *(fig. n°88)* en raison de l'irrégularité de ses ramifications extérieures.

Munsell a élaboré son système à partir d'un cercle, divisé en dix parties *(fig. n°89),* dont les couleurs sont ordonnées à intervalles réguliers et, choisis de façon à ce que les couples diamétralement opposés s'annulent dans l'incolore, selon le principe de la compensation.

Le cercle chromatique différencie au total quarante teintes qui sont déterminées de la façon suivante : les cinq intervalles de couleurs originels sont divisés en dix, puis en vingt, puis en quarante, de façon à ce que l'intervalle visuellement perceptible soit toujours ressenti comme égal.

Les tons des plaquettes qui composent l'arbre chromatique sont déterminés par les variables que sont la luminosité, la teinte et la saturation. L'échelle verticale des valeurs partage l'espace compris entre le noir et le blanc en dix degrés étalonnés grâce à un photomètre.

Les degrés sont établis en fonction d'une échelle dans laquelle la racine carrée des intensités réfléchies change selon des intervalles réguliers.

L'échelle des valeurs ainsi déterminée, Munsell choisit des échantillons de rouge (r), de jaune (y), de vert (g), de bleu (b), de pourpre (p) qui lui paraissent également distants entre eux et, par rapport au gris.

Il en fait les couleurs fondamentales de l'arbre, en leur adjoignant cinq mélanges : jaune-rouge (yr), vert-jaune (gy), bleu-vert (bg), pourpre-bleu (pb).

Puis, il ordonne le tout en cercle autour du gris neutre (n). Ces dix couleurs principales reçoivent arbitrairement l'indice 5 de saturation *(chroma)*, l'échelle correspondante possédant une extrémité ouverte, pouvant atteindre les indices 12 et même 14, en fonction de l'intensité des couleurs employées.

Le vermillon atteint par exemple cet indice extrême, et le système Munsell le désigne par la notation abrégée 5R 5/14, alors que le rose, moins saturé, est noté 5R 5/4.

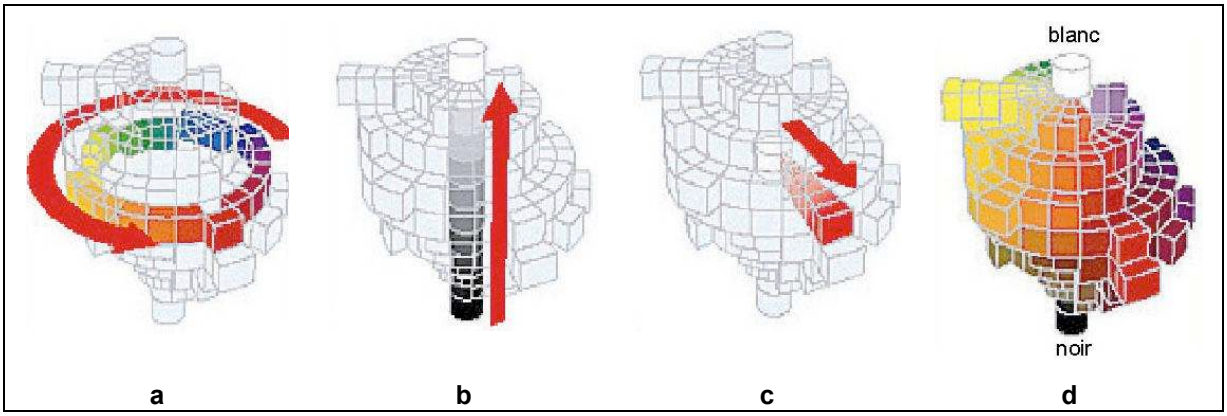


Figure 88: processus de construction de l'arbre de chromaticité de Munsell [1905]
source : Martin-Bouyer. Photoniques n°5 [2002]

a. teinte. **b.** luminosité. **c.** saturation **d.** arbre de chromaticité

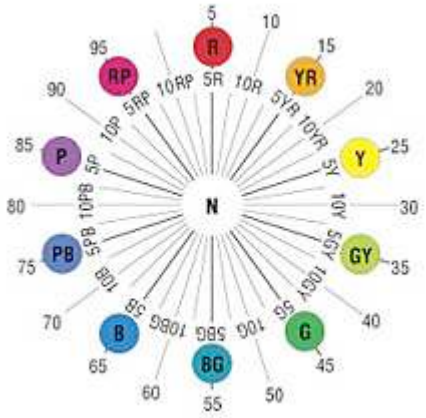


Figure 89: représentation schématique du cercle chromatique de Munsell
source : colorsystème .com.

3.2. Les systèmes colorimétriques

La colorimétrie est une science de mesure qui qualifie d'une manière rigoureuse la perception des couleurs. Elle est à la base de tous les systèmes de reproduction d'images existants tels que le film et la vidéo. Tout le développement de la colorimétrie est basé sur la possibilité, montrée par Maxwell [1860], qu'un observateur pourra retrouver la même « sensation colorée » si on superpose deux faisceaux lumineux :

- l'un, monochromatique (longueur d'onde et flux lumineux donnés) ;
- l'autre, composé dans des proportions précises des « primaires » rouge, vert, et bleu.

Il développait ainsi, la théorie *trichromatique* de la vision, énoncée par Young [1860] qui postule que le système de vision devait comporter trois sortes de récepteurs *(fig. n°84)*

3.2.1. Le cercle de chromaticité

En 1860, Maxwell a caractérisé le Rouge (_ = 700,0 nm), le Vert (_ = 546,1 nm) et le Bleu (_ = 435,8 nm) comme des couleurs primaires. Une couleur est dite primaire, si elle ne peut être obtenue par le mélange d'autres couleurs.

Toutes les couleurs du spectre peuvent donc être reconstituées par l'addition des trois couleurs primaires selon les différentes proportions et intensités. Cette voie de reconstitution des couleurs a conduit à énoncer « le principe de la synthèse additive » *(fig. n°90)*. On parle alors du système RVB pour Rouge, Vert, Bleu.

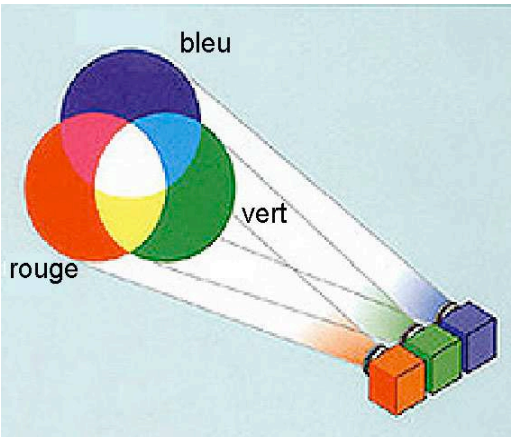


Figure 90: schématisation du principe de la synthèse additive
source Dordet [1990]

Lors de la reconstitution du spectre par ce procéder, le Blanc est obtenu lorsque le Rouge, le Vert et le Bleu sont additionnés en proportions égales. Le Noir résulte de leur absence totale. Les additions deux à deux donnent les couleurs suivantes :

- Vert + Bleu = Cyan ;
- Rouge + Bleu = Magenta,
- Rouge + Vert = Jaune.

Des expériences mettant en présence ces couleurs nouvelles et les *primaires* ont montré que le mélange Rouge / Cyan, Vert / Magenta, Bleu / Jaune, donne à chaque fois du Blanc. Ces couleurs sont dites « complémentaires ». Le principe qui s'en est dégagé est donc : « deux couleurs sont complémentaires si leur mélange donne du blanc–en théorie-, en fait du gris ».

Expérimentalement, les couleurs du spectre sont aussi obtenues en faisant traverser des filtres translucides de couleurs de pigment cyan, magenta, et jaune. C'est « le principe de la synthèse soustractive » *(fig. n°91).*

Ce procédé est dit soustractif, car la lumière transmise est moins intense que la lumière reçue. Les couleurs sont obtenues par les filtres qui tantôt, vont transmettre ou soustraire une couleur à une autre.

Les couleurs primaires ainsi que les couleurs obtenues par le mélange se ces couleurs permettent de construire le *cercle chromatique (fig. n°92)*.

Les trois primaires sont d'abord placées aux sommets du triangle équilatéral selon *la* figure n°92. Entre chacune de ces couleurs primaires on place les couleurs obtenues par mélange. En procédant de la sorte, l'on parvient à représenter toutes les couleurs du spectre.

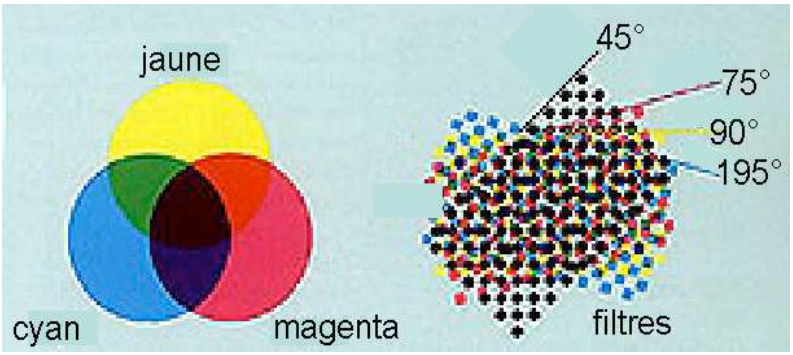


Figure 91: schéma du principe de la synthèse soustractive
source Dordet [1990]

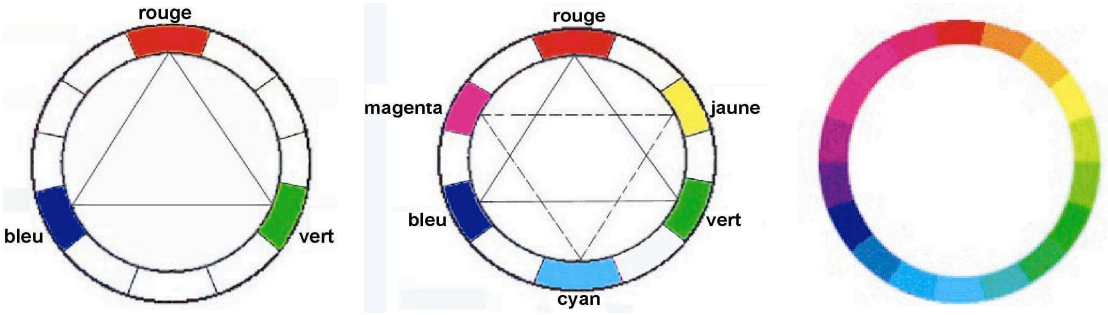
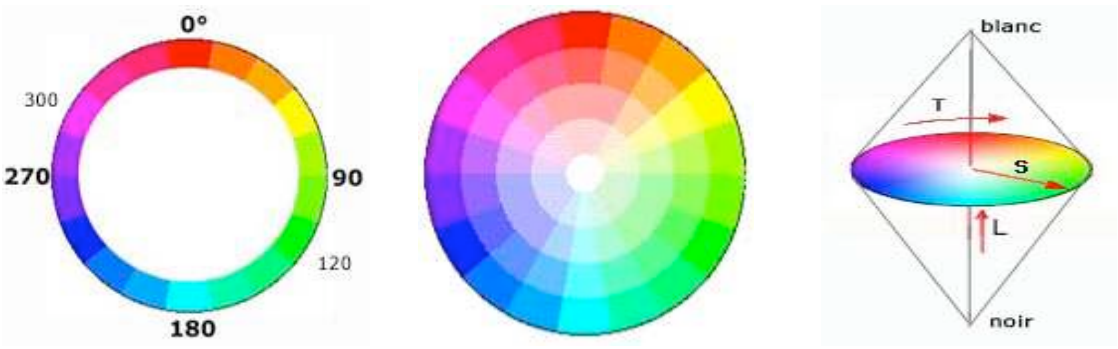


Figure 92: schéma de la procédure de construction du cercle chromatique
source ; PHOTOSHOP [2003]

A partir de ce cercle, l'on construit le *disque de chromaticité (fig. n°93).* C'est autour de ce disque qu'est conceptualisé le modèle Teinte, Saturation, Luminosité (TSL) de mesure de la couleur. Encore appelé « la représentation TSL des couleurs », ce modèle tient uniquement compte des trois paramètres auxquels l'œil est sensible.



a b c

Figure 93: schéma de la procédure de construction de la mesure TSL des couleurs

Source : PHOTOSHOP [2003]

Remarques :

Sur le pourtour de ce disque, sont représentées les couleurs saturées. En se rapprochant du centre, les couleurs sont de plus en plus délavées, plus elles perdent leur couleur, plus elles deviennent *achromatiques*, d'un gris plus ou moins foncé suivant la luminosité.

