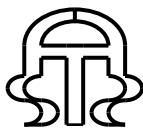


2.	Formation géologique et lithostratigraphique	
IV. Etudes des boutonnières du Moyen Atlas :		11
A.	Boutonnière de Kandar :	
1.	Situation géographique de la boutonnière:.....	
2.	Cadre géologique de la boutonnière:	
B.	Boutonnière de BHALIL :	
1.	Situation géographique :	
2.	Cadre géologique :	
V. Zone d'étude : boutonnière de Bni Mellala.....		16
A.	Situation géographique :	
B.	Cadre géologique :	
C.	Lithostratigraphie des terrains primaires de la boutonnière :	
1.	Formation paléozoïque :	
D.	Lithostratigraphie des terrains méso-cénozoïque :	
1.	Les terrains triasiques :	
2.	Les terrains jurassiques :	
E.	Etude microtectonique.....	
1.	Les phases tectoniques dans la boutonnière de Bni Mellala.....	
2.	Phase plicative:	
VI. L'utilisation des schistes de la boutonnière de Bni Mellala dans la fabrication des ciments		28



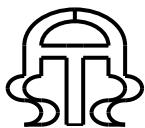
A. Méthode de fabrication de ciments.....	
1. Extraction –Concassage	
2. Préparation de matière première (crue) :	
3. Cuisson de la farine :.....	
4. Refroidissement :	
5. Préparation du ciment : Broyage de clinker.....	
6. Stockage et expédition du ciment :	
B. Le but de l'utilisation des schistes dans la fabrication des ciments.....	
VII. Conclusion Générale :	38

Introduction Générale

Notre formation à la Faculté des Sciences et techniques de FES est clôturée par un projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de diplôme DUT génie minérale et environnement.

Ce rapport présente un audit sur l'étude géologique des schistes de la boutonnière de Bni Mellala qui est caractérisé par un socle paléozoïque et couverture mésozoïque ; et l'utilisation de ces schistes dans la fabrication des ciments .les cimenteries en général exploitent des carrières de calcaire et d'argile utilisés comme matière première dans la formation des ciments. Cependant qu'il y a d'autres matériaux utilisés tels que les minéraux de fer et d'aluminium ainsi l'utilisation des schistes comme matière première à la fabrication, pour diminuer le taux de calcaire à l'industrie des ciments. Ce rapport s'organise en cinq chapitres:

- Les grands ensembles structuraux de domaine atlasiques
- Etudes des boutonnières de moyen atlas
- Zone d'études : boutonnière Bni Mellala
- Utilisation des schistes de la boutonnière dans la fabrication des ciments
- Conclusion



Les grands ensembles structuraux du Maroc

Le Maroc, par position géographique au Nord-Ouest de l'Afrique et par le grand éventail des formations géologiques qu'il présente, et qui s'échelonnent sur des milliards années, offre un intérêt particulier pour les corrélations géologiques.

Les caractéristiques majeures de l'évolution géologique varient du sud au Nord du Maroc, du plus ancien au plus récent et permettent de distinguer plusieurs domaines structuraux.

Domaine Anti-Atlasique et Saharien

Intimement lié au bouclier Ouest africain au Sud et limité par l'accident sud-atlasique au Nord, ce domaine est formé par un socle protérozoïque et précambrien constitué par les ensembles suivants :

- Le coté saharien : correspond aux provinces sud du Maroc ; la série la plus ancienne (2000 Ma.) est connue dans la dorsale Rguibat. Elle est surmontée au Nord (Bassin de Tindouf) par la série paléozoïque et à l'Ouest (plaine côtière) par des séries d'âge méso-cénozoïque ;
- L'Anti-Atlas : Le socle de ce domaine est affecté par l'orogenèse Panafricaine (680-570 Ma.) La couverture du Protérozoïque terminal et du Paléozoïque est modérément déformée durant l'orogenèse hercynienne.

Domaine Atlasso-Mesetien

Situé entre l'accident sud atlasique et la limite sud du Pré-rif, ce domaine est constitué par :

Un socle paléozoïque (les mesetas) d'âge allant du Cambrien jusqu'au Carbonifère et constitué essentiellement par des terrains sédimentaires avec une intense activité volcanique bimodale au Viséen. Ce socle a été structuré par l'orogenèse hercynienne responsable aussi de la mise en place de nombreuses intrusions de granitoïdes.

Une couverture formée de terrains essentiellement carbonatés, mésozoïques et cénozoïques comportant deux unités structurales :

- Une zone à couverture plissée comprenant le Haut et le Moyen Atlas plissé, ayant subi une tectonique alpine précoce.
- Une zone à couverture tabulaire comprenant le causse moyen atlasique, les hauts plateaux et le pays des horsts dans le Maroc oriental.

Domaine Rifain

Dans les zones septentrionales du Maroc, il se prolonge au Nord par le domaine bétique et vers l'Est par le domaine tellien .Au cœur de ce domaine, on connaît plusieurs blocs paléozoïques, affectés par l'orogenèse hercynienne.

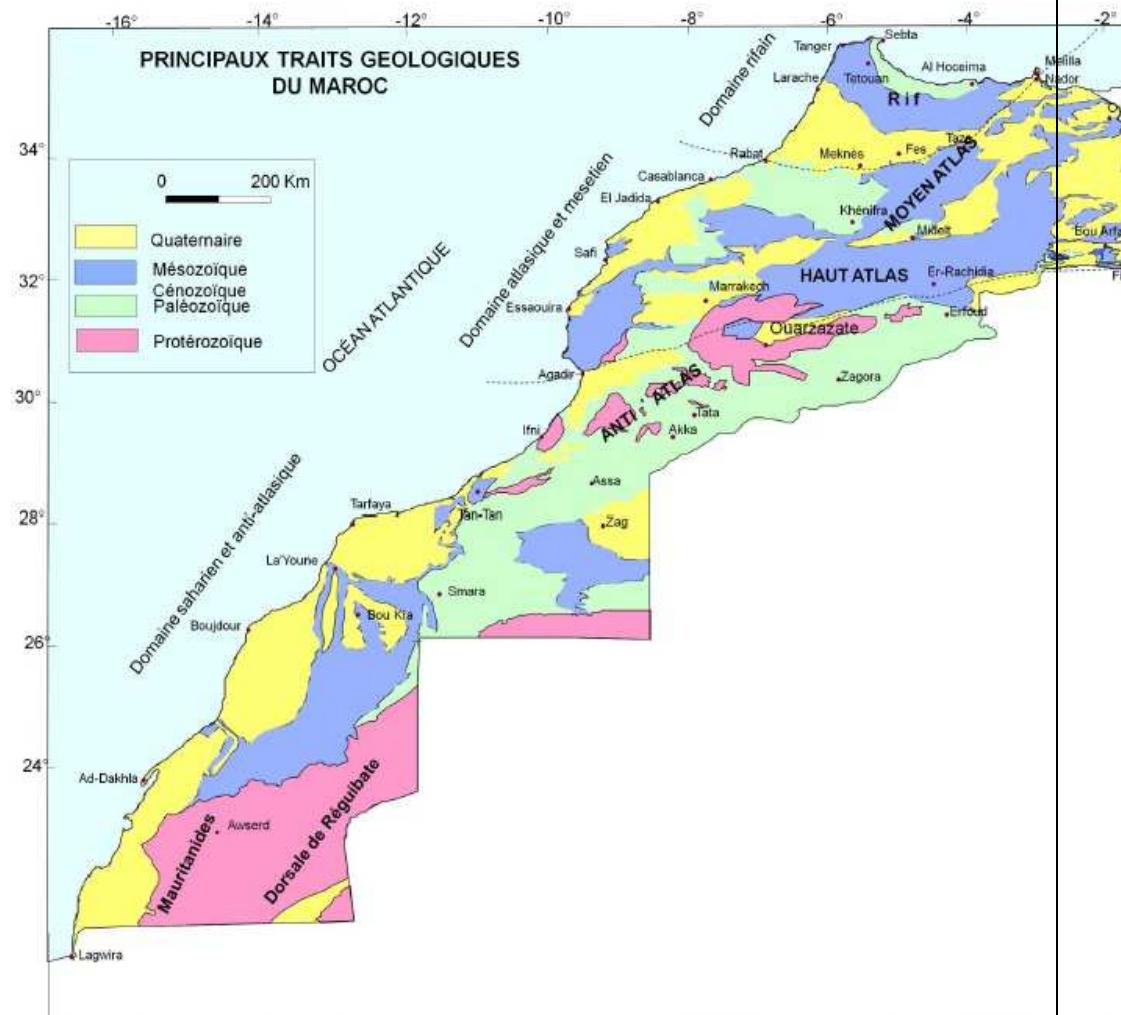


Figure 1: Les principaux domaines structuraux au Maroc (D'après l'ONHYM)

Les grands ensembles structuraux de domaine Atlasique

Haut Atlas

Le Haut Atlas marocain est une chaîne intracontinentale qui change d'orientation du WSW-ENE et E-W au centre à WNW-ESE dans sa partie orientale. D'un autre côté, le Haut Atlas Oriental se caractérise par ses plis anticlinaux étroits (Jbel Grouz) séparés par de larges synclinaux comme « El Haïtama » au nord de la ville de Figuig, ce qui donne une disposition de plis en échelons (El Kochri, 1996). La fracturation qui affecte la région présente plusieurs directions dont trois sont dominantes : E-W, NE-SW et WNW-ESE. Généralement le haut atlas est orienté N70 et divisé en plusieurs parties :

Haut atlas occidental ou maritime : Le Haut Atlas maritime est lié à l'ouverture de l'Atlantique Nord. Séparé du massif ancien par le couloir d'Argan d'âge triasique. Cette extrémité est constituée par des calcaires.

Haut atlas du Marrakech ou massif ancien : Le Haut Atlas de Marrakech est une zone charnière stable, zone "haute" séparant deux domaines soumis à une forte subsidence. Il est resté émergé au Jurassique

Haut atlas central et oriental : Le Haut Atlas Oriental s'étend depuis l'Est de la ville de Bou Arfa jusqu'à la frontière Maroco-algérienne. Les formations géologiques correspondent, à l'Ouest, à la plaine de Tamlelt et à l'Atlas saharien en Algérie à l'Est.

Moyen Atlas

Localisation géographique

Le chainon moyen atlasique se sépare du haut atlas dans la région de Bni Mellal et il s'étend du SW au NE en direction de Taza. c'est une chaîne intracontinental faisant partie du domaine atlasique défini par Choubert et Marcais (1956).

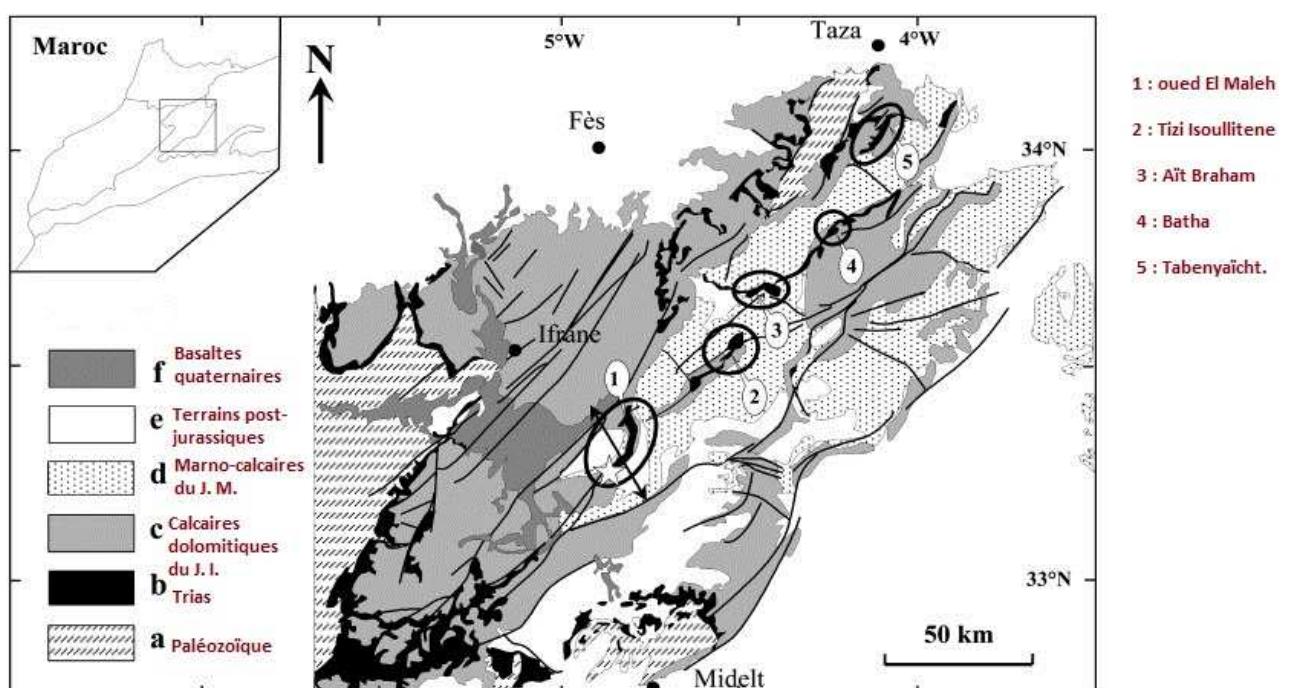


Figure 2 : Carte schématique du Moyen Atlas

Formation géologique et lithostratigraphique

Les formations du plus ancien au plus récent qui constituent le Moyen Atlas sont (Charrière, 1990 ; Petit et Laville, 1987) :

Le socle du moyen atlas: il est d'âge primaire ; les formations paléozoïques qui affleurent dans le massif de Tazekka et les boutonnières d'El Hajeb, de Bsabis, de kander, El Menzel, de kerrouchen ... ;

La couverture du moyen atlas :

-les formations triasico-liasiques affleurent autour des terrains paléozoïques, surtout au niveau du massif de Tazekka et la région d'El kbab-kerrouchen. Ces formations affleurent aussi le long des grands accidents.