La luminosité est représentée sur la droite perpendiculaire au cercle qui passe par son centre. L'échelle est graduée de 0% qui représente le noir, à 100% qui représente le blanc. Entre le noir et le blanc, on trouve toute une échelle de niveau de gris.

3.2.2. Le diagramme de chromaticité de l'œil

Le diagramme de chromaticité est le résultat d'une synthèse des travaux expérimentaux de la CIE, et qui permet, à partir de 1931, d'interpréter numériquement et avec précision, les sensations colorées dans la vision humaine.

Le principe de ce diagramme est qu'une couleur C quelconque peut être décrite comme la combinaison linéaire des trois couleurs primaires, selon la relation :

$$C = r \times R + v \times V + b \times B \qquad \text{…[28]}$$

Les coefficients r, v, et b sont appelés les *composantes trichromatiques*. Chaque couleur est caractérisée par sa composante trichromatique. C'est la quantité, de chacune des primaires, nécessaire pour reproduire une couleur de longueur d'onde donnée. La figure n°94 indique les trois courbes f_r, f_v et f_b des composantes trichromatiques spectrales R, V, et B telles que normalisées par la CIE. Ces fonctions donnent les valeurs des coefficients r, v, et b. pour reproduire une couleur de longueur d'onde donnée.

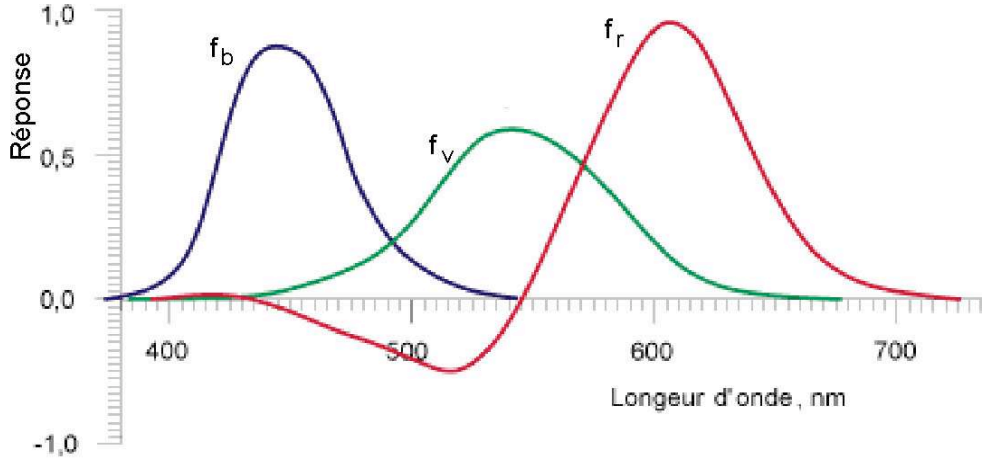


Figure 94: courbes des coefficients de distribution pour les primaires RVB
source : Photoniques n°2 [1999]

Ainsi, pour reproduire la couleur correspondant par exemple à la longueur d'onde 580 nm, on a sensiblement :

$$C_{580} = 0{,}24 \times R + 0{,}14 \times V + 0{,}0 \times B \qquad \ldots[29]$$

Les trois fonctions f_r (_), f_v (_), et f_b (_) sont alors appelées les fonctions colorimétriques. Cependant, ce système présente un inconvénient majeur. On remarque en effet qu'il n'est pas possible de reconstituer par synthèse additive une couleur correspondant à la longueur d'onde 500 nm par exemple. Car, dans ce cas, le coefficient de la couleur rouge est négatif :

$$C_{500} = -0{,}07 \times R + 0{,}08 \times V + 0{,}04 \times B \qquad \ldots[30]$$

Ce terme négatif signifie que l'égalité des couleurs des deux plages d'un colorimètre éclairé par une source de longueur d'inde 500 nm ne pourra être obtenue que si une source rouge supplémentaire est ajoutée du côté de la source lumineuse étudiée.

$$C_{500} + 0{,}07 \times R = -0{,}07 \times R + 0{,}08 \times V + 0{,}04 \times B \qquad \ldots[31]$$

Pour remédier à cet inconvénient, la CIE a défini un autre repère : la base (X, Y, Z). Cette base permet de décrire toutes les couleurs perçues avec des coefficients positifs. On passe de la base (R, V, B) à la base (X, Y, Z) par l'opération linéaire :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}166 & 0{,}125 & 0{,}093 \\ 0{,}060 & 0{,}327 & 0{,}005 \\ 0{,}000 & 0{,}004 & 0{,}460 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ V \\ B \end{pmatrix} \qquad \ldots[32]$$

Les trois nouvelles fonctions colorimétriques f_x (_), f_y (_), et f_z (_) sont représentées par la figure n°94. Usuellement, on considère les grandeurs relatives :

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \qquad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \qquad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \qquad \ldots[33]$$

Elles sont appelées *coordonnées trichromatiques*. A l'évidence, $x + y + z = 1$.

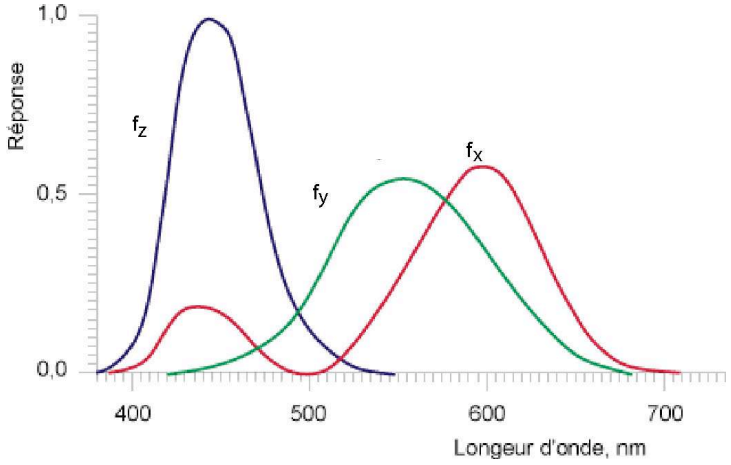


Figure 95: courbes des coefficients de distribution pour les primaires XYZ

source : Photoniques n°2 [1999]

Par conséquent, la connaissance de deux grandeurs par exemple (x, y) est suffisante puisque la troisième grandeur s'en déduit immédiatement. La représentation des couleurs dans le plan (x, y) est appelée *diagramme de chromaticité (fig. n°96)*.

Sur ce diagramme, la courbe en forme de fer à cheval s'appelle *spectrum locus*. Sur la courbe, se trouve l'ensemble des couleurs pures du spectre solaire. Les couleurs sont de moins en moins saturées au fur et à mesure qu'elles se rapprochent du blanc. Le choix de couleurs primaires (X, Y, Z) présente trois avantages par rapport à la base (R, V, B) :

- les composantes trichromatiques sont toujours positives,
- la composante Y correspond à la luminance de la source ;

l'illuminant de couleur blanche a, sensiblement, pour coordonnées trichromatiques (1/3, 1/3, 1/3).

Le diagramme de chromaticité introduit la notion d'espace couleur. Un espace couleur exprime la couleur d'un objet ou d'une source lumineuse au moyen de valeurs numériques, associées à des repères physiques. Les deux méthodes les plus connues sont les suivantes :

- *l'espace couleur Yxy*, qui se base sur les valeurs du tristimulus XYZ définies par la CIE. Il est beaucoup plus utilisé par les périphériques d'acquisition d'images.
- *l'espace couleur L a* b* (fig. n°97)* développé par la CIE en 1976. Très utilisé dans l'industrie du textile et de la peinture, c'est un système plus simple et plus uniforme. Dans ce modèle colorimétrique, une couleur est représentée par trois valeurs :

    - L : la luminance
    - a* et b* les deux gammes de couleurs :

- a* : gamme de couleurs vert au rouge
- b* : gamme de couleurs du bleu au jaune.

L'espace L a b** couvre l'ensemble du spectre visible par l'œil humain et est indépendant de toute technologie de reproduction des couleurs.

Il existe d'autres *espaces*. On rappelle la difficulté de tenir compte de tous les facteurs simultanément, d'autant plus qu'interviennent des facteurs humains.

On citera entre autre, *l'espace L* C* h* utilisant le même diagramme que *l'espace L a* b** et où, C indique la saturation et, h, l'angle de teinte exprimé en degré. Toutefois, à partir de ces espaces, on ne peut toujours pas fixer des tolérances uniques _x et _y, pour une chaîne de reproduction colorimétrique.

En effet, les études de Mac Adam [1981] ont montré que des différences de couleurs perçues comme constantes étaient en fait représentées par des ellipses de tailles très différentes selon la teinte considérée *(fig. n°98)*.

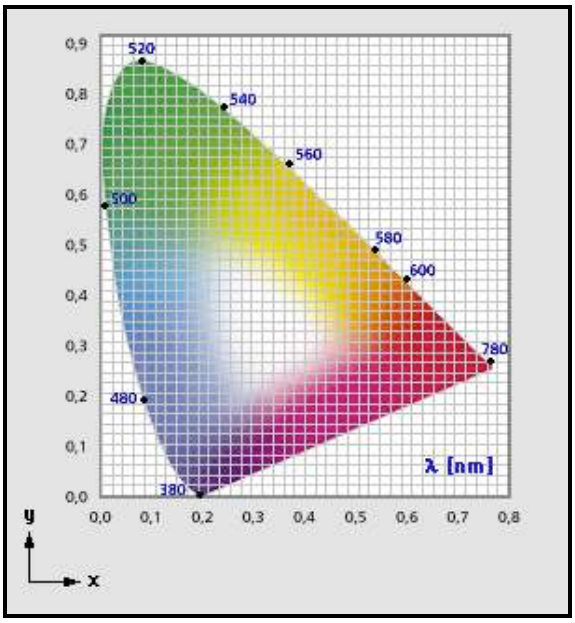


Figure 96: le diagramme de chromaticité
d'après : Dordet [1990]

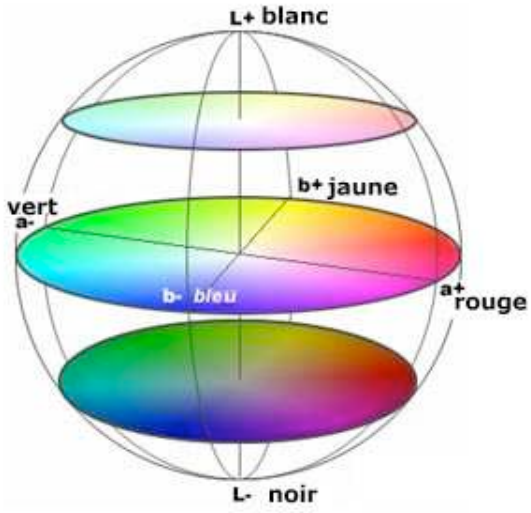


Figure 97: schéma de construction de l'espace couleur CIE L a b**
source : PHOTOSHOP [2003]

Remarques :

La luminance est exprimée en % : de 0% (noir) à 100% (blanc). **a** et **b** varient de –120 à + 120.
a = +120 pour le rouge et –120 pour le vert.
b = +120 pour le jaune et –120 pour le bleu

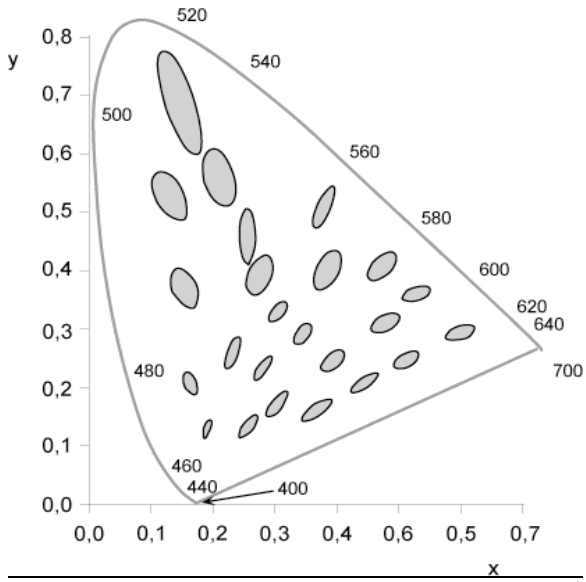


*Figure 98: les ellipses de Mac Adam grossies 10 X dans le diagramme **x, y***
source : CST, Dossier techniques n°8 [1998]

Remarques :

Chaque ellipse représente le domaine de variation en coordonnées **x** et **y** correspondant à une même variation perçue de la teinte

II. Les éléments déterminants du temps en Côte d'Ivoire

1. Déterminisme du temps en Afrique occidentale

Pour comprendre et expliquer le temps qu'il fait en Côte d'Ivoire, il est indispensable de se placer à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest et d'étudier le système synoptique de la succession des types de temps qui affectent cette vaste région.

1.1. Aperçu sur la circulation générale

Le mécanisme du défilement et de l'agencement des saisons au cours de l'année sur l'Afrique Occidentale est commandé, dans les basses couches de l'atmosphère, par une circulation des masses d'air *(fig. n°99)* autour des centres d'action suivants:

- les hautes pressions permanentes de l'Atlantique Nord ou Anticyclone des Açores axées, sensiblement sur le parallèle 30° N;
- les hautes pressions australes du Golfe de Guinée, ou Anticyclone de Sainte Hélène, axées sur le parallèle 30° S;
- une zone de basse pressions relatives séparant les deux anticyclones ci-dessus cités.

1.2. Le Front Intertropical (F.I.T.)

L'Afrique Occidentale dans son ensemble est soumise en permanence, toute l'année, à l'influence de deux flux principaux d'air de direction et de caractéristiques opposées:

- l'air continental, originaire des régions sahariennes, chaud et très sec, connu sous le nom d'*harmattan* ou alizé boréal, qui souffle du secteur Nord-Est;
- l'air océanique des régions équatoriales chargé d'humidité de secteur Sud-Ouest, appelé généralement *mousson* ou alizé austral, dévié lors de son passage de l'hémisphère sud à l'hémisphère Nord. La mousson souffle en général seulement dans une couche de 1500 à 3000mètres d'épaisseur.

Le lieu de convergence des deux flux d'air constitue une zone frontale appelée FRONT INTERTROPICAL. La trace au sol du F.I.T., dessinée assez facilement sur les cartes par analyse des températures des points de rosée, la direction du vent, la nébulosité et la répartition des nuages, se déplace au cours de l'année en restant approximativement dirigée le long des parallèles.

Elle suit le mouvement apparent du soleil avec un retard d'environ un mois par rapport aux solstices. Ses positions extrêmes sont atteintes aux mois de janvier (5°N) et août (20 à 25°N).

Le temps sur l'Afrique Occidentale en général, et sur la Côte d'Ivoire en particulier, sera régi par le déplacement vers le Nord ou vers le sud du système solidaire ainsi constitué par:

- l'Anticyclone des Açores;
- l'Anticyclone Sainte Hélène;
- le Front Intertropical.

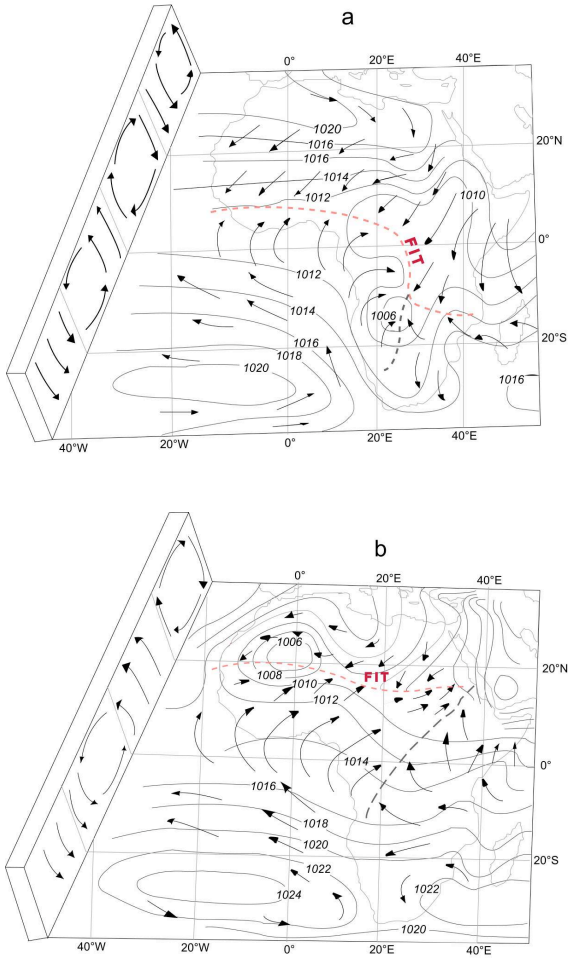


Figure 99: représentation schématique de la circulation générale des masses d'air en Afrique
d'après Nicholson [1993]
a. circulation au mois de janvier. **b.** circulation au mois de juillet / août

1.3. Distribution des phénomènes météorologiques liés au FIT

A la limite Nord de la mousson qui représente le F.I.T., l'air humide s'enfonce en coin sous l'air sec saharien. L'épaisseur de cet air humide est si faible qu'il ne se passe rien sur le F.I.T. lui-même. C'est nettement plus au sud (150 à 300km) que se dessine une bande zonale dans laquelle l'on observe, successivement du Nord au sud, d'abord des perturbations orageuses du genre des tornades, avec des rafales de vent assez marquées, qui défilent d'est vers l'ouest, puis de la pluie abondante et continue. Cette bande, d'une largeur de 1000 km en moyenne, marque la zone active liée à la trace au sol du F.I.T. qu'elle accompagne dans son déplacement au cours de l'année.

C'est ainsi que s'explique la succession des saisons sèches et pluvieuses selon les latitudes auxquelles on se réfère. Au sud du F.I.T. on distingue quatre zones climatiques *(fig. n°100)* parallèles à la trace au sol du F.I.T. et qui se déplacent avec elle:

a. **Zone A** : elle est située au Nord de la trace du F.I.T. au sol et, constitue le domaine de l'alizé boréal ou harmattan. Son passage sur une région correspond à la saison sèche. Elle est caractérisée par un ciel clair avec, très souvent, une visibilité trouble et réduite par brume de poussière. Cette zone s'étend jusqu'aux régions côtières au mois de janvier.

b. **Zone B** : elle se trouve immédiatement au sud de la trace au sol du F.I.T. et représente le coin avancé de la mousson dont l'épaisseur, très faible, ne permet qu'un développement limité de nuage. On y observe la nuit un ciel clair avec formation de brumes et brouillards se dissipant entre 7 heures et 9 heures. Il y règne un beau temps en général. C'est en pratique une transition entre la saison sèche et la saison des pluies.

c. **Zone C** : elle se situe au sud de la zone B. La couche d'air humide y est suffisamment épaisse et c'est le domaine des phénomènes orageux, des tornades et des pluies abondantes et diluviennes. Le passage de cette zone sur une région donnée correspond au temps de la saison des pluies. En climatologie propre à la Côte d'Ivoire, la remontée du F.I.T. amène d'abord des manifestations pluivio-orageuses en début de saison des pluies, suivies de pluies continues ensuite, puis des averses orageuses.

d. **Zone D** : cette zone correspond à la petite saison sèche. Elle intéresse surtout les régions côtières du Golfe de Guinée où elle vient interrompre temporairement la saison des pluies. Elle arrive généralement sur ces régions de la mi-juillet à la mi-septembre et donne les températures les plus basses de l'année. Elle est caractérisée par un temps très couvert et gris, avec des précipitations et des orages nettement plus rares.

2. Les facteurs déterminant le climat en Côte d'Ivoire

Par sa position géographique, en bordure du Golfe de Guinée, et par son étalement en latitude, entre 4° et 11° N, la Côte d'Ivoire présente un régime climatologique non uniforme, qui va du climat équatorial au climat tropical pré désertique.
Les facteurs déterminant son climat sont:

- le Front intertropical;
- le jet d'Est d'Afrique occidentale;
- le relief.

2.1. Le Front Intertropical

L'Afrique Occidentale dans son ensemble est soumise à l'influence de la variation des positions en latitude du F.I.T., lieu de convergence de la mousson et de l'harmattan comme défini au paragraphe II-.1.3 du présent annexe. Aussi, peut-on résumer succinctement les caractéristiques des deux masses d'air en présence selon le *tableau n°19*.

En Côte d'Ivoire, la zone littorale sera presque toujours au sud du F.I.T qui balaiera périodiquement les autres régions. Ainsi, la mousson pénètrera plus ou moins en latitude et en altitude sur le territoire.

Cette mousson contient d'énormes quantités de vapeur d'eau, qui se condensent et donnent les pluies abondantes, principalement lorsqu'elle atteint 1500 à 2000 m d'épaisseur.

Ce mécanisme détermine entièrement le régime saisonnier, lui-même essentiellement caractérisé par le régime pluviométrique.

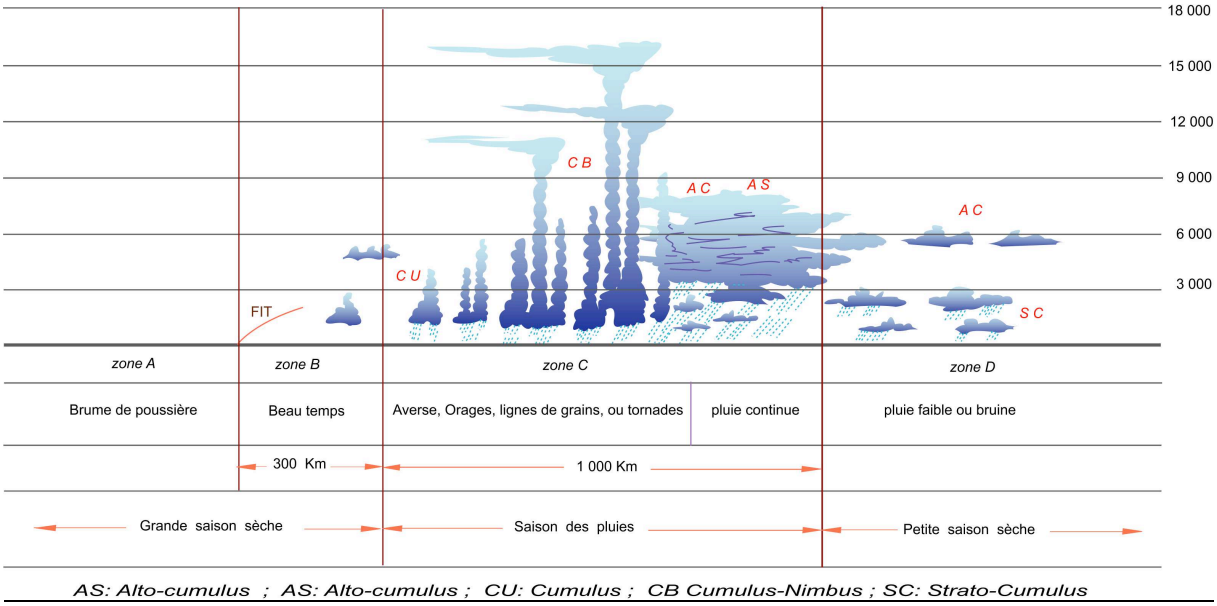


Figure 100: coupe méridienne du F.I.T. avec Zones et types de temps associés

d'après ASECNA, [1979]

Tableau 19: influence du F.I.T. sur les masses d'air.