-Les formations du jurassique inférieur et moyen constituant l'essentiel de la chaîne moyen atlasique.

- les formations crétacées cantonnées dans le centre de la chaîne.

-le Miocène affleurant dans la partie NW de la chaîne.
-le plio-quaternaire très développé près des grands accidents et à la périphérique de la chaîne.

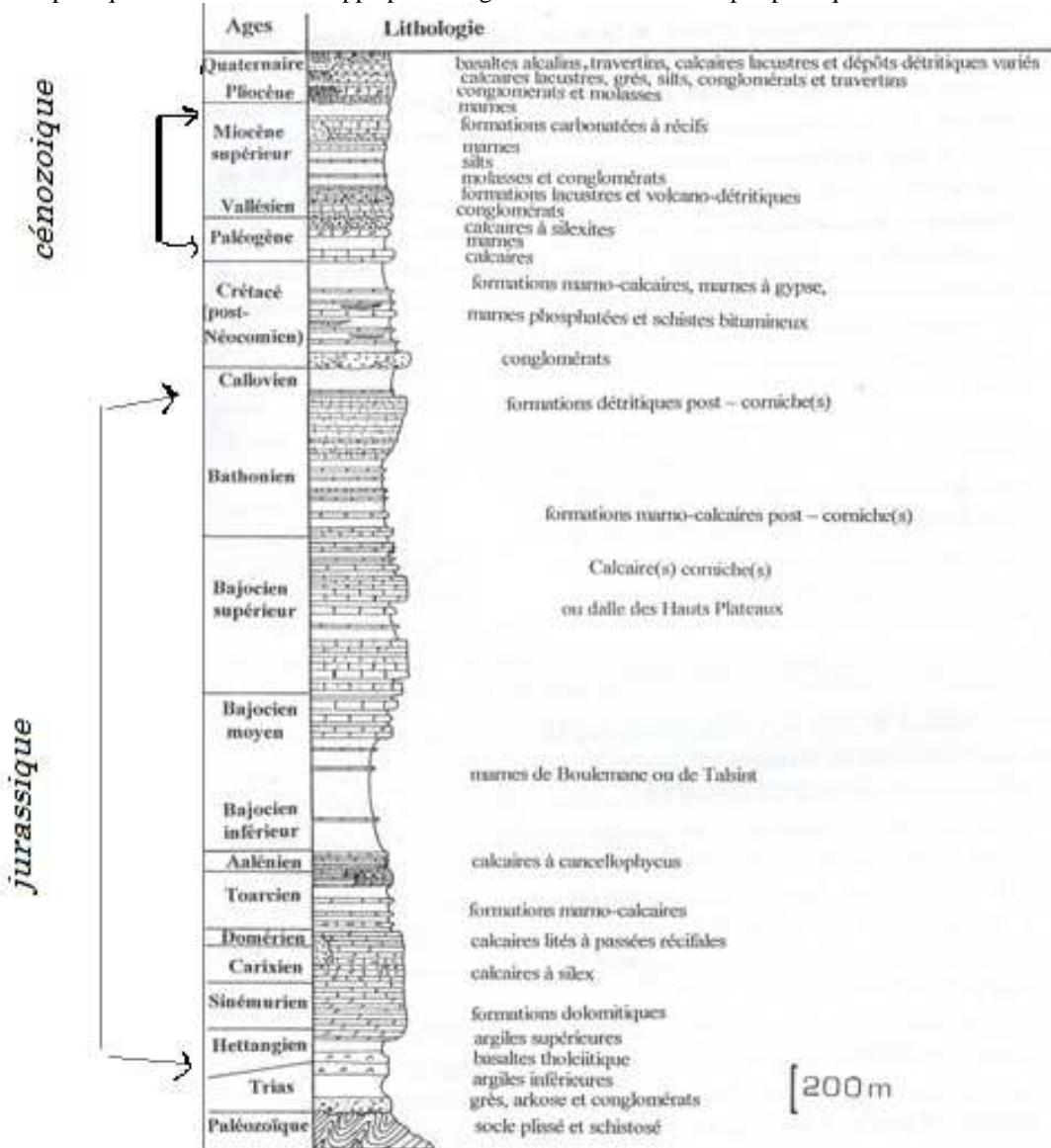


Figure 3 : log stratigraphique qui montre la stratigraphie de la couverture de moyen atlas (D'après HINAJE ; 2004)

Le Moyen Atlas regroupe deux entités structurales différentes :

Moyen atlas plissé :

Situé au Sud est de la chaîne moyen atlasique, c'est une succession de cuvettes séparées par des lignes de crêtes ou s'individualisent les plus hauts sommets.

L'analyse de la déformation tectonique dans les terrains méso-cénozoïques du moyen atlas plissé a permis de mettre en évidence plusieurs phases tectoniques (référence), parmi lesquelles la phase tectonique d'âge miocène inférieur. Celle-ci est caractérisée par un axe σ_1 horizontal et orienté N 30, un axe σ_2 vertical et un axe σ_3 horizontal et orienté N120, avec des permutations des axes donnant des épisodes tectoniques.

Cette phase tectonique est représentée sur le terrain par des structures et microstructures tectoniques. Il s'agit des failles normales orientées N10 à N50, des fentes de tension parallèles et rectilignes de même direction, des décrochements dextres subméridiens, des décrochements sénestres N60 à N90, des plis N110 à N130, des failles inverses N100 à N140 et une schistosité de fracture orientée en moyenne N120. L'ensemble de ces structures et microstructures témoignent que cette phase est divisée en plusieurs épisodes tectoniques. Les directions des axes des contraintes restent presque les mêmes, avec des permutations des axes $\sigma_1 - \sigma_2$ et $\sigma_2 - \sigma_3$, et variation du rapport $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$.

Moyen atlas tabulaire :

Situé au Nord Ouest du moyen atlas, il est constitué par un ensemble de causses dolomitiques, recouverts parfois par des cônes de déjection et des coulées volcaniques récentes. Il domine les plaines et plateaux du Maroc central par des escarpements de failles.

Le Moyen Atlas tabulaire est formé en sa majeure partie par un socle paléozoïque recouvert par une importante couverture mésozoïque, l'ensemble est parsemé des épanchements volcaniques épars d'âge quaternaire (Texier et al, 1985 ; Herbig, 1988). Cette partie occidentale moins élevée et tabulaire présente une lithologie formée essentiellement de calcaire et de dolomies liasiques reposant sur des argilites triasiques (Herbig, 1988). Cet aspect géomorphologique et structural du moyen atlas a occasionné la mise en place d'une vingtaine de lacs naturels permanents ou semi permanents (Chillasse et Dakki 2004). La genèse de ces systèmes lacustres est favorisée par le phénomène tectono-karstiques qui ont exploité les zones de faiblesse du massif rocheux (calcaires et dolomies).

Dans le Moyen Atlas, on peut dénombrer plus de 40 Dayats (lacs) correspondant à des effondrements tectono-karstiques à remplissages fluvio-lacustres. L'analyse de la fracturation dans ces dépôts et au niveau de leur substratum jurassique a permis de mettre en évidence quatre principaux épisodes de paléocontraintes responsables de la genèse et de l'évolution de ces bassins fluvio-lacustres. Le premier d'âge Miocène supérieur correspond à une extension NE-SW. Le second épisode correspond à une extension NNW-SSE d'âge Pliocène moyen-supérieur. Les deux derniers d'âge Quaternaire correspondent aux régimes de paléocontraintes avec σ_3 horizontale et orientée N 120 au Quaternaire ancien-moyen, puis au Quaternaire moyen-récent elle se réoriente dans le sens anti-horaire et devient orientée N 080 (Hinaje et Ait Brahim, 2002 ; Hinaje, 2004).

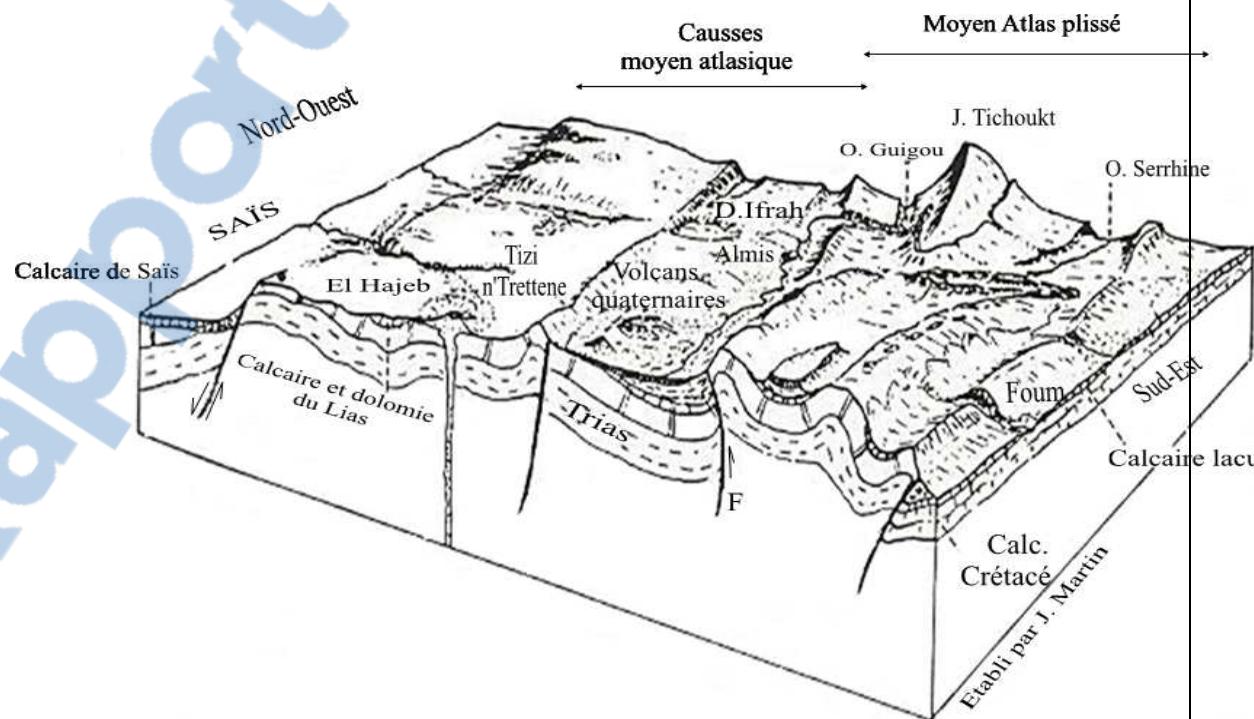


Figure 4 : La jonction entre le Causse moyen atlasique et le Moyen Atlas Plissé (d'après Martin et al. 1964 ; in Lecompte, 1986)