Situation géographique	Caractéristiques des masses d'air
Au Nord du F.I.T dans l'air surchauffé et sec	Importante variation diurne de la T° (température). T° très basse du point de rosée Vent en surface dominant du secteur Nord-Est. Nuages cirriforme, peu ou pas de nuage au-dessous de 4000 m . Précipitations nulles
Au sud du F.I.T. dans l'air maritime humide	Amplitude diurne et T° peu accusée. T° très élevée (> 16°) du point de rosée Vent dominant du secteur Sud-Ouest. Nuages cumuliformes dont la nébulosité et le développement vertical croissent vers le Sud pour atteindre un maximum vers 500 à 800 km de la trace au sol du F.I.T. Précipitations fréquentes et abondantes.

d'après ASECNA, [1979]

2.2. Le Jet d'Est d'Afrique Occidentale

Un facteur, d'ordre météorologique, lié à la circulation générale de l'atmosphère, va intervenir et modifier le régime pluviométrique quant à la répartition et à l'intensité des précipitations. Il s'agit du courant d'Est qui circule sur l'ensemble de l'Afrique Occidentale dans les couches moyennes de l'atmosphère (approximativement entre 800 et 500 millibars).

Ce courant d'Est présente un noyau de vents forts, désigné par les météorologistes sous le nom de Jet d'Est d'Afrique Occidentale (J.E.A.O.). La valeur maximale moyenne de ce noyau de vents forts est de l'ordre de 14 m/s (≈ 60 km/h), ce qui ne lui donne pas à proprement parler la qualité de jet.

Cependant son importance est évidente lorsque l'on sait que les masses nuageuses à fort développement vertical se forment dans les couches moyennes de l'atmosphère.

En cours d'année le J.E.A.O. subit des variations en latitude et en longitude, ainsi que des modifications de vitesse. La migration du J.E.A.O. est comparable à celle de la trace au sol du F.I.T. avec quatre périodes:

- période de stagnation au Sud du littoral de décembre à février;
- période de remontée lente et traversé du Pays du Sud vers le Nord, de mars à juin;
- période de stagnation de juillet à septembre sur les pays du Sahel;
- période de retrait rapide et traversé de la Côte d'Ivoire du nord vers le Sud en octobre et en novembre.

Ainsi, on voit la première influence de ce mécanisme d'altitude sur le climat de la Côte d'Ivoire: pendant la migration du J.E.A.O. à travers le pays, principalement de mars à mai, mais également en octobre et en novembre, les phénomènes atmosphériques se déplaceront d'Est en Ouest.

Il pourra s'agir de phénomène isolé (orages ou tornades) ayant pris naissance sur les reliefs togolais ou ghanéens ou sur la Côte d'Ivoire elle-même, ou de phénomènes à plus grande échelle (ligne de grains, zone orageuse) ayant une origine plus lointaine (Afrique Centrale par exemple).

Les quantités de pluie seront très variables en fonction, d'une part de la vitesse de déplacement (liée à celle du J.E.A.O.), d'autre part, des reliefs rencontrés. Il a été établi une relation incontestable entre le J.E.A.O. et les quantités de précipitation. Tout renforcement du jet traduit une subsidence accrue et, a un effet négatif sur les précipitations.

Au contraire, son affaissement entraîne une augmentation de l'épaisseur de la mousson et favorise une activité pluivio-orageuses plus intense. En réalité, l'intensité du J.E.A.O. est liée aux centres d'action de l'Afrique et de l'Océan, et la variation de cette intensité n'est que l'effet d'une migration moindre ou amplifiée de ces centres d'action.

En définitive, c'est une conséquence de la modification de la circulation générale de l'atmosphère. Lors des années sèches; l'amplitude de la migration vers le Nord du J.E.A.O. est affaiblie, comme d'ailleurs celle de la trace au sol du F.I.T., et le fait que les poussées de mousson soient moins rigoureuses s'explique par la faiblesse de l'Anticyclone Sainte Hélène.

2.3. Le relief

Le relief intervient sur la quantité de précipitations, principalement par effet de *fœhn*. A ce niveau, il est nécessaire de considérer le relief de toute l'Afrique de l'Ouest pour expliquer les anomalies constatées dans la répartition des pluies.

2.3.1. La Dorsale guinéenne

Les massifs montagneux de l'Ouest de la Côte d'Ivoire constituent l'avancée orientale d'un vaste ensemble montagneux centré sur la Guinée et désigné par les géographes sous le nom de *dorsale guinéenne*.

Les points culminants sont alignés du Nord-Ouest au Sud-Est: Le Fouta Djalon (1515 m), les Monts de Loma (2100 m), et le Mont Nimba (1750 m) au point de convergence de la Côte d'Ivoire, de la Guinée et du Libéria.

Cette dorsale est pratiquement parallèle à la côte. Elle se prolonge en Côte d'Ivoire par le massif de Man aux sommets moins élevés (Mt Momi 1302 m, Mt Tonkoui 1293 m).

Un autre élément de la dorsale guinéenne apparaît dans la région d'Odienné, Boundiali, Korhogo avec des reliefs plus modestes (Mt Tyouri 913m).

Il est évident que ce vaste massif montagneux va s'opposer à la pénétration normale du flux de mousson sur le continent. Il y aura accumulation des masses nuageuses sur les régions au vent (plaines et plateaux de Guinée, de Sierra Léone, du Libéria et extrême Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) et, soulèvement des masses d'air sur les régions montagneuses, par conséquent de fortes précipitations.

Par contre, les régions situées sous le vent de la chaîne montagneuse seront nettement moins arrosées. C'est le cas de la région s'étendant au Nord du massif de Man et correspondant approximativement au pays Malinké.

2.3.2. La Chaîne togolaise et le plateau Ashanti

A l'Est de la Côte d'Ivoire existe une autre dorsale, orientée Nord-Sud et formée par les monts Atakora, la chaîne togolaise (points culminants 825m et 1036m) et le plateau ghanéen d'Ashanti (point culminant 786m).

Cette barrière naturelle, en s'opposant à la pénétration du flux de mousson, va provoquer un phénomène identique; et la région Sud-Est de la Côte d'Ivoire sera

particulièrement bien arrosée. C’est cela qui, explique la forte pluviosité de la basse Côte d'Ivoire entre l'agglomération abidjanaise et la frontière du Ghana.

2.3.3. Le relief de la Côte d'Ivoire et la chaîne Baoulé

A l'intérieur du Pays, à l'exclusion des massifs montagneux de l'Ouest, les lignes de collines et les buttes isolées influencent la pluviométrie locale. Elles peuvent provoquer des précipitations ou accentuer les phénomènes existants (orages ou grains circulant d'Est en Ouest).

On note que ces alignements de collines, orientés le plus souvent Sud-Sud-Ouest, Nord-Nord-Est, donc perpendiculairement à l'axe de déplacement des phénomènes, forment parfois de véritables chaînons.

Le plus important d'entre eux est la chaîne Baoulé s'étendant du Mt Niangbo (631 m) au Mt Hiré (501 m), immédiatement à l'Est de la ligne Bouaké-Oumé. C'est précisément à l'Est de cette ligne que l'on observe un minimum de précipitation centré sur Boli. Par régime de mousson, une atténuation des précipitations se produit du côté sous le vent de la chaîne Baoulé *(effet de fœhn)*.

Par contre, par phénomène pluivio-orageux circulant d'Est en Ouest, une recrudescence des précipitations sera possible après soulèvement sur la chaîne Baoulé.

3. Aperçu sur les zones climatiques de la Côte d'Ivoire

Des généralités précédentes, il ressort qu'il n'est pas possible de définir le climat de la Côte d'Ivoire à partir de régions géographiques bien découpées et présentant les mêmes caractéristiques climatiques.

Le mécanisme lié à la migration du F.I.T.,bien que régulier et périodique, présente toutefois des variations d'amplitudes qui génèrent une extrême variabilité de la pluviométrie annuelle. C'est donc, en définitive, à partir du régime pluviométrique qu'est défini le régime saisonnier.

L'examen des normales pluviométriques, depuis le début des années 1920, permet de distinguer trois zones climatiques *(fig. n°9)*:

- La zone climatique Sud, caractérisée par 4 saisons distinctes;
- La zone climatique Centre ou Zone de transition;
- La zone climatique Nord, caractérisée par 2 saisons distinctes

A l'intérieur de chaque zone, les stations météorologiques et les postes pluviométriques ont le même régime saisonnier et, d'une zone à l'autre, le passage se fait progressivement : il n'existe, en effet, pas de limite nette entre elles.

4. La zone climatique Sud de la Côte d'Ivoire

4.1. La grande saison sèche

Le terme «saison sèche» se réfère au nombre de jours de pluie et non à l'état hygrométrique, qui reste en général stable et très élevé aussi bien sur la côte que sur la forêt. Cette saison couvre les mois de Décembre, Janvier, et Février. Ses caractéristiques sont les suivants:

un ciel très nuageux et brumeux le matin, dégagé et ensoleillé le reste de la journée. Une visibilité troublée en fin de nuit par de nombreuses brumes et brouillards, exceptionnellement par brume sèche, celle-ci étant plus fréquemment observée en altitude qu'au sol;

- une tension de vapeur d'eau forte, les effets de l'harmattan étant en général moins marqué dans cette zone;
- un nombre très faible de jours de pluie. Des précipitations rares et de courte durée mais, assez fortes et dues à des développements orageux.

4.2. La grande saison des pluies

En réalité, le temps n'y est pas continu. La période perturbée dure trois semaines environ et, elle est précédée ou suivie de temps plus variable, avec des épisodes pluvieux et d'assez belles journées. Suivant les auteurs, les saisons des pluies débutent le 1er mars, le 15 avril ou le 13 mai. Le mois de mars est en fait marqué par le début de fortes instabilités orageuses et par les premiers passages de grains : ce qui exclut ce mois de la saison sèche.

Certains auteurs séparent cependant les pluies orageuses des pluies de mousson, en introduisant le terme d'intersaison orageuse. Va donc être définie la saison des pluies selon les critères suivants:

La grande saison des pluies, de mars à mi-juillet, avec l'intersaison orageuse de mars à mi-mai et, la saison des grandes pluies de mi-mai à mi-juillet. Les caractéristiques de la saison orageuse sont les suivantes:

- de puissants nuages convectifs, mais un ensoleillement encore important;
- des averses surtout nocturnes, et des passages de grains avec de fortes rafales de vents (55 à 75 km/h);
- une bonne visibilité affectée passagèrement par les précipitations;
- des températures élevées et une forte tension de vapeur d'eau.

Les caractéristiques de la saison des grandes pluies sont les suivantes:

- une très forte nébulosité;
- des pluies fréquentes, abondantes, et souvent durables (24h ou plus), sous forme de cordes (_≈3 mm) d'eau continues, modérées à fortes, quelquefois sous forme d'averse violentes (présence d'orage au sein des masses nuageuses);

- des températures en baisse progressive;
- une tension de vapeur d'eau en baisse.

4.3. La petite saison sèche

Cette saison, qui est la conséquence des effets de l'hiver australe, est une particularité de cette zone climatique. Elle dure de la mi-juillet à la mi-septembre et, se prolonge particulièrement jusqu'à la mi-octobre pour la région d'Abidjan.
Les caractéristiques de cette saison sont les suivantes:

- une faible durée de l'insolation : ciel couvert le matin et courtes éclaircies l'après-midi;
- un nombre de jours de pluies plus élevé mais des quantités d'eau recueillies très faibles: bruines ou petites pluies;
- une absence d'orages;
- une baisse de la température et de la tension de vapeur d'eau, d'où une sensation de confort sur le plan physiologique;
- une baisse sensible de la température de la mer : un tel refroidissement est dû à la pénétration dans le Golfe de Guinée des eaux froides engendrées par l'hiver austral.

4.4. La petite saison des pluies

Cette saison présente de nombreuses analogies avec l'intersaison orageuse. Elle s'étale de la mi-septembre (octobre pour Abidjan) à la fin novembre et ses caractéristiques sont les suivantes:

- une température et une tension de vapeur d'eau élevées;
- une durée de l'insolation importante;
- des averses plus fréquentes qu'en mars et avril, se produisant la nuit et le matin;
- de nombreux orages et quelques coups de vent au passage des grains.

III. Données pour le paramétrage des cycles d'état relatif au climat de l'agglomération d'Abidjan

Tableau 20 : température Max mensuelle au-dessus du sol (°C) à ABIDJAN

Année	Mois												Moyenne
	jan.	fév.	Mars	avr.	mai	juin	juil.	août.	sept.	oct.	nov.	déc.	annuelle
1981	48,1	47,9	50,1	51,9	49,5	46,3	45,4	49,2	48,1	49,2	49,3	48,7	48,6
1982	48,2	47,5	48,5	49,7	48,1	43,7	44,7	49,3	50,7	50,1	48,9	48,2	48,1
1983	48,5	47,9	48,9	50,1	49,2	44,8	45,1	48,6	50,2	49,9	49,5	49,7	48,5
1984	49,2	48,7	50,5	52,1	48,7	44,6	44,8	49,2	49,8	49,2	49,8	49,7	48,9
1985	49,2	49,6	50,3	52,3	50,1	47,1	47,3	51,6	51,7	52,1	50,3	50,2	50,15
1986	48,2	47,9	49,2	51,4	47,9	44,2	45,1	48,7	49,6	49,2	48,6	49,1	48,3
1987	47,9	47,6	48,5	49,6	48,2	44,7	44,7	49,2	49,5	50,1	49,9	49,7	48,3
1988	48,5	47,8	49,3	50,9	48,6	45,4	44,3	48,9	51,6	50,8	50,2	49,9	48,9
1989	48,5	47,9	51,2	52,9	48	44,6	45,7	49,3	51,8	51,6	49,7	49,3	49,2
1990	48,9	48,3	50,2	53,2	49,6	45,2	46,1	49,7	52,4	52,1	49,6	49,2	49,5
1991	48,7	48,5	49,8	51,9	48,9	43,7	45,6	49,5	51,7	50,8	49,8	49,5	49,0
1992	48,9	47,9	49,8	52,3	49,9	44,5	46,2	48,9	49,5	49,7	49,2	49,1	48,8
1993	49,1	48,9	50,1	51,9	49,8	45,1	47,9	50,3	53,1	52,8	50,7	50,1	50,0
1994	48,9	48,7	49,9	50,3	49,5	43,9	46,1	49,7	51,9	51,3	49,8	49,5	49,1
1995	48,7	49,5	50,2	51,2	49,9	45,2	45,6	49,5	52,4	52,1	50,1	49,7	49,5
1996	48,7	49,6	50,5	50,6	49,7	44,4	45,8	49,4	49,3	49,5	48,8	48,5	48,7
1997	48,8	48,7	49,4	49,7	48,0	43,3	46,0	48,3	51,7	51,5	52,0	52,4	49,2
1998	49,5	48,0	48,5	49,3	49,2	48,2	48,9	48,9	48,8	49,5	49,8	49,7	49,0
1999	52,0	60,6	60,2	56,5	48,0	47,2	57,0	54,4	64,6	70,5	60,5	49,0	56,7
2000	56,7	65,5	57,3	55,5	51,5	44,5	45,4	56,5	67,0	69,5	67,0	63,8	58,4
moyenne	49,3	49,9	50,6	51,7	49,1	45,0	46,4	50,0	52,3	52,6	51,2	50,3	49,8
Ecart-type	1,9	4,6	2,9	1,9	0,9	1,3	2,7	2,0	4,8	6,1	4,5	3,3	2,7
variance	3,8	21,4	8,5	3,5	0,9	1,6	7,5	4,1	23,4	36,8	20,1	10,9	7,2
maximum	56,7	65,5	60,2	56,5	51,5	48,2	57,0	56,5	67,0	70,5	67,0	63,8	58,4
minimum	47,9	47,5	48,5	49,3	47,9	43,3	44,3	48,3	48,1	49,2	48,6	48,2	48,1

Source : SODEXAM [2001]

Tableau 21 : insolation mensuelle (en heure) à Abidjan

Année	Mois												Moyenne
	jan	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	
1981	239,4	230,5	231,6	231,8	228,3	170,3	175,2	193,8	155,1	229,3	231,7	219,1	211,3
1982	240,5	226,2	225,3	229,3	227,4	156,9	160,2	191,6	152,7	217,8	229,3	225,8	206,9
1983	238,3	225,4	233,5	232,6	229,1	162,4	166,1	182,7	168,4	235,6	234,1	229,4	211,5
1984	244,1	227,2	236,9	235,1	227,4	165,2	163,4	197,5	149,1	227,1	239,8	236,1	212,4
1985	242,6	235,7	236,2	235,1	231,9	173,5	173,4	215,1	152,3	238,7	246,7	239,2	218,4
1986	237,2	235,1	228,4	227,6	221,5	145,7	165,2	201,4	139,2	231,8	223,4	244,9	208,5
1987	231,7	229,4	221,3	218,5	223,8	152,4	143,2	193,4	145,1	214,9	231,6	240,3	203,8
1988	234,5	233,8	232,7	224,7	225,1	157,8	137,6	185,2	147,3	195,3	227,2	231,5	202,7
1989	241,3	230,6	235,5	233,6	218,7	162,3	159,4	195,7	145,1	216,4	220,8	236,9	208,0
1990	238,6	232,5	231,8	234,1	225,4	158,5	161,2	223,4	156,2	237,8	221,5	238,1	213,3
1991	235,9	230,5	224,9	228,4	219,2	160,3	145,6	212,7	153,7	213,5	223,4	227,8	206,3
1992	241,2	238,3	225,4	231,9	221,3	167,2	154,7	188,3	137,2	199,7	202,9	231,5	203,3
1993	239,1	235,1	221,6	232,7	217,5	156,4	153,8	192,3	139,4	233,2	212,3	228,4	205,2
1994	241,5	237,3	210,8	225,4	211,3	159,4	142,5	113,5	119,2	227,5	205,4	236,5	194,2
1995	240,7	234,7	202,7	219,3	213,4	165,8	138,1	102,4	125,7	232,4	175,3	224,3	189,6
1996	242,2	236,8	205,6	210,1	210,7	161,6	137,9	99,7	137,5	227,5	178,4	201,6	187,5
1997	212,1	182,7	155,8	204,5	200,5	80,5	131,2	122,9	145,3	193,1	238,5	206,4	172,8
1998	172,7	234,3	228,2	223,4	202,4	185,7	163,5	131,1	129,8	194,2	222,7	220,0	192,3
1999	211,4	217,1	247,1	211,1	228,4	145,6	173,1	211,8	137,7	210,2	249,2	232,8	206,3
2000	213,4	218,0	205,4	248,0	195,4	122,0	153,2	140,0	112,6	236,6	251,2	205,2	191,8
Moyenne	231,9	228,6	222,0	226,9	218,9	155,5	154,9	174,7	142,4	220,6	223,3	227,8	202,3
Ecart-type	17,3	12,3	19,5	10,2	10,3	21,7	13,3	40,1	13,4	15,4	20,5	12,1	11,0
Variance	299,6	150,8	379,3	104,3	107,0	470,0	177,1	1608,1	179,4	236,2	420,8	146,1	121,6
Maximum	244,1	238,3	247,1	248,0	231,9	185,7	175,2	223,4	168,4	238,7	251,2	244,9	218,4
Minimum	172,7	182,7	155,8	204,5	195,4	80,5	131,2	99,7	112,6	193,1	175,3	201,6	172,8
Minimum	172,7	182,7	155,8	204,5	195,4	80,5	131,2	99,7	112,6	193,1	175,3	201,6	172,8

Source :SODEXAM [2001]

Tableau 22 : pluviométrie mensuelle (en mm) dans l'agglomération d'Abidjan

Année	Mois												Total
	jan	fev	Mar	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	
1981	22,5	18	22	329,6	172,6	297,2	212,5	35,1	12,3	59,1	81,5	82	1344,4
1982	15,6	29,1	25,4	354,9	182,3	329,5	53,1	50,6	3,4	78,2	142,5	39,8	1304,4
1983	18,7	31	99,4	297,6	312,6	492,7	302,4	8,7	13,4	41,6	62,3	81	1761,4
1984	29,4	12,6	38,1	327,4	253,7	463,8	196,8	42,3	15,9	125,3	102,8	20,5	1628,6
1985	17,5	31,5	87,3	219,4	185,2	493,1	578,9	33,4	2,7	198,6	72,9	45,3	1965,8
1986	28,7	22,3	12	316,5	182,3	704,5	21,9	52,9	5,6	28,7	182,4	86,5	1644,3
1987	22,6	61,4	27,5	296,1	399,1	199,4	45,6	68,4	40,6	62,1	99,2	40,8	1362,8
1988	23,1	75,2	63,3	325,6	266,2	512,3	286,4	29,5	32,1	275,4	175,8	77,8	2142,7
1989	19,3	38,1	9,8	182,3	196,4	328,2	208,3	15,4	110,2	198,6	89,1	44,9	1440,6
1990	13,7	49,7	11,3	176,65	295,4	296,4	625,1	3,8	10,5	32,9	196,2	97,5	1809,15
1991	12,4	27,6	26,2	233,4	155,9	423,6	15,9	5,6	7,3	72,4	123,4	15,8	1119,5
1992	16,2	19,8	61,5	243,7	378,2	175,8	40,2	62,8	21,6	220,8	77,6	95,2	1413,4
1993	29,7	10,3	47,2	228,6	238,4	610,1	96,4	52,3	3,5	215,9	221,5	92,4	1846,3
1994	19,2	28,5	39,5	104	154,3	597,2	275,1	7,4	30,6	58,1	158,4	42,5	1514,8
1995	11,2	39,2	42,3	110,2	204,6	294,7	252,3	25,1	7,2	25,7	102,7	17,2	1132,4
1996	0	25	60,6	130,4	386,1	439,6	663	95,7	2,8	9,8	221,8	42,5	2077,3
1997	6	11,5	138,8	377,7	252,8	604,8	17,5	2,1	6,6	262,5	96,2	96,2	1872,7
1998	24,6	87,2	6,5	104,9	135,6	158,6	55,9	17,5	25,4	234,2	209	86	1145,4
1999	19,3	34	30,6	229,5	176,2	504,7	268,5	43,6	158,8	49,9	158,8	43,2	1717,1
2000	54,5	44,7	80,3	324,2	380,3	758	256,5	8,3	9,5	27,3	105,8	18,9	2068,3
Somme	404,2	696,7	929,6	4912,7	4908,2	8684,2	4472,3	660,5	520,0	2277,1	2679,9	1166,0	32311,4
Moyenne	20,2	34,8	46,5	245,6	245,4	434,2	223,6	33,0	26,0	113,9	134,0	58,3	1615,6
Ecart-type	11,0	20,5	34,3	88,1	86,1	171,8	200,4	25,5	39,5	91,8	52,6	29,7	326,4
Variance	121,3	420,1	1179,8	7768,6	7420,1	29514,5	40174,1	652,3	1556,4	8421,1	2766,3	879,9	106556,5
Maximum	54,5	87,2	138,8	377,7	399,1	758,0	663,0	95,7	158,8	275,4	221,8	97,5	2142,7
Minimum	0,0	10,3	6,5	104,0	135,6	158,6	15,9	2,1	2,7	9,8	62,3	15,8	1119,5

source: SODEXAM [2001]

Tableau 23 : rayonnement global normal mensuel à Abidjan de 1981 à 2000

Mois	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Rayonnement	en kWh/m^2											
	4,62	5,06	5,08	5,18	4,61	3,67	3,65	3,54	3,97	4,73	4,93	4,47
	en joules.cm^{-2}											
	1 661	1 821	1 830	1 865	1 660	1 322	1 316	1 274	1 430	1 704	1 775	1 612

Source: SODEXAM, 2001

IV. Géologie de la Côte d'Ivoire

La Côte d'Ivoire continue de faire l'objet de nombreux travaux de recherches pour faire évoluer la connaissance de sa géologie. Dans le cadre de cette étude, nous vous proposons une synthèse réalisés à partir des travaux de Kouamelan [1996].