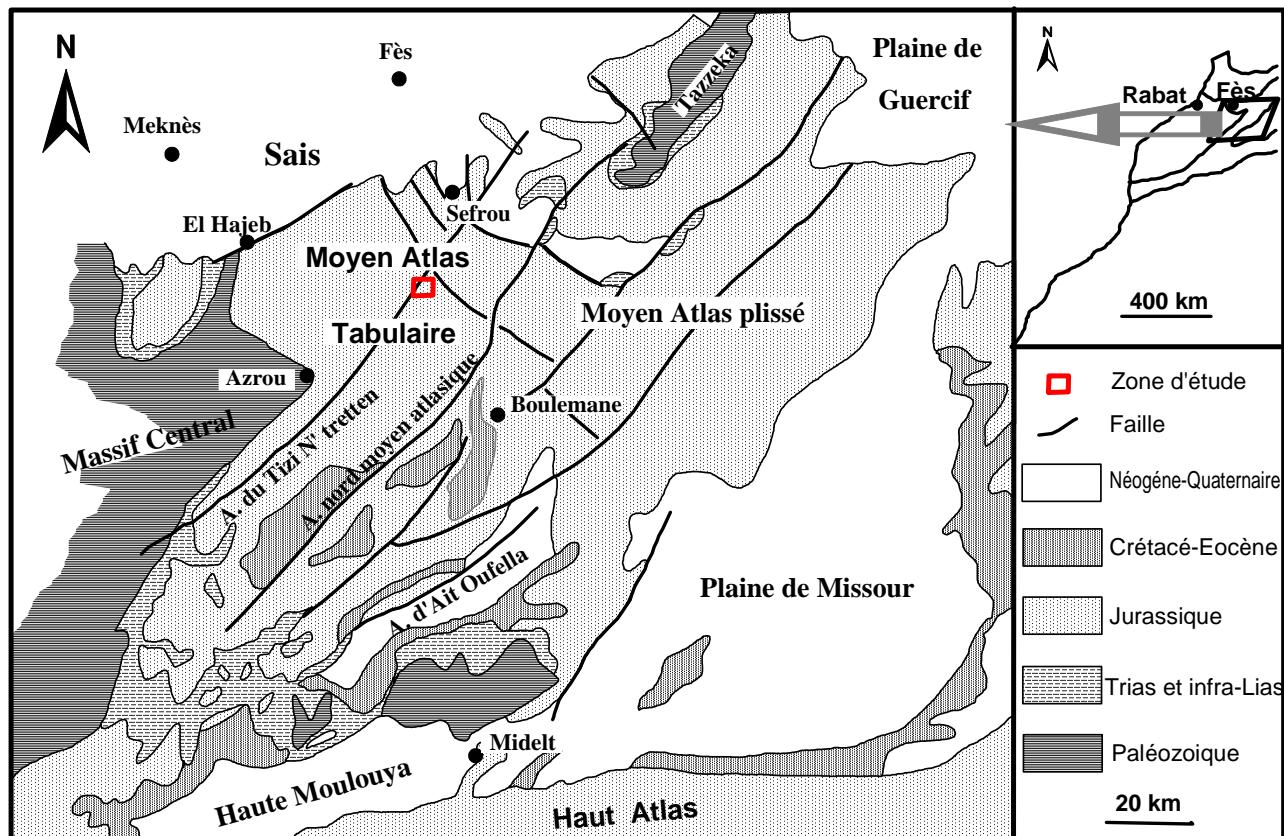


Figure 5 : Carte géologique simplifiée du Moyen Atlas (Carte géologique du Maroc au 1/1000 000, modifié)

Etudes des boutonnières du Moyen Atlas :

Boutonnière de Kandar :

Situation géographique de la boutonnière:

La boutonnière de kander est située dans la partie septentrionale du Moyen Atlas tabulaire .Elle se situe à environ 26 kilomètres au Sud de la ville de Fès.

La boutonnière de kander à un aspect allongé, orienté en gros NW - SE où affleure le socle sur approximativement 6 kilomètres de long et 1 kilomètre de large.

Cadre géologique de la boutonnière:

Le paléozoïque apparaît au cœur de formation de lias en constituant la boutonnière d'Imouzzar du kandar au sein de la succession dévonienne, plusieurs unités ont été distingué (CHARRIERE et REGNAULT, 1983) depuis l'ordovicien jusqu'au viséen supérieur voir même le Namurien. Le Lias de cette boutonnière est constitué de dolomies massives, bréchiques ou sableuses, parfois de calcaire bioclastique et de dépôts calcaire-dolomitiques (CHARRIERE, 1990, SABAoui, 1998, SADKI et al ,1999).

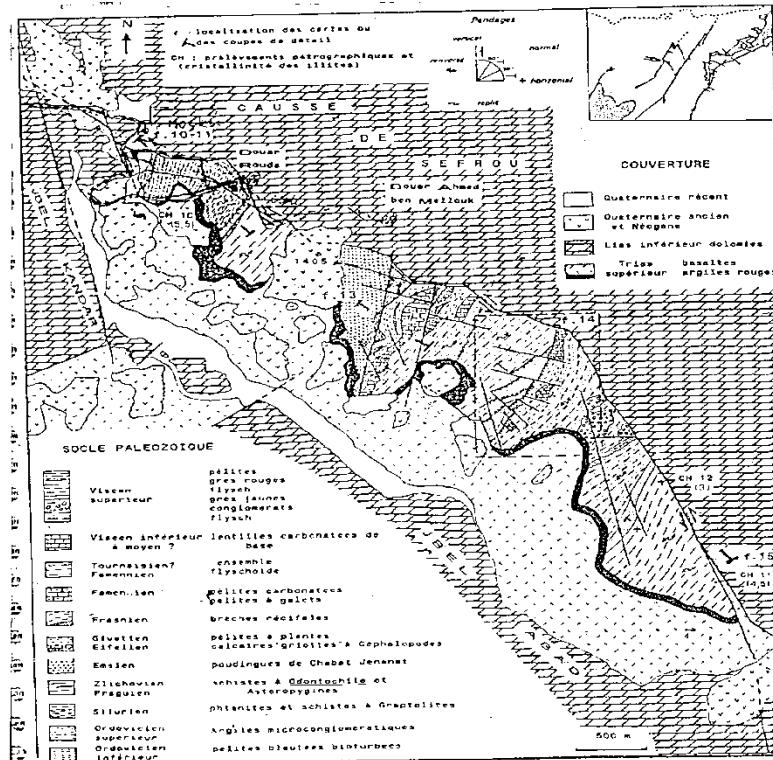
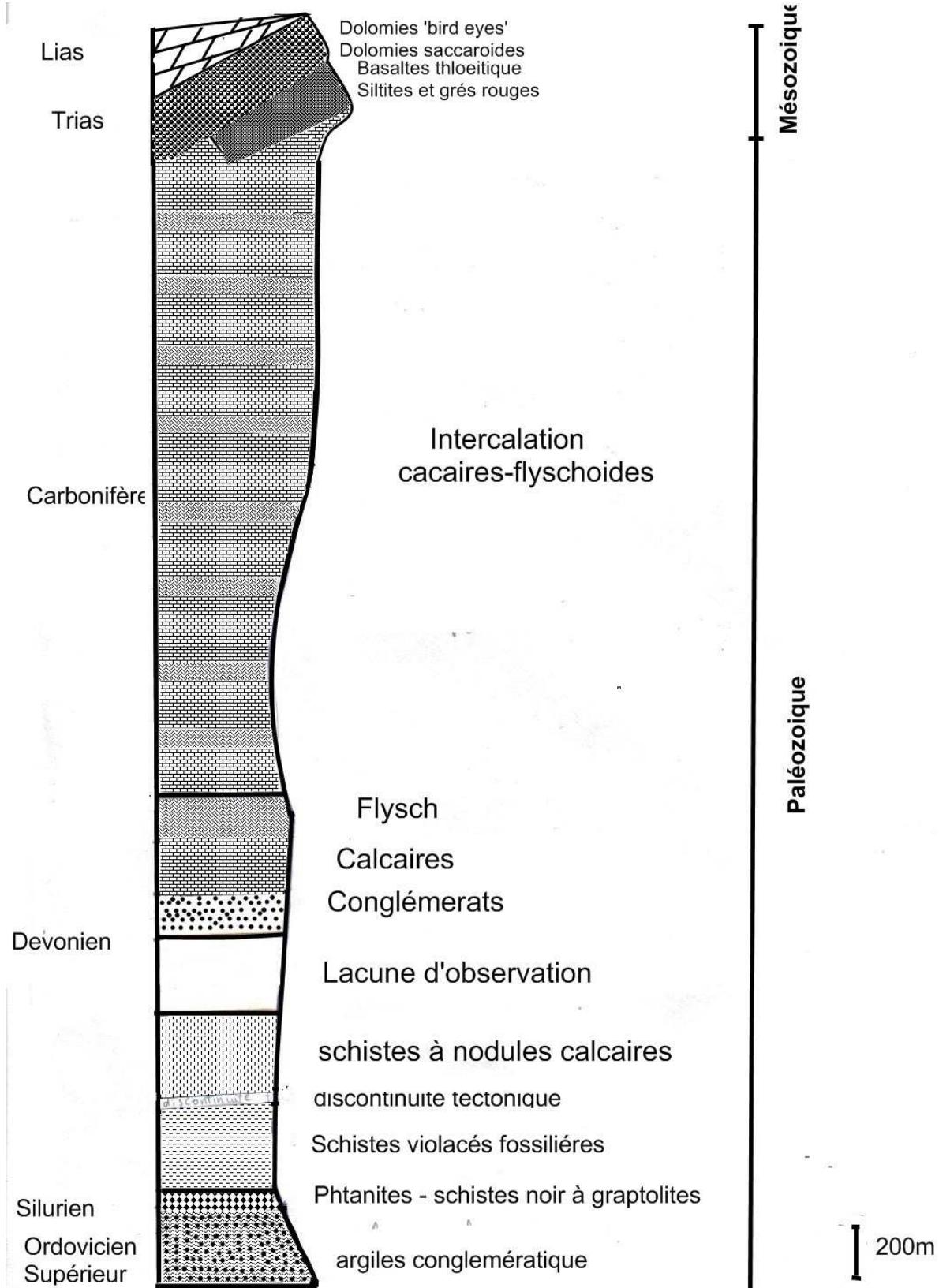


Figure 6 : Carte géologique de la boutonnière de kandar (D'après CHARRIERE, 1990)



Boutonnière de BHALIL :

Situation géographique :

Située dans le Moyen Atlas marocain à 26 km de la ville de Fès, d'environ 6 km² de superficie. Localisé sur le flanc d'une colline constitué uniquement des terrains d'âge viséen.

Cadre géologique :

La boutonnière est localisée sur un horst alpin limité par des failles N20-N40 sub- parallèles aux structures hercyniennes matérialisées par des plis décimétriques à hectométrique. L'affleurement de cette boutonnière est représenté par le viséen.

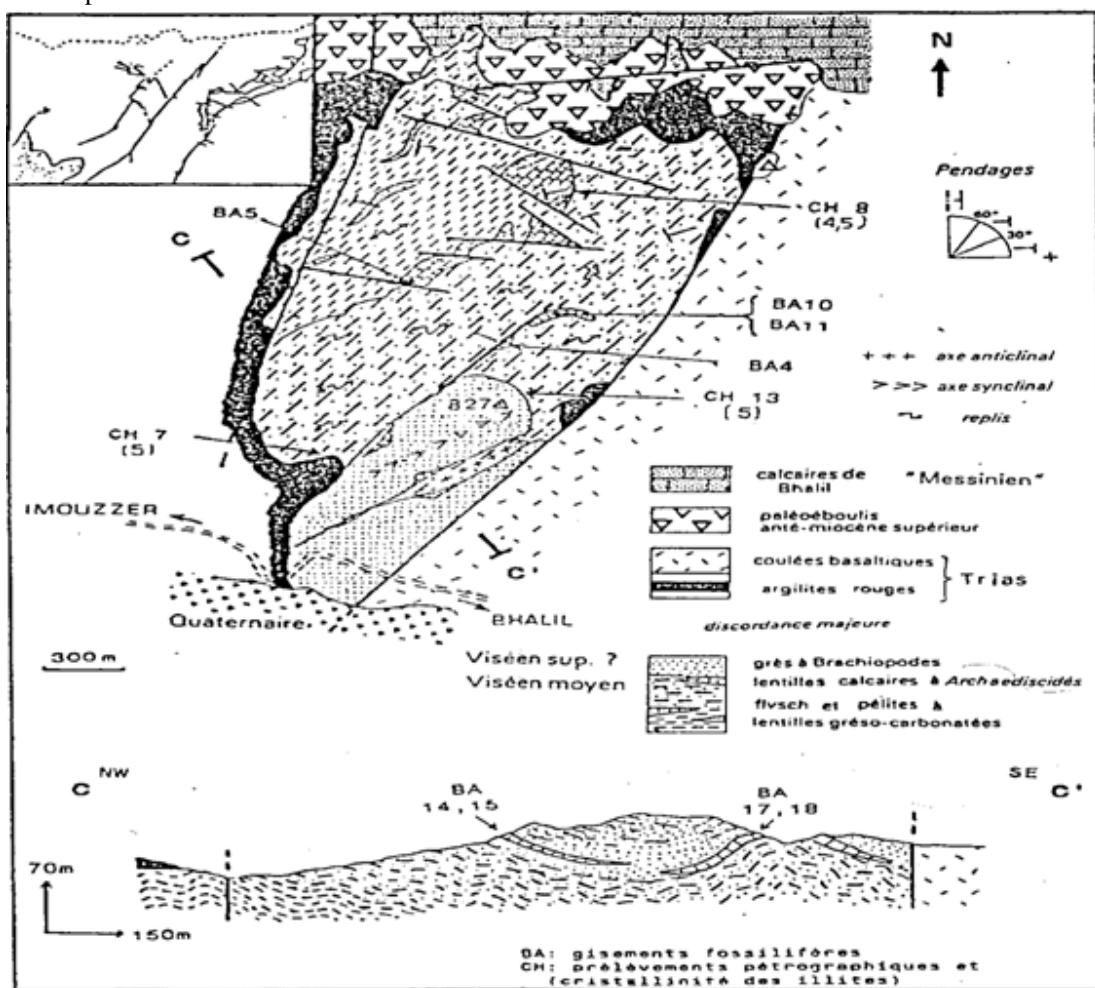


Figure 8 : Carte géologique et coupe de la boutonnière Bhalil (D'après CHARRIERE, 1990)



Figure 9: log stratigraphique de la boutonnière de Bhalil

Zone d'étude : boutonnière de Bni Mellala

Situation géographique :

La station de Bni Mellala est située sur le flanc NW du moyen atlas tabulaire, à quelques kilomètres vers l'Ouest du village de Bhalil.