La Côte d'Ivoire appartient au Craton Ouest Africain *(fig. n°101 et,102)*. Défini en 1965 par Rocci, le Craton Ouest Africain affleure en trois endroits de tailles inégales à travers la couverture sédimentaire. Les deux zones d'affleurement majeures sont au Nord, la Dorsale de Réguibat et au Sud, la Dorsale de Man, séparées par le bassin de Taoudenni (Post-Hercinien). Entre ces deux principales zones apparaissent les fenêtres de Kayes et de Kéniéba au sud-ouest du bassin de Taoudenni *(fig. n°102)*. Le craton est limité à l'Est par la zone mobile de l'Afrique Centrale composée au Nord, de la Chaîne Pharusienne et au Sud par la Chaîne des Dahoméyides. Ces deux chaînes panafricaines sont séparées par le bassin du Niger (Post-Hercynien). Du côté Ouest, il est limité au Nord par les Mauritanides qui sont des chaînes hercyniennes et au Sud par la ceinture mobile du Kasila qui est panafricaine. Ces deux ensembles sont séparés par le bassin Sénégalo-Mauritanien (Mésozoïques).

La Dorsale de Réguibat concerne le Sahara Occidental, le Nord de la Mauritanie, et s'étend jusqu'en Algérie. Elle est composée de deux zones. L'une comprenant l'Ouest et le Centre où dominent les roches archéennes. L'autre à l'Est à cheval entre la Mauritanie et l'Algérie, composée essentiellement de formations protérozoïques.

La Dorsale de Man *(fig. n°103)* présente un schéma identique. A l'Ouest les formations archéennes, et à l'Est, les formations protérozoïques inférieures. Ces deux ensembles sont séparés par la faille de Sassandra orientée N-S et définissent, avec les formations du Bassin Côtier, la Géologie de la Côte d'Ivoire *(fig. n°104)*. Cette partie Méridionale du Craton Ouest Africain doit son nom à Bessoles [1977]. Elle s'est stabilisée aux environ de 1600 Ma (YACE, 1984).

Grâce aux mesures géochronologiques, l'histoire du Précambrien de la Côte d'Ivoire peut être divisée en deux grandes périodes (TAGINI et al, 1972) :

- Le mégacycle libérien, plus vieux de 2300 millions d'années (Ma),
- Le mégacycle éburnéen, compris entre 2300 et 1500 Ma.

Par ces âges, le mégacycle libérien appartient à l'Archéen et le mégacycle éburnéen au Protérozoïque inférieure et au début Protérozoïque moyen. Postérieurement à ces mégacycles, des kimberlites et dolérites fournissent quelques âges radiométriques compris entre 1500 et 284 Ma.

Les roches volcaniques ultérieures s'échelonnent du Protérozoïques moyen au Permien et les formations affleurantes du bassin sédimentaire côtier sont Crétacées, Paléocène, Pliocène et Quaternaire

1. Les formations archéennes.

Les formations archéennes de la Côte d'Ivoire *(fig. n°104)* font partie du *Domaine KENEMA - MAN* de la Dorsale de Man. Ce Domaine couvre l'extrême Ouest de la Côte d'Ivoire, une grande partie du Liberia et de la Guinée, et toute la Sierra Leone *(fig. n°103)*. En plus du Mégacycle libérien qui affecte les formations ivoiriennes, les datations radiométriques (Rb-Sr) distinguent en Sierra Leone un Mégacycle Leonien antérieur à 3000 Ma (Mc Farlane et *al*, 1980).

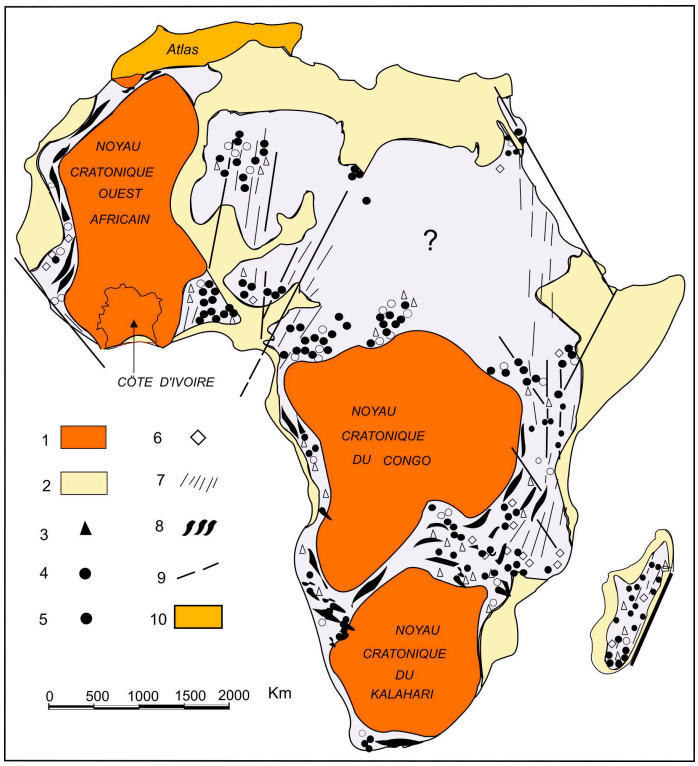


Figure 101: noyaux cratoniques de l'Afrique
d'après Clifford [1968a] ,Rocci [1965] et Kennedy [1964]

1.Noyaux cratoniques majeurs. **2**. zones péricratoniques activées orogéniquement du Précambrien terminal au début Paléozoïque. **3**. Ages supérieurs à 700 M.a., dans ces zones. **4**.Ages 680-580 Katangien. **5**. Âges 580-450. Damarien (Orogénie panafricaine). **6**. Ages 450-350. **7**. Zones de socle rajeuni. **8**. Zones de plissements. **9**.Fractures profondes. **10**.Aires marines secondaires et tertiaires.

1.1. Complexe de base

Sur le plan lithologique, le complexe de base des formations archéennes de la Côte d'Ivoire se décrit comme un ensemble continu qui s'étale d'un pôle granitique à un pôle noritique (Legoux, 1939).

Dans la série granitique, Legoux [1939] inclut toutes les roches leucocrates à orthoses ou microclines exprimés. Elle comprend également tous les termes depuis les granites calco-alcalins jusqu'aux granites magnésiens. La série noritique contient des roches leucocrates à mélanocrates caractérisées par la présence de plagioclases et de pyroxènes magnésiens. Il décrit ainsi donc des aplogranites, des granites calco-alcalins, des granites à perthites et des granites à hypersthènes. Dans

les termes leucocrates, le feldspath potassique n'est jamais individualisé ce qui la différencie des granites à hypersthène. En 1984, Camil définira deux zones *(fig. n°105)* dans la région de Man :

- une zone composée de gneiss gris granulite au Nord de la faille Man-Danané. Ces gneiss gris granulites présentent souvent un rubanement composé de bancs gris clairs, de bancs gris sombres et de bancs sombres. En plus des pyroxènes, la minéralogie de ces bancs se caractérise par la présence de hornblende brune, surtout dans les faciès sombres. Le feldspath potassique est un orthose perthitique quand il existe et le plagioclase, une antiperthitique. Cet ensemble inclut la série noritique de P. Legoux [1939].
- une zone composée de gneiss migmatitiques au Sud de la faille Man-Danané. Ces gneiss migmatitiques sont à biotites et forment des bandes quartzo-feldspathiques blanches ou roses alternant avec des bandes micacées plus sombres. Ils ne contiennent ni hypersthène, ni orthose contrairement au granulites. Ils se caractérisent par la présence de microcline.

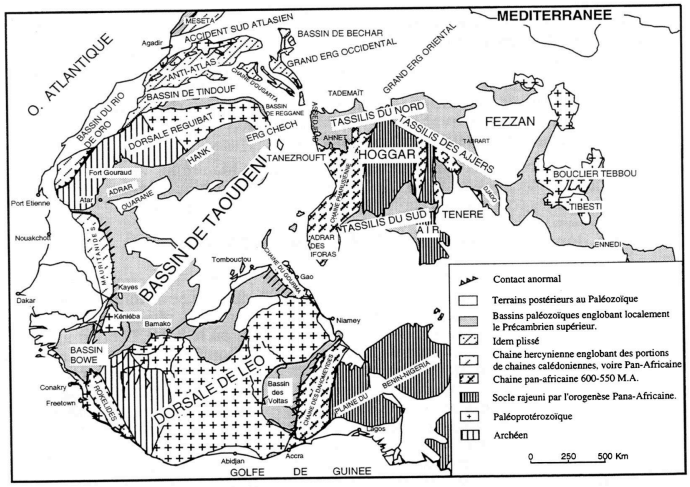


Figure 102 : carte géologique schématique de l'Afrique occidentale d'après Dallmeyer &Lecorche [1990] et Trompette [1973]

1.2. Les roches supracrustales

Les formations supracrustales de l'archéen ivoirien se présentent comme des lentilles étirées parallèlement à la foliation (globalement NE-SW) des migmatitiques et gneiss migmatitiques encaissants (CAMIL, 1984). Les plus grandes font en moyenne 10 km de long. Elles se retrouvent souvent au sommet des reliefs moyens tels les Monts Tia, Klahoyo et Douan *(fig. n°105)*, et semblent appartenir à une chaîne qui se prolongerait jusqu'au Geo Range au Sud-Ouest du Liberia. Ces roches ont été décrites et cartographiées pour la première fois à Man par Bolgarsky en 1950. Papon en 1973 a mis en évidence leur extension dans le Sud-Ouest de Côte d'Ivoire. Elles forment un complexe constitué de quartzites à magnétite et de roches basiques et ultrabasiques dont la puissance peut atteindre 150 m. D'où le nom de « complexe des quartzites » proposé par Camil [1984]. Les métabasites sont essentiellement représentées par des amphibolo-pyroxénites et les ultrabasites comprennent des pyroxénites, des hornblendites et des péridotites. Ces deux ensembles sont granulitisés. Cela se caractérise par la présence d'orthopyroxène,

qui dans les métabasites provient de la déstabilisation de la hornblende et du grenat, alors que dans les ultrabasites, il peut provenir de la déstabilisation du plagioclase (CAMIL, 1984).

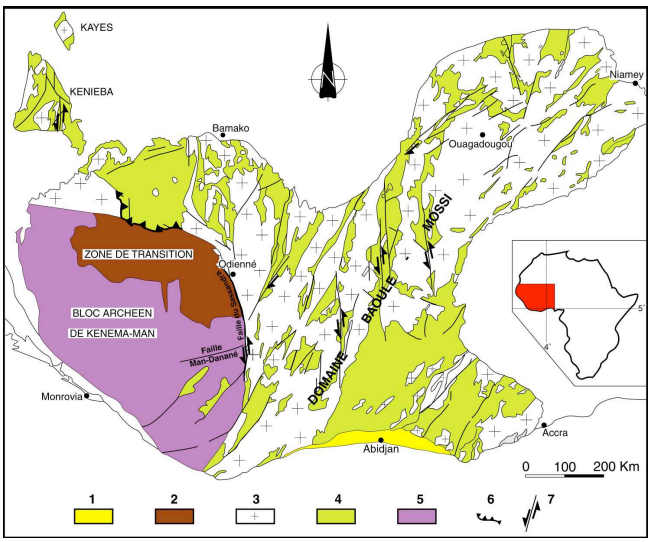


Figure 103: carte schématique de la Dorsale de Man
(modifiée, d'après Gbélé [1998] Milési et al., [1989]).

1. formations post-birimiennes (âge < 1,8 Ga). **2.** zone de transition archéen/paléoprotérozoïque. **3.** granitoïdes indifférenciés du domaine paléoprotérozoïque. **4.** sédiments, volcanosédiments et volcanites birimiens indifférenciés. **5.** domaine archéen. **6.** contact chevauchant. **7.** couloirs décrochant.

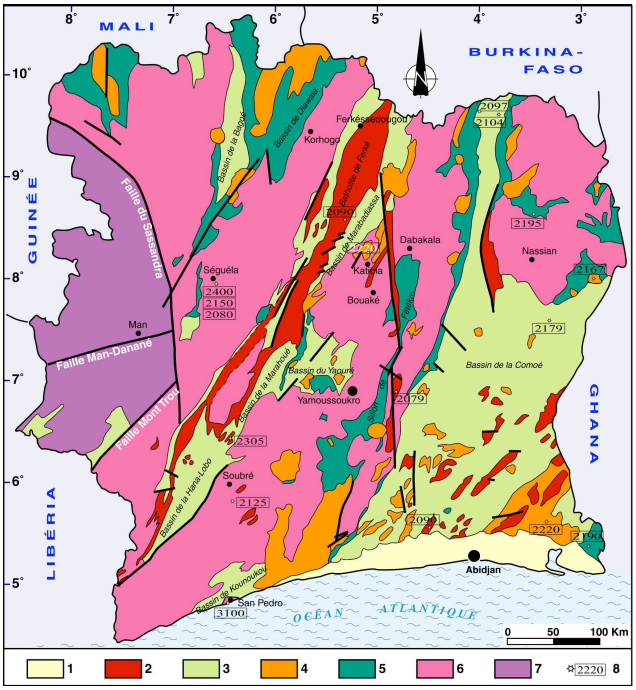


Figure 104 : schéma simplifié des ensembles géologiques en Côte d'Ivoire
d'après la carte géologique au 1/1000 000 de la Côte d'Ivoire de Tagini [1972], modifiée

1.formations post-birimiennes ; bassins sédimentaire côtier. **2**.batholite de Ferké : granitoïdes à deux micas associés ou non aux structures décrochantes méridiennes. **3**.bassins sédimentaires et volcano-sédimentaires. **4**.granitoïdes calco-alcalins localisés dans les bassins sédimentaires. **5**. volcanisme et volcano-sédiments indifférenciés. **6**.granitoïdes et granites rubanés gneiss et migmatites indifférenciés (âges supérieurs à 2,4 Ma). **7**. domaine archéen. **8**. âge

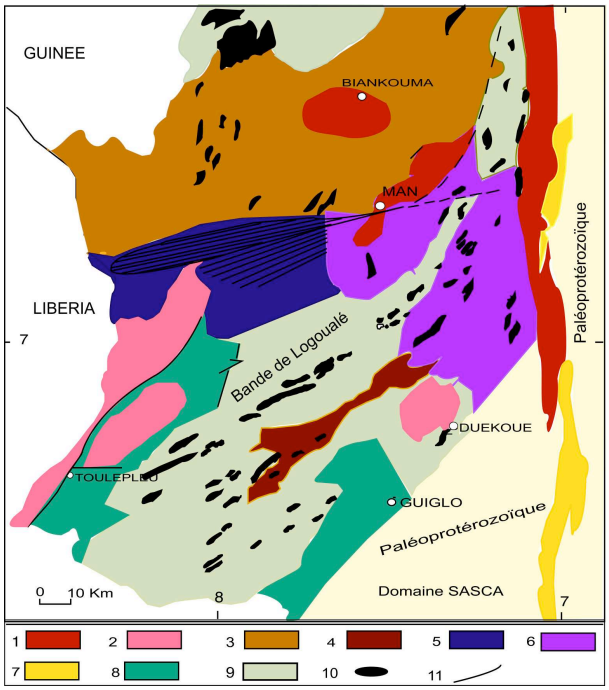


Figure 105 : Archéen du craton Ouest-Africain en Côte d'Ivoire.

d'après la carte au 1/1000 000 de la Côte d'Ivoire : la carte de Camille [1984] et la carte de Papon [1973], modifiées

1.mylonite de la faille de Sassandra. **2**.granitoïdes. **3**.gneiss gris tonalitique **4**.gneiss chanorckitites et leptynites. **5**.orthogneiss œillés. **6**. migmatites à hypersthène. **7**.volcanites du birimien. **8**.métasédiments. **9**.amphibolopyroxénites. **10**.quartzites. **11**.failles

1.3. Le Domaine Protérozoïque de la Côte d'Ivoire

A l'Est de la faille de Sassandra s'étend le Domaine Protérozoïque de la Dorsale de Man. Il est dénommé *Domaine Baoulé–Mossi (fig. n°102)***.** Ces deux noms correspondent à deux langues locales respectivement parlées en Côte d'Ivoire et au Burkina Faso. En plus des deux premiers pays cités, son extension concerne le Mali, le Ghana, et le Niger *(fig. n°102)*.

Schématiquement, il se présente comme un ensemble de gneiss formant le socle des formations supracrustales d'origine volcanique, subvolcanique, et sédimentaire mises en place ou déposées au sein de nombreux sillons ou bassins intracratoniques et dans lesquels se sont mis en place les granites du cycle éburnéen. Abouchami et al. [1990] ; Boher et al. [1992], des Auteurs qui ont conduit des études sur ce domaine, tendent à indiquer un caractère juvénile pour l'ensemble de ces formations.

Ces dernières se différencient du manteau vers 2200 à 2300 Ma et définissent le grand événement d'accrétion crustale du Craton Ouest Africain dénommé le Birimien (Kitson, 1928).

1.4. Lithostratigraphie du Birimien ivoirien

1.4.1. Le socle granito–gneissique

Il représente un peu plus de la moitié des formations du *Domaine Baoulé – Mossi*. Il s'agit d'un ensemble de roches granitiques, généralement foliées et migmatisées par endroit et surtout dans le Nord de la Côte d'Ivoire : Boundiali, Korhogo, Dabakala et Nassian *(fig. n°103)*.

Ces gneiss migmatitiques ont longtemps été considérés comme des témoins du socle anté-Birimien (Arnould, 1968). Lemoine [1988] puis Boher et al. [1992] ont démontré leur caractère juvénile lié à l'événement Birimien. Ces grandes aires granitiques ont été désignées par Arnould [1961] dans sa classification des granitoïdes éburnéens, comme *« granites Baoulé du Craton »*. Ce ne sont pas des masses homogènes. Elles se caractérisent par la présence de faciès variés à l'instar des gneiss migmatitiques dont le faciès dominant est un gneiss clair extrêmement monotone, biotite seule ou rarement accompagnée d'amphibole selon la description de Lemoine [1988] dans la région de Dabakala. Lemoine [1988], décrit également des granitoïdes dont le gisement est parallèle à la foliation des gneiss migmatitiques.

Ce sont des granites porphyroïdes à biotites, des granodiorites orientés à hornblende contenant des enclaves de micaschistes, d'amphibolite et d'amphibolo-pyroxénites, des granites leucocrates, syncinématiques à deux micas (type Ferké). Il décrit également des granitoïdes non concordant dont le granite de Sarala, leucocrate, homogène et équant avec un contact franc par rapport aux gneiss migmatitiques. Casanova [1973] dans son étude sur la géochimie des granitoïdes éburnéens met en évidence le caractère trondhjémitique des gneiss migmatitiques du Nord de la Côte d'Ivoire.

1.4.2. Les ceintures volcano-sédimentaires

1.4.2.1. Ceintures volcaniques

Ces ceintures limitent généralement les sillons sédimentaires. Elles sont orientées NS à NE-SW pour la plupart. Bessoles [1977] note que le volcanisme Birimien est loin d'être uniquement basique et exceptionnellement ultrabasique. Effectivement, Yacé [1976] signale une occurrence (la seule) de métapyroxénolite dans son étude pétrographique détaillée du volcanisme de la moitié Sud du sillon de Fétékro.

Hors de la Côte d'Ivoire, dans la partie Ouest du sillon de Bouroum au Burkina Faso, Zonou [1985] décrit une série inférieure réduite à l'affleurement, composée de métavolcanites (amphibolite, métarhyolite), métadiorite et métagabbro et une série supérieure subdivisée en deux ensembles.

Un premier ensemble ayant un caractère tholéiitique composé de coulées basaltiques massives, de pyroclastites (tufs soudés) et de sills (gabbro, subdolérites et dolérites) et un second ensemble constitué de dacite ayant un caractère calco-alcalin.

Lemoine [1988] met en évidence un magmatisme basique à affinité tholéiitique dont les caractères se rapprocheraient de ceux des basaltes d'arcs océaniques modernes. Sont subordonnées à ce magmatisme, des formations acides essentiellement des pyroclastites. Ceci traduit le caractère bimodal du volcanisme birimien. Il fait succéder à ce premier ensemble, une lignée calco-alcaline avec des caractères d'arc continental.

Abouchami et al. [1990] ont étudié différents ensembles volcaniques du *Domaine Baoulé-Mossi*, y compris les fenêtres de Kayes et de Kéniéba-Kédougou, au Mali et au Sénégal, ainsi que le Protérozoïque Inférieur de la Dorsale de Réguibat. Le résultat majeur obtenu à partir des analyses isotopiques est sans nul doute le caractère juvénile de ce volcanisme, contamination apparente d'une éventuelle croûte archéenne préexistante. Les éléments majeurs en traces, ainsi que les isotopes indiquent un caractère bimodal pour l'ensemble des volcanites, allant de celui d'un basalte de ride médio-océanique à ce lui d'une tholéiite d'arc insulaire rendant ainsi difficile la définition d'un modèle géodynamique à partir de diagramme de discrimination de sites géotectoniques (Batiza, [1981] ; Floyd, [1982]).

Des granitoïdes intrudent les ceintures volcaniques ; ils ont une composition tonalitique à granodioritique (Casanova, 1973) et sont discordants. Le faciès type est le massif de Bondoukou, daté à 2167 Ma (Toure et *al.,* 1987), à l'Est de la Côte d'Ivoire qui a servi comme référence à plusieurs classifications des granitoïdes (Arnould, [1961] ; Tagini, [1971]).

1.4.2.2. Bassins sédimentaires

Les bassins sédimentaires du *Domaine Baoulé-Mossi (fig. n°1043)* sont de tailles différentes. En Côte d'Ivoire, le Bassin de la Comoé est le plus grand. Il est à cheval entre la Côte d'Ivoire et le Ghana et s'étire au Nord jusqu'au Burkina Faso pour former le sillon de Houndé. Des bassins de taille plus modeste tels que ceux du Yaouré, et de Fétékro, viennent par la suite.

La succession lithologique dans ces bassins, subdivisée en Birimien inférieur et en Birimien supérieur, a toujours fait l'objet de polémiques entre différentes générations de géologues.

Au Ghana, Juner [1940] définit le Birimien inférieur comme un ensemble d'origine essentiellement sédimentaire et le Birimien supérieur est volcanique et composé de laves basiques à intermédiaires et de pyroclastites. Milési et *al.* [1989] reconnaissent la même succession dans le reste du *Domaine Baoulé-Mossi*. Pour d'autres auteurs les volcanites sont à la base des sédiments (Pouclet et *al*., 1996 ; Vidal et al., 1996).

Des granitoïdes intrudent ces bassins. Ce sont des leucomonzogranites (Casanova, 1973), communément appelés leucogranite. Ils sont syntectoniques et orientés NE-SW et correspondent aux granitoïdes type Ferké de Arnould [1961] et Tagini [1971]. Ils sont également abondants dans le Sud-Ouest de Côte d'Ivoire.

1.4.3. Les granitoïdes du Birimien

Les granitoïdes birimiens sont classés suivant des critères tels la forme de l'intrusion. On rappelle que dans les points précédents, l'intrusion de granitoïdes dans les différents ensembles (socle, ceintures, bassins sédimentaires) a été évoquée et des conclusions sur la chronologie de leur mise en place ont été déduites.

Ceux correspondant à des intrusions plus ou moins bien circonscrite étaient considérés comme postérieur (Arnould, 1961). Des données géochronologiques ont révélé que certains massifs circonscrits tel celui de Bondoukou *(fig. n°104)* sont précoces (Touré et al. 1987).

La composition des granitoïdes peut être tonalitique, elle est souvent granodioritique et parfois granitique. Les vrais granites, selon la classification de Streckeisen [1976], ne sont pas fréquente (Casanova, 1973).