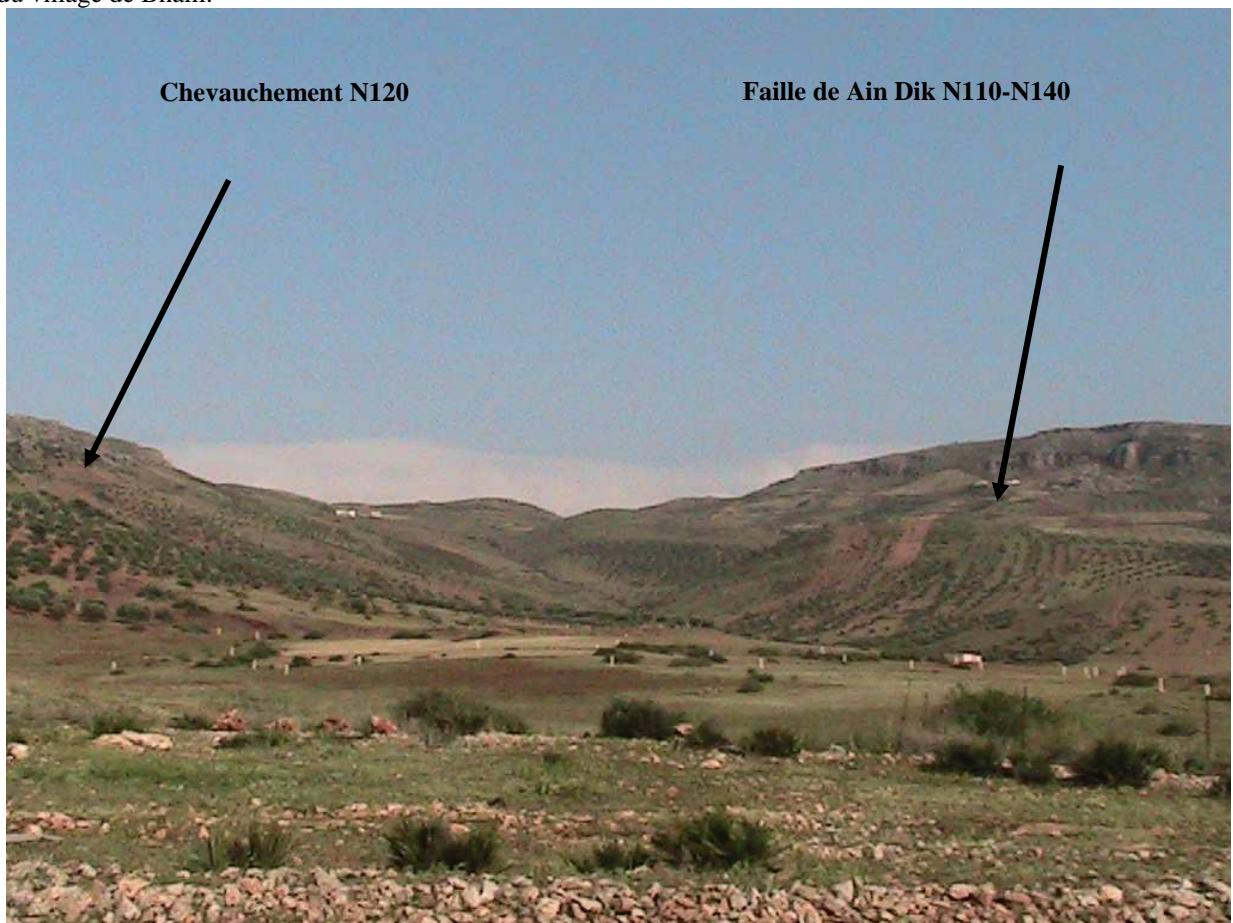


Figure 10 : une photo de la boutonnière de Bni Mellala

Cadre géologique :

La boutonnière occupe la base d'un demi-hors alpin, elle correspond à un affleurement du socle paléozoïque par le jeu polyphasé de failles orientées N110 à N140. La couverture est constitué par un trias argileux et basaltique, et par les dolomies de lias inférieur.

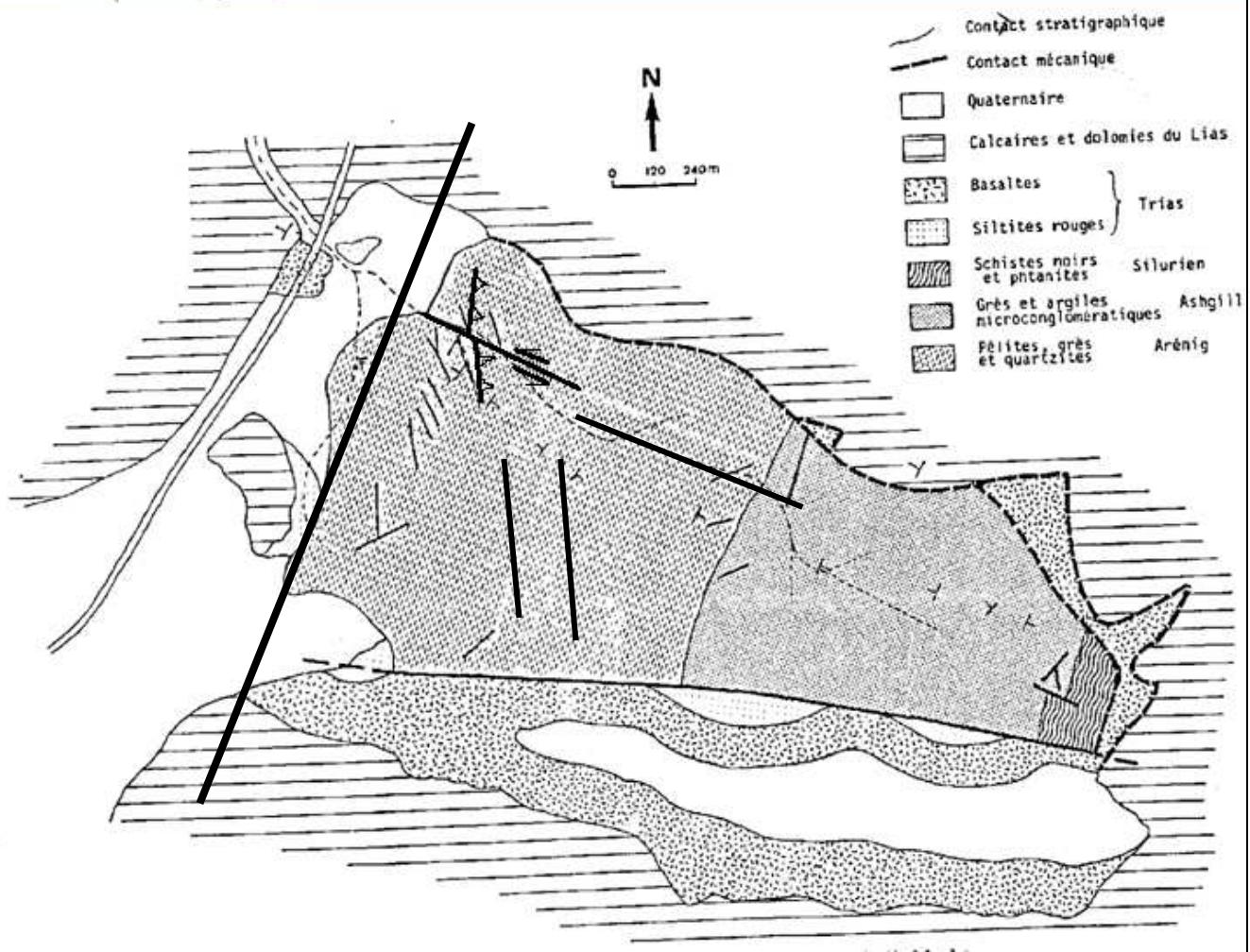


Figure 11 : Carte géologique de la boutonnière Bni Mellala (D'après OUARHACHE, modifié d'après HINAJE ; 2004)

Lithostratigraphie des terrains primaires de la boutonnière :

Formation paléozoïque :

Le paléozoïque représente l'affleurement du socle de cette boutonnière, affleure entre deux failles majeures ; la première situé vers le Nord, correspond à un chevauchement orienté N120 et une deuxième faille situé vers le Sud et possède une direction N125 dont le jeu normal est d'âge miocène supérieur (HINAJE et AL, 2001). La série paléozoïque est épaisse de quelques centaines de mètres, est formée essentiellement par des dépôts détritiques caractérisés par des pélites, pélites gréseuses, grés et quartzite.

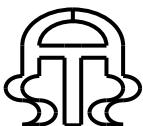
➤ L'Ordovicien

Au niveau de la boutonnière du Bni Mellala affleure le paléozoïque inférieur. La sédimentation est toujours à dominance pélitique ; quelques points de repère permettent de suivre son évolution (CHARRIERE, 1990) :

Ordovicien inférieur (Arenigien-Llanvirnien) : se sont les premiers dépôts silico-clastique associé à des pélites noirs micacées, avec deux faciès principaux :

Schiste vert-olive

Pélites gris bleuté laminées



Ordovicien moyen et supérieur : représentés dans les séries pélitiques rapportés à l'ordovicien inférieur
Ordovicien terminal : sédimentation d'épaisse série détritique à cachet périglaciaire en milieu de plate-forme subsidence.

➤ Le Silurien

Les affleurements siluriens sont d'extension très réduite et se limitent à l'extrême ESE de la boutonnière de Bni Mellala. Les premiers dépôts du silurien sont représentés par des schistes noirs, encadrés par des argiles micro-conglomératiques de l'Ashilgien, au NW et les premiers dépôts de dévonien inférieur au SE.

Silurien inférieur (Llandvorien) : dépôt de l'ordre de mètre, formé de pélites alternant avec des lits de phtanites. Ces faciès distaux se caractérisent par un très faible taux de sédimentation et se poursuivent durant l'essentiel du silurien inférieur.

Silurien supérieur (Wenlockien, Ludlowien) : série monotone d'ampélites riche en faune de graptolites qui traduit la persistance de milieux confinés.

Lithostratigraphie des terrains méso-cénozoïque :

La série lithostratigraphique mésozoïque dans la chaîne atlasique marocaine débute par des dépôts détritiques, des basaltes doléritiques et parfois des évaporites attribués au Trias supérieur – Lias inférieur, se poursuit par des dépôts essentiellement carbonatés au lias, puis détritiques terrigène et carbonatés au dogger et au crétacé.

Les terrains triasiques :

Les dépôts triasiques reposent en discordance angulaire sur un substratum paléozoïque déformé et structuré par plusieurs phases tectoniques (MICHARD 1976, CHARRIERE 1990, HINAJE et al 1992).

Dépôts détritiques de trias inférieur : constitué par un cortège détritique varié contenant de conglomérats emballés dans une matrice argilo-gréseuses à micro-conglomératique, de grés des grés arkosique et feldspathique sont reconnus partout dans le domaine atlasique (CHOUBERT et FAURE-MURET, 1960, 1962). A micro-conglomératique.

Les argilites inférieures : elles reposent sur les dépôts détritiques de base avec un passage progressif des grés et silts aux argiles. La plupart des coupes ne sont pas complètes ; c'est à cause du jeu des argiles.

Les basaltes tholéïtiques : la mise en place des coulées en milieu subaquatique à aérien a conduit à son mélange avec une sédimentation à faciès intertidal à supratidal donnant naissance parfois à un complexe volcanosédimentaire. Les études pétrographiques de ces basaltes ont montré que ces basaltes qu'ils ont une structure doléritique et sub-ophitique, ainsi les études géochimiques ont montré que leur source correspond à un magma tholéïtiques à affinité continentale (Robillard).

Les argiles supérieures : la couche d'argiles rouges se reposent sur le complexe basaltique, ces argiles sont plus ou moins sableuses ou silteuses.

Les terrains jurassiques :

La série jurassique repose en concordance sur les formations rouges du Trias-Lias inférieur. Leur nature lithologique est essentiellement constituée par des dolomies, des calcaires, des alternances marno-calcaire et des dépôts détritiques silico-clastique.

Lias inférieur et moyen : caractérisé par une sédimentation essentiellement carbonatée ou les apports détritiques sont absents ou rares. (HINAJE 2004)

Lias inférieur : les niveaux carbonatés sont de nature dolomitique

Lias moyen : généralement constitué par des calcaires à silex, des calcaires lités et des marno-calcaires alternants.

Lias supérieur : composé essentiellement de marnes grises à intercalation calcaires noduleux et oolithiques, de grés de calcaire gréseux et de marnes gréseuses.



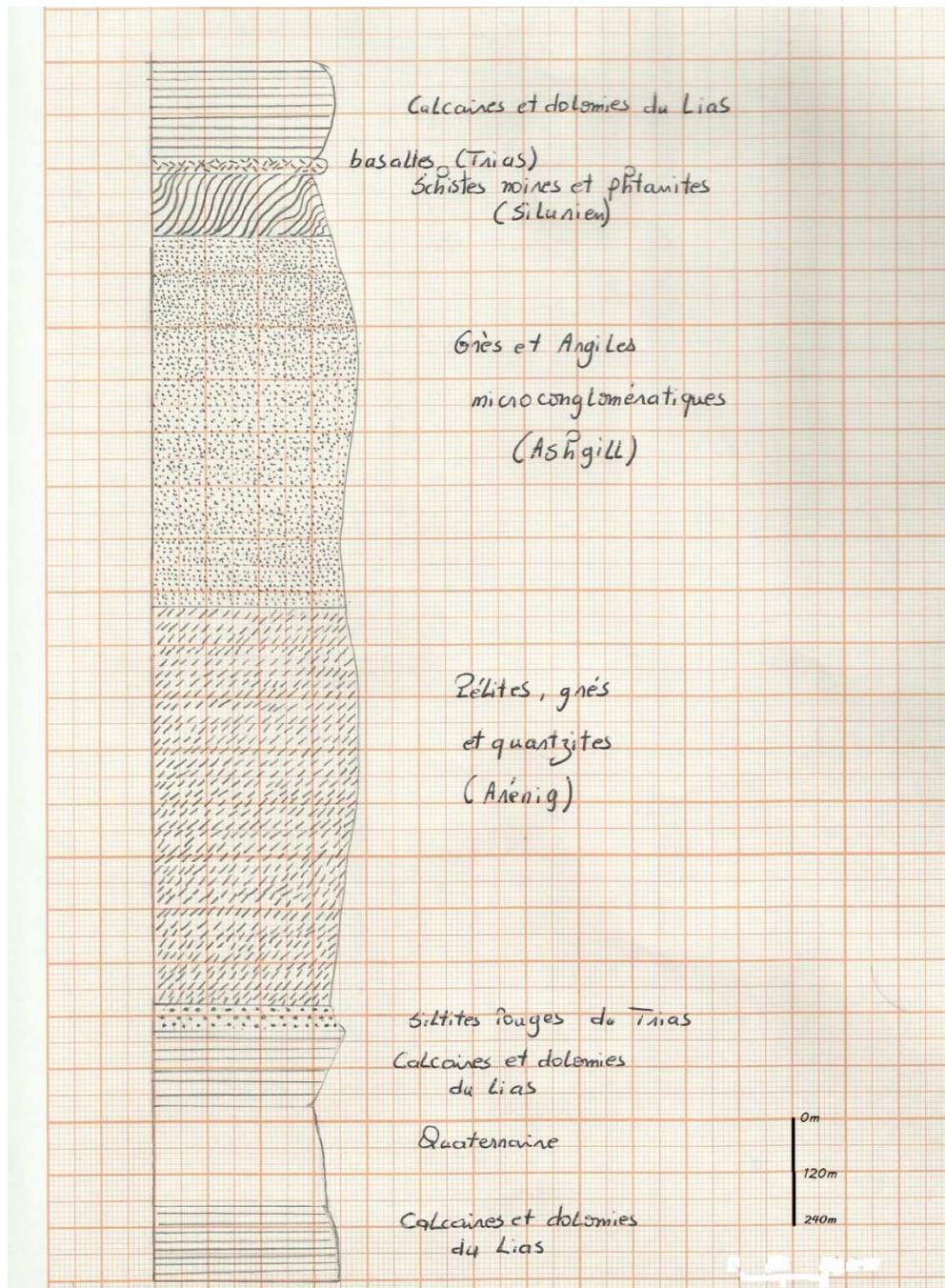


Figure 12 : log stratigraphique de la boutonnière de Bni Mellala

Etude microtectonique

Les phases tectoniques dans la boutonnière de Bni Mellala

Les analyses tectoniques et microtectoniques que nous avons effectuées dans la boutonnière de Bni Mellala située dans la partie septentrionale du Moyen Atlas tabulaire, nous ont permis d'établir la chronologie des différentes phases tectoniques que la zone a subit. Ceci par analyse des terrains paléozoïques et méso-cénozoïques.

Phase 1 : phase tectonique synchrone avec la mise en place des filons de quartz. Cette phase tectonique est divisée en plusieurs épisodes :

- L'épisode tectonique d'âge hercynien (anté-Viséen dans le massif central (d'après Bouabdelli, 1982)), avec un redressement de la contrainte compressive maximale σ_1 : N17, 12° SSW orienté NE-SW et la contrainte minimale σ_3 : N134, 64° NW orienté NW-SE. Le rapport $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = 0,54$

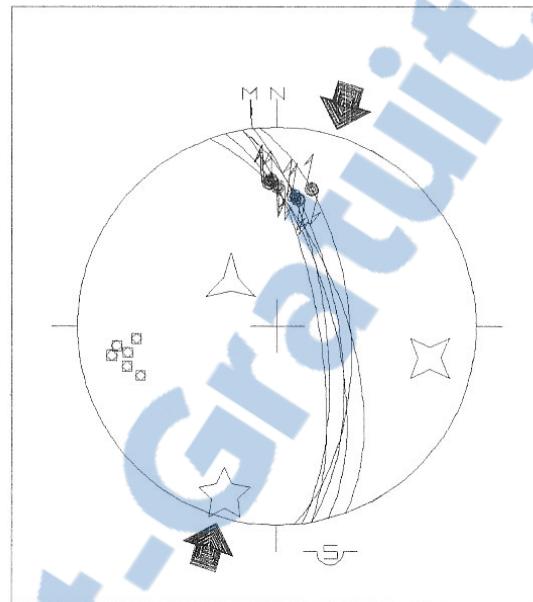


Figure 13 : Les failles inverses à composante décrochant dextre de direction sub-méridienne



Figure 14 : Diapo montrant le jeu lors du premier épisode de cette phase tectonique : plan de faille N170, 65°E pitch 40°N

(Jeu décrochant dextre à composante inverse)

- L'épisode tectonique 2 d'âge probable post Dévonien. Cet épisode tectonique est responsable de la création des failles décrochantes senestres orientées N110. la contrainte compressive σ_1 N81, 12ENE orienté ENE-WSW ; σ_2 : N08, 55SSW ; σ_3 : N164, 33NNW, Le rapport $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = 0,46$.

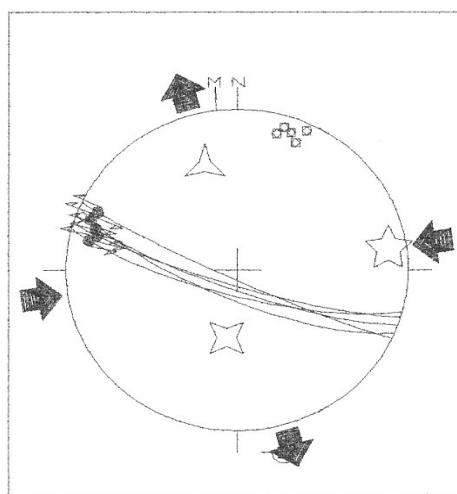


Figure 15 : Décrochements senestres WNW-ESE postérieurs aux décrochements dextres-inverses N170



Figure 16 : Une diapo montrant ce décrochement senestre

- L'épisode tectonique 2 d'âge probable post Dévonien. Cet épisode tectonique est responsable de la création des failles décrochantes senestres orientées N110. la contrainte compressive σ_1 N81, 12ENE orienté ENE-WSW ; σ_2 : N08, 55SSW ; σ_3 : N164, 33NNW, Le rapport $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = 0,46$.

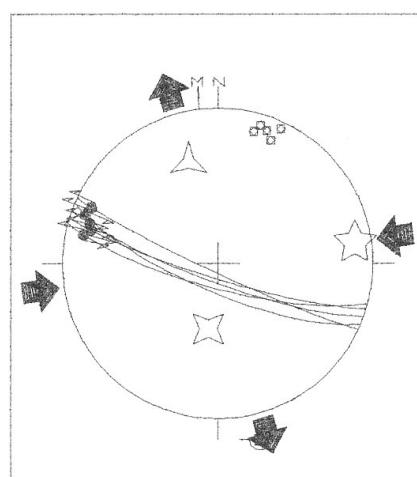


Figure 17 : Décrochements senestres WNW-ESE postérieurs aux décrochements dextres-inverses N170



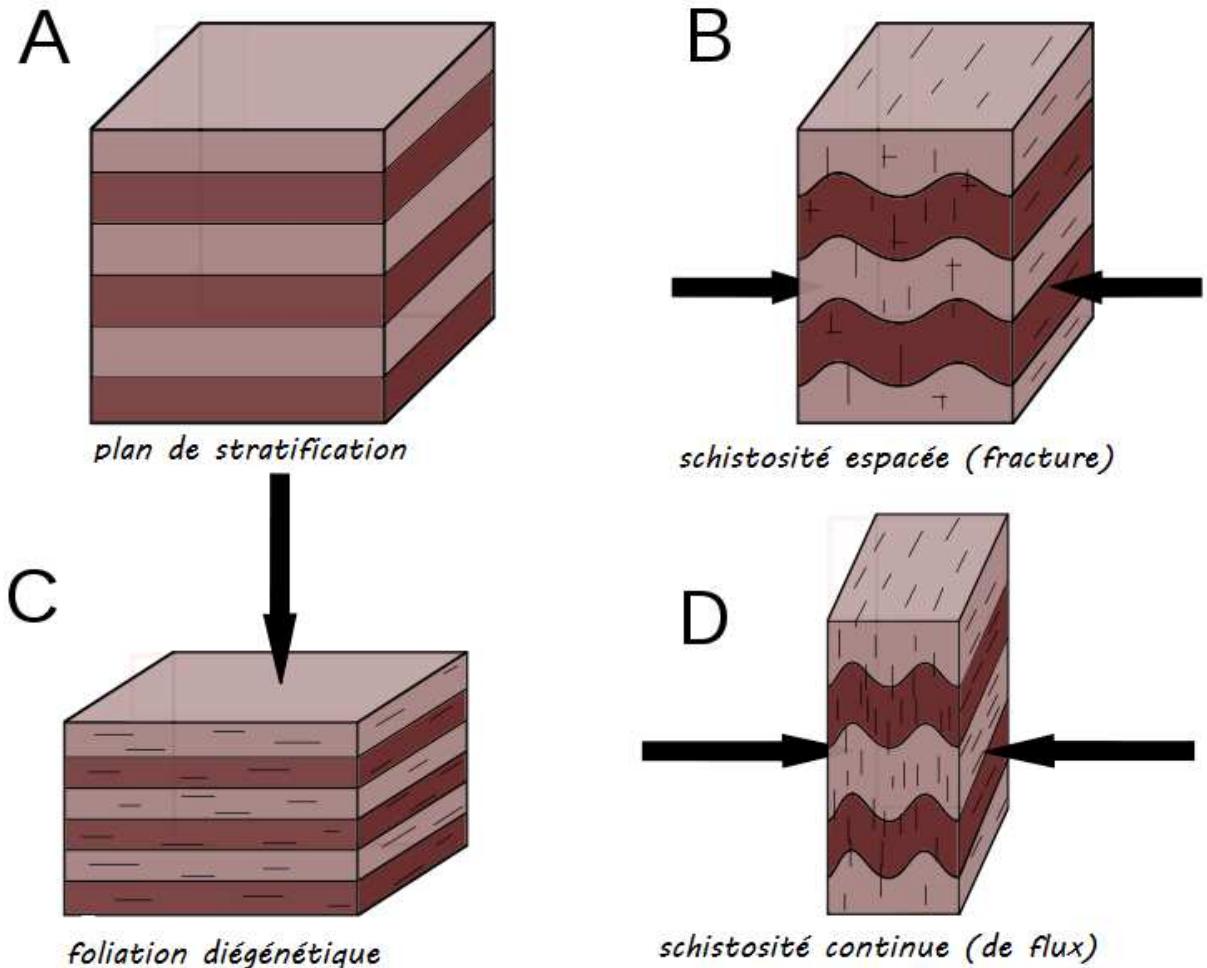


Figure 18 : diapo montrant le décrochement senestre N110

Phase plicative:

La boutonnière Bni Mellala est caractérisée par un ensemble de déformation continue et discontinue. Parmi ces déformations plicatives, on note la schistosité de plan axial qui caractérise les couches plissées et celle liée aux zones de cisaillement.