2. Les formations du Domaine de Transition

On distingue dans le *Domaine Baoulé-Mossi*, dans la partie située à l'Ouest de la longitude 6°W une *Zone de Transition* (Kouamelan, 1996) où a été mise en évidence une contamination des formations birimiennes et un segment de croûte archéen. Au sein de cette Zone de Transition, on distingue *(fig. 104)*:

- le *Domaine de Boundiali* ou domaine Nord situé au Nord du parallèle 9 ;
- le *Domaine de Séguéla-Vavoua* ou le domaine Centre situé entre les parallèles 7° et 9° ;
- le *Domaine Sud* qui s'étend du parallèle 7°N jusqu'à l'Atlantique.

Le socle granito-gneissique représente plus de la moitié des formations. Viennent ensuite les formations volcaniques, volcano-sédimentaires et sédimentaires. Tout cet ensemble est ensuite intrudé par des granitoïdes.

2.1. Les formations de la phase précoce Birimienne

On retrouve ces formations surtout à l'Est de la Côte d'Ivoire *(fig. n°104)* (Doumbia, 1998). Les régions concernées sont Katiola (au centre), Dabakala, MBahiakro et Nassian (à l'est).

2.1.1. Les ceintures volcano-sédimentaires

L'étude des formations sédimentaires a conduit Arnould en 1961 à assimiler le bassin de Marabadiassa *(fig. n°104)* au Tarkwaien du Ghana à cause de la prédominance d'un faciès conglomératique. Il décrit deux séries :

- la série inférieure est composée de conglomérats de la Pinda (affluent du fleuve Bandama) et l'ensemble grauwackes et grauwackes conglomératiques à stratification parfois entrecroisée dans la partie sud du bassin. Les galets

peuvent atteindre des tailles exceptionnelles de 50 cm. La taille moyenne étant de 2 à 5 cm. La nature des galets est très variée. Les galets de granite sont les plus grands. Ils sont bien usés et souvent sphériques. Les galets de roches vertes et grauwackes sont de petite taille et souvent roulés.

- la série supérieure est composée de quartzites sériciteux à stratification entrecroisée de Diomankou *(fig. n°104)*, d'extension réduite à la bordure ouest du bassin. Dans le Mt Angofi *(fig. n°104)* c'est un quartzite gris blanc à gris rosé, composé de grains de quartz détritiques à peine jointifs et de quelques grains de feldspath dans un ciment de quartz recristallisé et de séricite.

2.1.2. Les formations d'origine plutono-volcanique

Ce sont des métavolcanites (métarhyolite, méta-andésite, métagabbro, etc.) qui s'alignent parallèlement à la bordure ouest du bassin et des granitoïdes de tailles et de composition variées (granodiorite, granite, leucogranite). L'absence de ces formations sous forme de galets dans les sédiments amène Arnould [1961] à les considérer comme postérieures à la sédimentation. Cela indiquerait une épisode de granitisation importante dans la phase terminale de la formation du bassin (environ 2100 Ma).

3. Le bassin sédimentaire côtier de la Côte d'Ivoire

3.1. Origine et structure de la Marge ivoirienne

La Marge océanique ivoirienne s'est créé à partir du Jurassique supérieur ou du Crétacé inférieur par l'ouverture d'un rift intracratonique probablement contemporain du rajeunissement panafricain (BLAREZ, 1986). Il s'agit d'une marge de cisaillement (BOILLOT, 1983) sous la dépendance des failles transformantes de Saint-Paul et de la Romanche qui limitent un bassin losangique de type « mega pull.apart » *(fig. n°104)*.

Au Nord, le prolongement de la fracture de Saint-Paul constitue « l'accident majeur, des lagunes » qui, du fait du contexte géodynamique global, a surtout joué en distension comme en témoigne sa structure en demi-rift (Spengler A. et Delteil J.R, 1964 ; Tastet J.P, 1979 ; Blarez E, 1986). Il constitue la limite septentrionale du bassin sédimentaire profond qui s'étend dans le domaine marin actuel sur une zone de croûte continentale amincie et, au-delà de la fracture de la Romanche, sur la croûte océanique *(fig. n°106)*.

3.2. Les formations du Bassin sédimentaire

Correspondant à la Zone Sud, au relief de plaine mamelonnée située entre 0 et 200 mètres d'altitude (Arnaud J.C., 1978), le bassin sédimentaire de la Côte d'Ivoire s'étend le long de la côte Atlantique. Il présente une partie émergée en forme de

croissant d'une superficie de 8 000 km^2 soit 2,5 % du territoire ivoirien *(fig. n°104)*. La plus grande partie s'étendant en Mer.

Le bassin ivoirien représente la zone occidentale du vaste ensemble sédimentaire : le Bassin éburnéo-nigerien (Mestraud J.L., 1970).

Son histoire géologique *(fig. n°107)*, liée à l'ouverture de l'Atlantique débute par le dépôt d'une épaisse formation de sables, grès, conglomérats et argiles versicolores d'origine continentale d'âge vraisemblablement Jurassique supérieur ou Crétacé inférieur ; correspondant au stade de rift.

Sur cette série continentale repose en discordance 2 600 mètres d'argiles d'origine marine qui se terminent par des faciès conglomératiques. Cette série marine serait du Crétacé inférieur.

Sur cette série marine repose un Crétacé moyen représenté par des grès, des sables d'origine fluviatile passant à des calcaires gréseux parfois dolomitiques au centre du bassin. Essentiellement argileux à l'Ouest, le Crétacé supérieur devient plus grossier au centre et de type calcaire biogène à l'est du bassin.

La série marine du Paléocène est constituée par 500 mètres de sédiments argileux et glauconieux. A l'Est du bassin, ces sédiments sont des sables, des argiles glauconieuses ou des calcaires ou des calcaires coquilliers.

Ensuite, viennent se reposer sur le Paléocène, 490 mètres d'argiles sableuses à petits bancs calcaires et d'argiles glauconieuses plus ou moins sableuses d'age Eocène.

Les formations du Miocène, constituées de sables plus ou moins argileux surmontés d'une marne argilo-silteuse viennent juste après gisant ainsi en discordance sur l'Eocène. Cette « discordance de l'Oligocène » a amené Simon et Amakou [1984] à suggérer dans la région d'Abidjan l'existence d'un « paléocanyon » dont la tête serait orientée Est-Ouest et son flanc Nord confondu avec l'accident majeur des lagunes.

Enfin, au sommet de la série s'étendent les formations quaternaires de la plaine littorale constituées à sa base par une formation lagunaire à argiles noires intercalées de tourbes et de sables datés de 42 000 ans que Fredoux [1977] et Tastet [1979] attribuent à un Quaternaire « moyen ».

Sur cette formation, reposent 20 à 30 mètres de sables argileux anté-holocènes, vraisemblablement mis en place au cours du dernier épisode régressif (Ogolien) qui a vu la mer se retirer jusqu'à –110 mètres vers 18 000 ans B. P. (Assemien A. et *al*, 1970 ; Martin L. et *al*,1972 ; Le Ribaut L. et *al*, 1979).

La série finit par une formation de 60 mètres de vases et sables lagunaires à marins d'âge holocène.

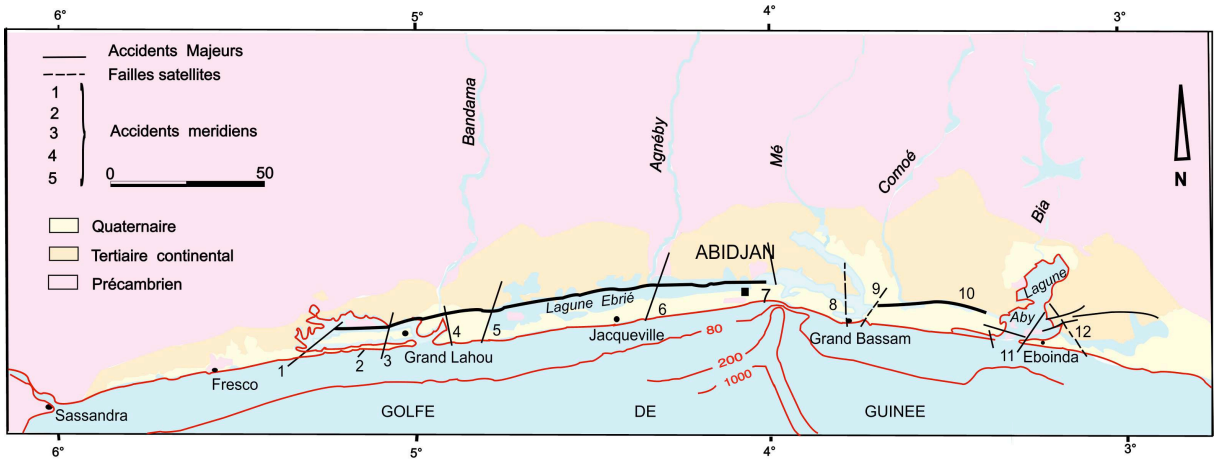


Figure 106 : carte du bassin sédimentaire de la Côte d'Ivoire modifié d'après Spengler A. et Delteil J.R [1966]

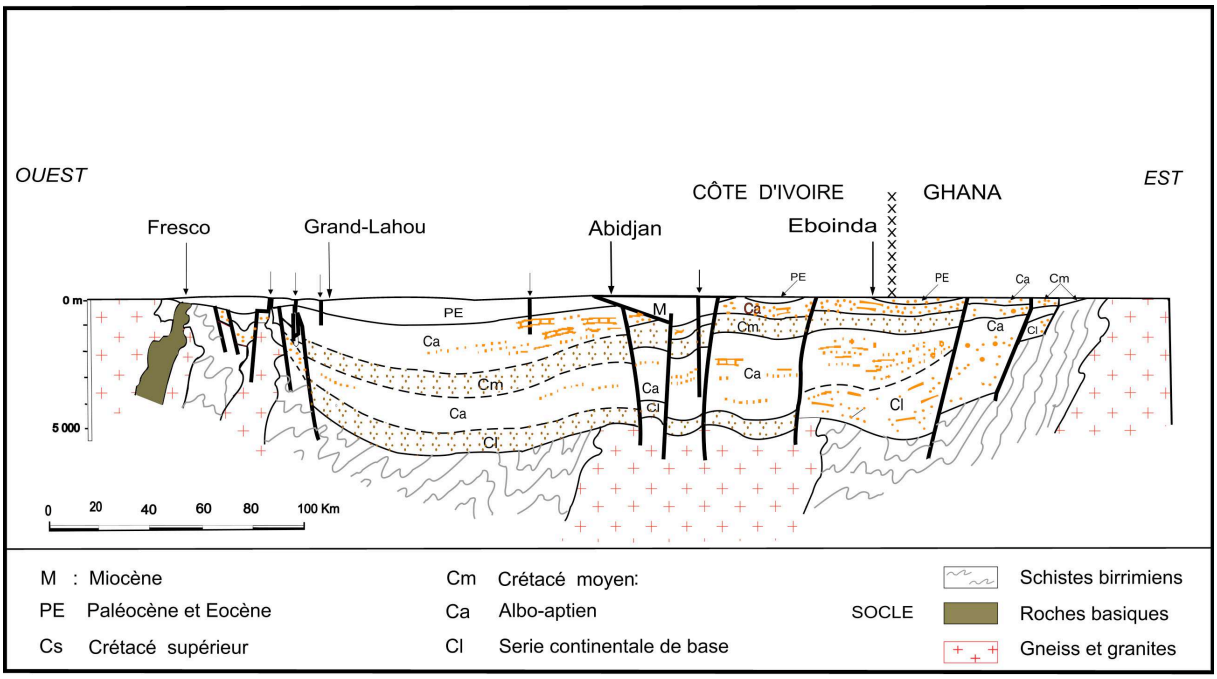


Figure 107: coupe longitudinale schématique du bassin sédimentaire côtier de la Côte d'Ivoire suivant le littoral du Golfe de Guinée . d'après Spengler A. et Delteil J.R [1966]