La schistosité est le « feuillage plus ou moins serré présenté par certaines roches, acquis sous l'influence de contraintes tectoniques, distinct de la stratification, et selon lequel elles peuvent se débiter en lames plus ou épaisses et régulières. La schistosité se forme presque systématiquement dans les roches déformées sous l'action de contraintes tectoniques. Elle est donc un plan d'anisotropie mécanique, parallèle au plan axial des plis. Elle représente le plan d'aplatissement maximum dans ces roches créé à la suite de forces de compression engendrées lors d'une orogenèse. La schistosité est donc une caractéristique plus particulière aux roches à granulométrie plus ou moins fines ou argileuse, dont elle marque l'aplatissement.



La schistosité dominante dans la région de Bni Mellala est la schistosité de fracture (discontinuités disposées en éventail) ; ce type de schistosité est non pénétrative ou espacée, lorsque les plans de schistosité (ou de clivage) sont séparés de quelques millimètres ou plus et délimitent des volumes indemnes de schistosité.

La phase tectonique qui a donné naissance à cette schistosité de fracture à la région de Bni Mellala est la phase plicative ; dont l'axe de compression maximale est orienté NW-SE, compatibles avec une contrainte de compression maximale orientée NW- SE d'âge Hercynien.

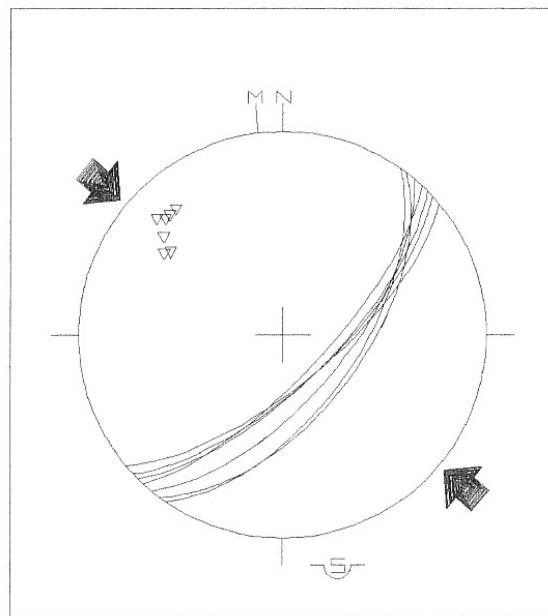


Figure 19 : Traces cyclographiques et traces polaires de la schistosité de fracture NE-SW



Figure 20 : Plan de schistosité dans la boutonnière

Les phases tectoniques alpines ou atlasiques :

Pour notre zone d'étude on s'est intéressées par la phase tectonique de paléogène miocène inférieur qui est représenté par un épisode compressif NE-SW, qui est attesté par des failles chevauchantes orientés N110 à N140 qui affecte le socle paléozoïque et le Trias - Lias. Le jeu de ces failles est compatible avec un état de contrainte compressive telle que l'axe (σ_1) est horizontal et orienté NE-SW et l'axe (σ_3) est vertical.

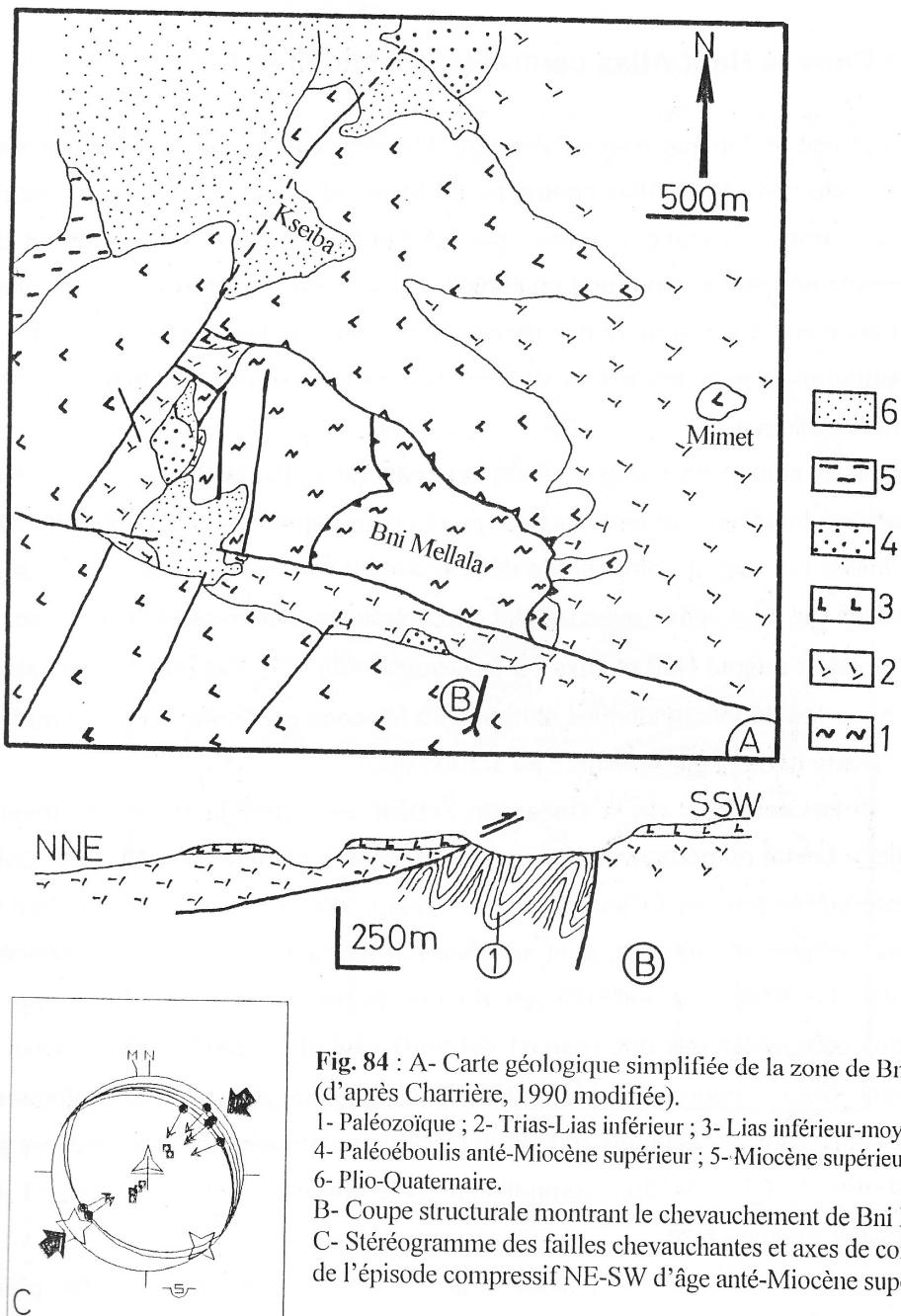


Fig. 84 : A- Carte géologique simplifiée de la zone de Bni Mellala (d'après Charrière, 1990 modifiée).
 1- Paléozoïque ; 2- Trias-Lias inférieur ; 3- Lias inférieur-moyen ;
 4- Paléoéboulis anté-Miocène supérieur ; 5- Miocène supérieur ;
 6- Plio-Quaternaire.
 B- Coupe structurale montrant le chevauchement de Bni Mellala.
 C- Stéréogramme des failles chevauchantes et axes de contraintes de l'épisode compressif NE-SW d'âge anté-Miocène supérieur.

Une deuxième phase est enregistrée par le jeu normal de la faille de Ain Dik orientée N120, lors d'une extension NE-SW au Miocène supérieur (Hinaje et al., 2002).

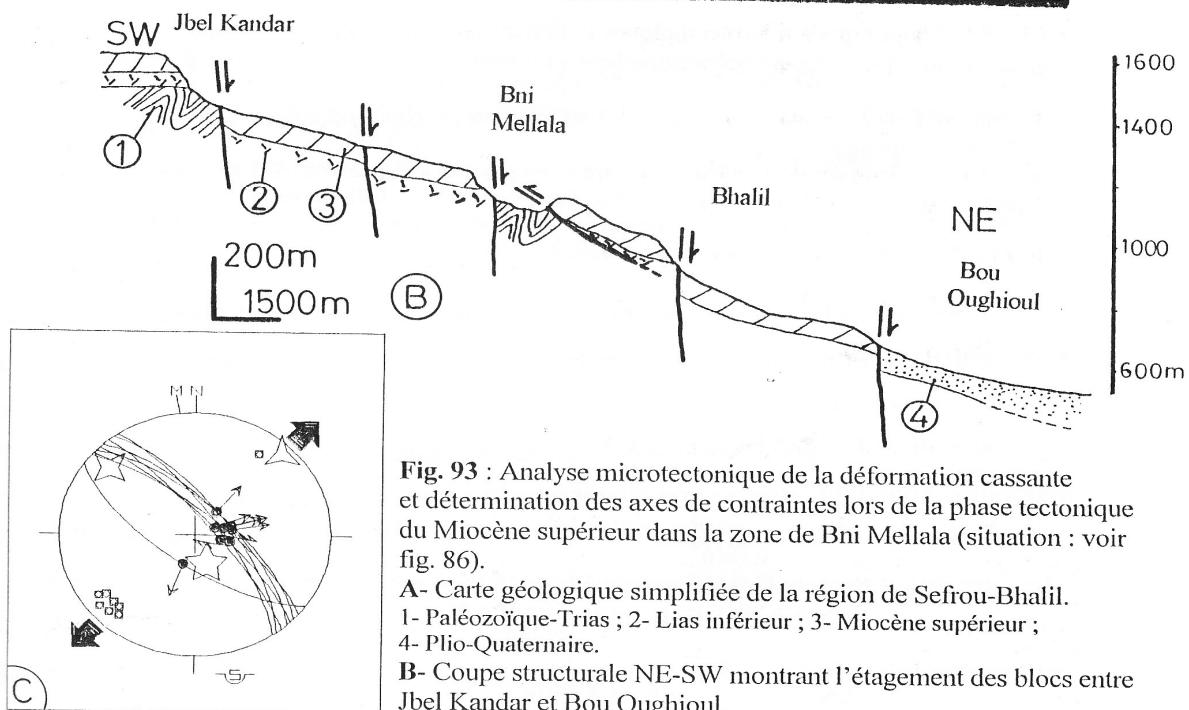
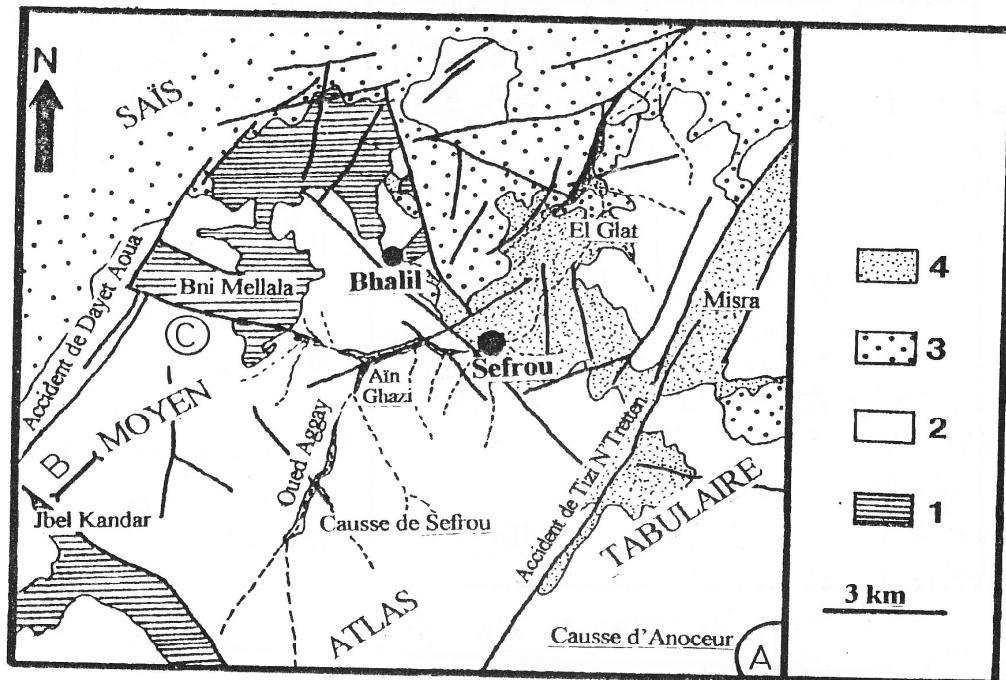


Fig. 93 : Analyse microtectonique de la déformation cassante et détermination des axes de contraintes lors de la phase tectonique du Miocène supérieur dans la zone de Bni Mellala (situation : voir fig. 86).

A- Carte géologique simplifiée de la région de Sefrou-Bhalil.
1- Paléozoïque-Trias ; 2- Lias inférieur ; 3- Miocène supérieur ;
4- Plio-Quaternaire.

B- Coupe structurale NE-SW montrant l'étagement des blocs entre Jbel Kandar et Bou Oughiou.

1- socle paléozoïque ; 2- Trias-Infra Lias ; 3- Lias inférieur ;
4- Miocène supérieur et Plio-Quaternaire.

C- Stéréogramme des failles normales NW-SE responsables de l'effondrement vers le NE au Miocène supérieur.

La troisième phase tectonique qui a structuré la zone, correspond à une compression NW-SE reconnue aussi à l'échelle de tout le Moyen Atlas.

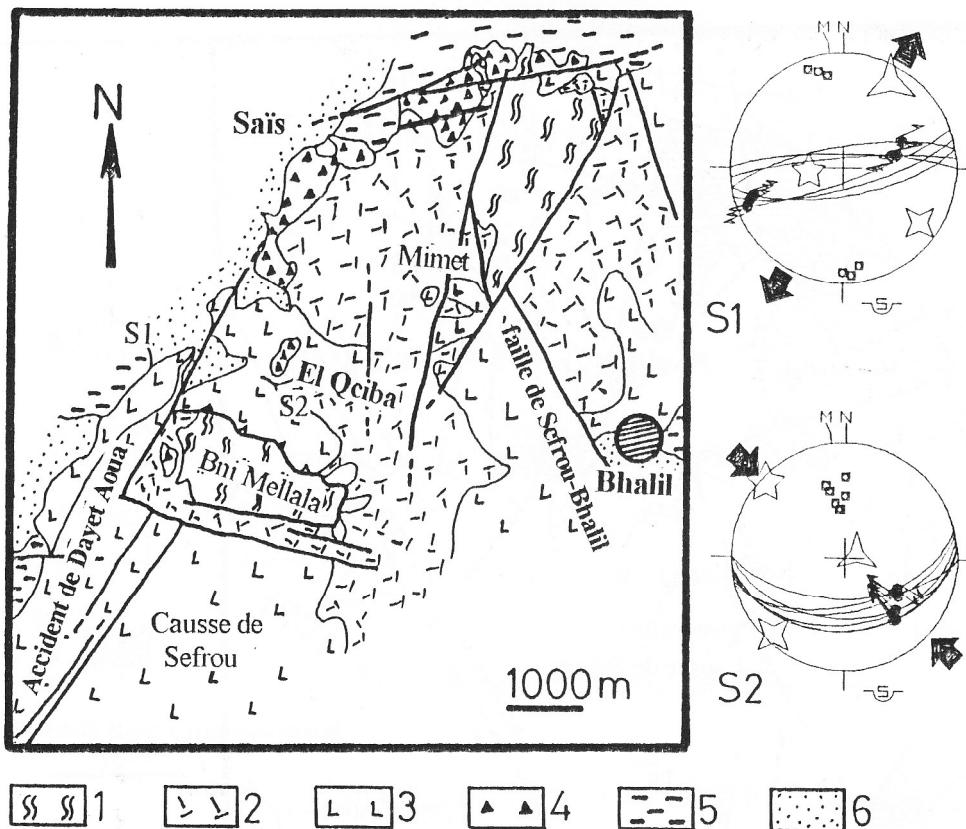


Fig. 94 : Diagrammes microtectoniques et détermination des directions des contraintes lors de la phase tectonique d'âge Miocène supérieur – Pliocène inférieur dans la vallée d'El Qciba.

1- Paléozoïque ; 2- Trias-Lias inférieur ; 3- Lias inférieur ; 4- éboulis et collapses anté-Miocène supérieur ; 5- Miocène supérieur ; 6- Plio-Quaternaire.

S1 : stéréogramme des décrochements dextre à composante normale ENE-WSW et axes de contraintes de l'épisode extensif du Miocène supérieur. S2 : stéréogramme des failles inverses à composante décrochante dextre ENE-WSW lors de l'épisode compressif du Miocène supérieur-Pliocène inférieur.
(Carte géologique : d'après Charrière, 1990 modifiée).

L'utilisation des schistes de la boutonnière de Bni Mellala dans la fabrication des ciments

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production et des contrôles rigoureux et continus de la qualité.

Le ciment est un liant hydraulique, c'est à dire une matière inorganique finement moulue qui gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réaction et processus d'hydratation. Après durcissement, le ciment conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Méthode de fabrication de ciments

Pour produire du ciment des qualités constantes, les matières premières doivent être soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps.

L'obtention du ciment peut se schématiser comme suit :



Extraction -Concassage

- Extraction de la matière première

Matière première naturelles :

Chaque cimenterie obtient une carrière de calcaire lacustre; Holcim de Fès a un gisement de calcaire qui se situe près de l'usine .L'extraction se fait à partir d'un abattage à l'explosif à ciel ouvert, le pourcentage du calcaire dans la production peut atteindre 80%.

La carrière du schiste est située à 45 Km du site de l'usine, (dans la boutonnière Bni Mellala). L'extraction est sous-traitée et le pourcentage peut aller de 13 à 14%.

Les autres matières dites de correction, le sable et le minerai de fer sont utilisées à hauteur de 4% et 1.8% respectivement.

La production du ciment nécessite d'abord la production d'un produit semi-fini de base «le Clinker », qui subira en suite des transformations jusqu'au produit fini : « le ciment ».

Pour les autres matières premières : pélites, phtanites, minerai de fer sont délivrées à l'usine par un fournisseur et dans le cas échéant celui-ci est de l'extérieur.

L'extraction de la roche calcaire se fait par tirs de mines et l'exploitation de la carrière porte sur plusieurs fronts de manière à respecter le plan d'exploitation qui a été élaboré suite à une modélisation géologique réalisée sur la base des données de sondages carottés.



Figure 21 : L'extraction de la roche calcaire



Figure 22 : La carrière des schistes située dans la boutonnière de Bni Mellala



Figure 23 : méthode de tire utilisée pour l'extraction de carrière

Matières premières extraites des déchets :

Pour des raisons environnementales les chercheurs pensent à substituer les matières premières naturelles par des matériaux issus des déchets riches en oxyde de calcium (CaO) plutôt en carbonate de calcium (CaCO₃).

On cite, à titre indicatif, les cendres volantes et le laitier réduisent l'émission de CO₂ provenant de la fabrication du ciment. Les chercheurs ont prouvé, aussi, que le fer de laitier et de l'acier peuvent être utilisés comme matière première pour la fabrication de ciment portland.

D'autres recherches ont montré que des ciments spéciaux peuvent être synthétisés à partir de déchets des matériaux tels que la boue rouge (à partir de l'aluminium, l'oxyde de silicium contenant principalement, l'oxyde d'aluminium, et l'oxyde de fer).

Concassage :

C'est une opération qui consiste à réduire la granulométrie de la matière première en fragments de faibles dimensions (25 à 40 mm). Elle assure également un certain mélange des matières premières arrivant de la carrière (calcaire et schiste).

La matière passe par deux étapes de concassage, dont le premier est un concasseur à mâchoires et le second un concasseur à marteaux.

Préparation de matière première (crue) :

L'objectif de préparation du cru est de constituer un mélange finale (farine) intime de calcaire, pélite et minerai de fer dont les modules chimiques et minéralogiques (C₃S ,LSF,MS et A/F) ainsi que la finesse de broyage sont fixés au préalable comme consignes, qui permettent de maîtriser la qualité du clinker correspondant.

La composition du cru reste dans des proportions bien définies :

- **Carbonate de calcium (CaCO₃) : de 77 à 83 %**
- **Silice (SiO₂) : de 13 à 14 %**
- **Alumine (AL₂O₃) : de 2 à 4 %**
- **Oxyde ferrique (Fe₂O₃) : de 1,5 à 3 %**

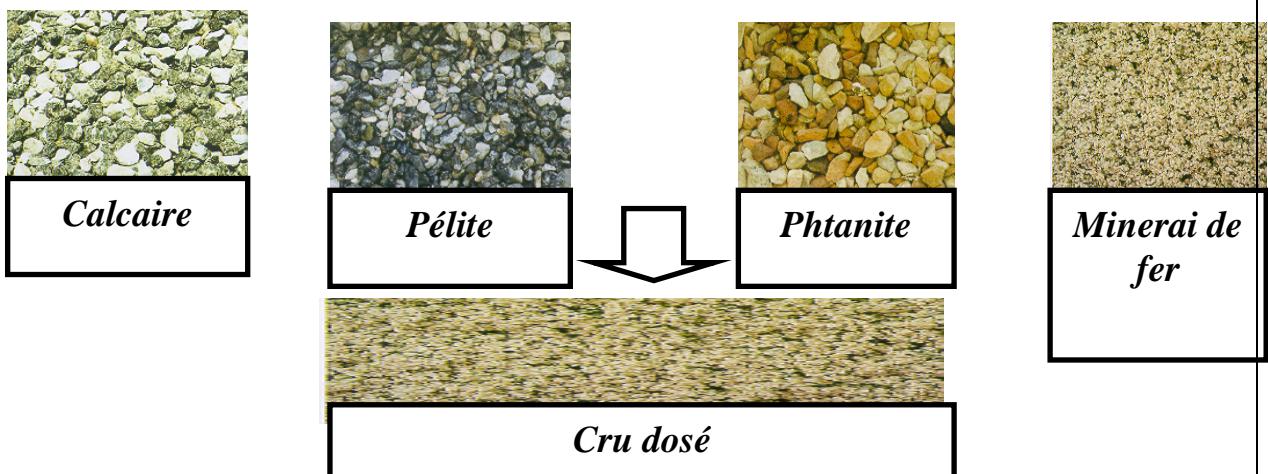


Figure 24 : un sillon de minéraux utilisé à la fabrication de crue

La roche est échantillonnée en continu pour déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice).

Pré homogénéisation :

La phase de pré homogénéisation consiste à créer un mélange homogène. Un stock de pré homogénéisation est en général constitué de 2 tas (un en construction et l'autre en consommation) de matière concassée de granulométrie 30 mm. Cette opération est réalisée dans un hall pour aboutir à un mélange pré homogène en disposant la matière en couches horizontales superposées (on parle de tas en constitution), puis en la reprenant verticalement (le tas en consommation) .

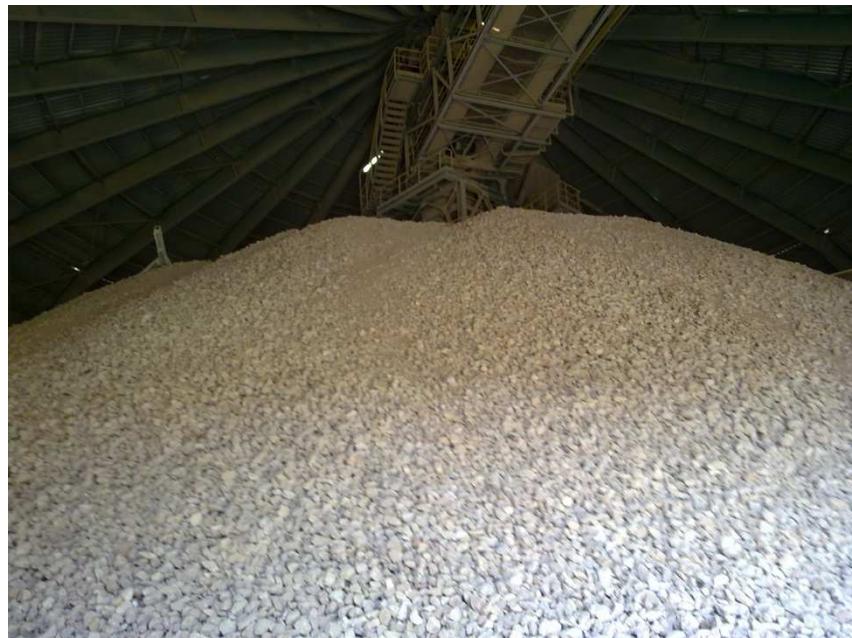


Figure 25 : Parc de pré-homogénéisation

Broyage de la matière première :

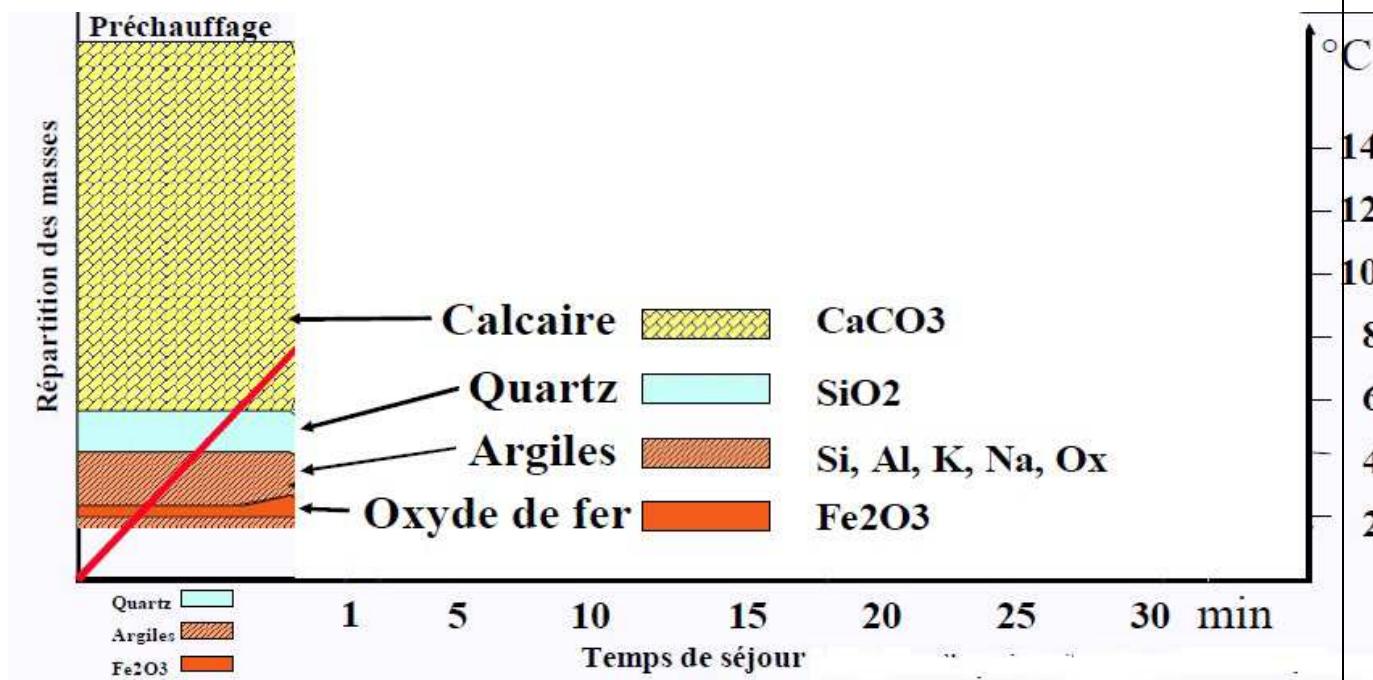
Les matières premières constituant le cru doivent être finement broyés dans des broyeurs à meules verticaux qui sont plus récents et plus économies en énergie afin d'obtenir la farine. Celle-ci peut être introduite directement dans le four sous forme de pulvérulente.



Figure 26 : Broyeur crue

Cuisson de la farine :

La cuisson recouvre toutes les étapes de transformation chimique de la farine crue, jusqu'à la formation du clinker.



A la cuisson, les composants du mélange, cru se décomposent et en se recombinant entre eux, ils forment de nouvelles liaison minérales : ce sont les minéraux du clinker.

La clinkérisation se fait suivant ces étapes :

La ligne de cuisson se déroule dans 4 étapes :

- Évaporation entre 100°C et 450°C
- Décarbonatation entre 450°C et 900°C
- Clinkerisation entre 900°C et 1450°C
- Refroidissement de 1450°C à 100°C

Les principales phases présentes dans les ciments anhydres Portland sont :

- L'alite (forme impure de silicate tricalcique : Ca₃SiO₅, noté C₃S),

$$3 \text{ CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow 3 \text{ CaO, SiO}$$
- La bélite (forme impure de silicate dicalcique : Ca₂SiO₄, noté C₂S),

$$2 \text{ CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow 2 \text{ CaO, SiO}_2$$
- Les alumates tricalciques (Ca₃Al₂O₆, noté C₃A), les alumino-ferrites calciques

$$3 \text{ CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 3 \text{ CaO, Al}_2\text{O}_3$$



Figure 27 : Four rotatif pour la cuisson de Clinker

Refroidissement :

Le clinker produit est trempé (refroidissement rapide) par refroidisseur à grille, la température passe de 1450°C à 100°C par soufflage d'air.

Le processus de refroidissement après cuisson a un rôle très important sur la forme et la rétivité des constituants du clinker, il évite la décomposition de C3S en C2S, la précipitation de MgO sous forme de gros cristaux et le changement de la forme cristalline de C2S qui provoque la modification des propriétés hydraulique du ciment.



Figure 28 : Clinker après cuisson

Préparation du ciment : Broyage de clinker

Après refroidissement, le «clinker» se présente sous forme de nodules gris foncés d'environ 2 cm de diamètre. Pour la fabrication du ciment, le «clinker» doit être broyé à une finesse inférieure à 40 microns. Selon la qualité de ciment souhaitée et en conformité avec les normes marocaines NM 10.01.F.004 on peut ajouter dans des proportions bien définies des matières d'addition telles que le gypse qui est un régulateur de prise.

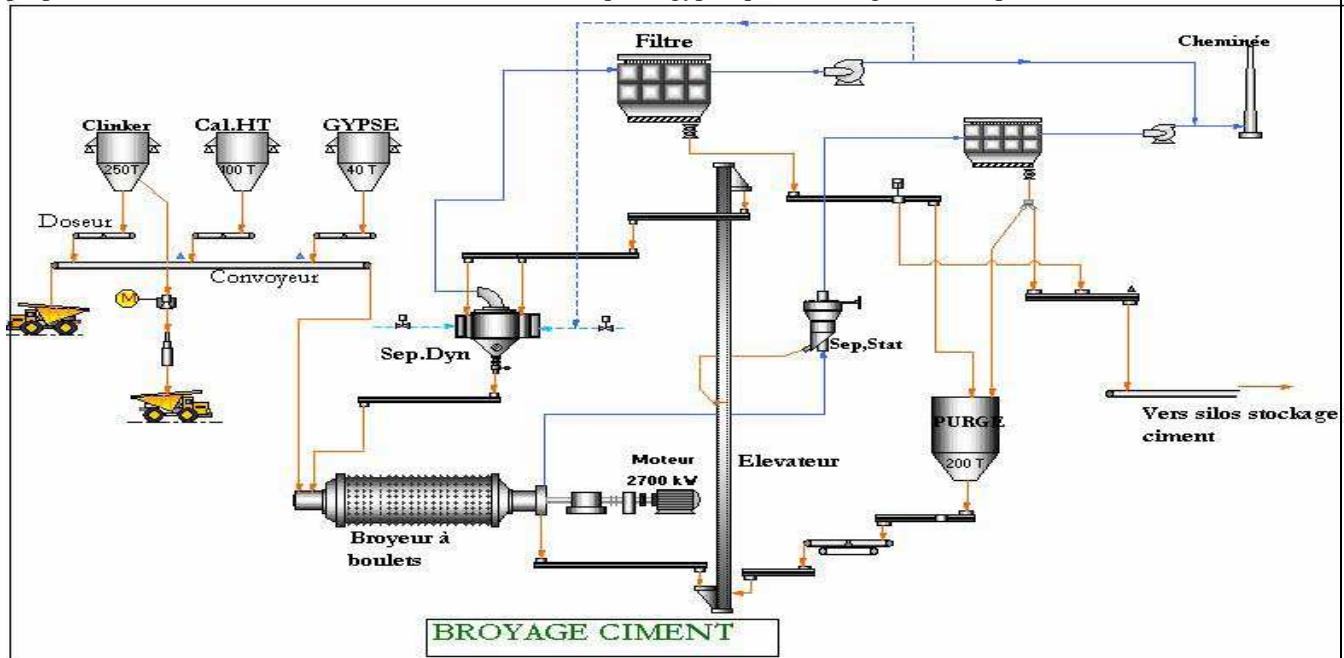


Figure 29 : Schéma du broyage du Clinker

Stockage et expédition du ciment :

Stockage du ciment :

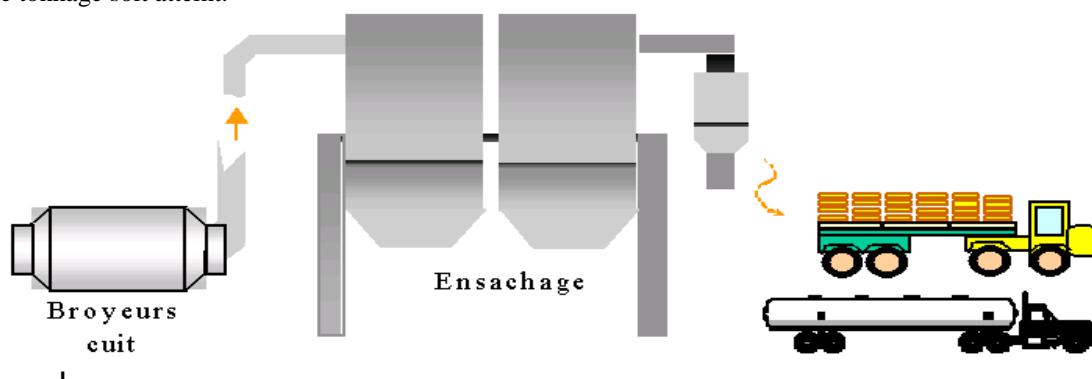
Les fines du ciment sont acheminées depuis le séparateur au moyen d'air, jusqu'au filtre à manches, elles sont collectées et transportées par aérogisseur, ses rotatifs, convoyeur à bande et élévateur à godets jusqu'au silo.

Expédition :

Les ciments quittent l'usine en sacs ou en vrac

En sac : les sacs contiennent 50 Kg de ciment sur lesquels est marquée la classe de résistance du ciment (35 ou 45)

En vrac : la livraison du ciment en vrac se fait sur des citerne. Le ciment est injecté dans la citerne jusqu'à ce que le tonnage soit atteint.





Le but de l'utilisation des schistes dans la fabrication des ciments

Toutes les cimenteries commencent à utiliser les schistes comme matière première à la fabrication des ciments et surtout les schistes calcinés qui contient des phases du clinker, principalement du silicate bicalcique et de l'aluminate monocalcique. Il contient également, outre de petites quantités de chaux libre et de sulfate de calcium, des quantités plus importantes d'oxydes réagissant de façon pouzzolanique, notamment SiO_2 .

• Propriétés chimiques des schistes calcinés :

Il contient également, de petites quantités de chaux libre et de sulfate de calcium, des quantités plus importantes d'oxydes réagissant de façon pouzzolanique, notamment SiO_2 , Al_2 , Fe , MgO Les schistes calcinés contiennent principalement du silicate bicalcique (C_2S) et de l'aluminate monocalcique (CA) ainsi que des petites quantités de chaux libre (CaO), de sulfate de calcium et de silice.

Désignation des Minéraux purs	Formules	Abréviation	Désignation Dans le clinker	Caractéristique
Silicate Tricalcique	$3(\text{CaO})\text{SiO}_2$	C_3S	Alite	Constituant principal (50% à 65%) : permet l'obtention de résistances élevées à court et moyen terme.
Silicate Bicalcique	$2(\text{CaO})\text{SiO}_2$	C_2S	Bélite	Il génère des résistances plutôt à long terme (15% à 20%)
Aluminate tricalcique	$3(\text{CaO})\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Elite	Il fait prise instantanément. proportion joue donc sur le temps de prise du ciment (8% à 12%)
Alumino-ferrique tétracalcique	$4(\text{CaO})\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	Felite	Constituant inerte inclus par les oxydes de fer et confère au ciment sa couleur grise (6% à 10%).

Figure 30 : Les différents éléments chimiques constituant le Clinker

• Propriétés physiques :

Les schistes calcinés acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques lorsqu'ils sont activés thermiquement c'est notamment à une température d'environ 800°C. Les schistes calcinés contiennent principalement du silicate bicalcique (C_2S) et de l'aluminate monocalcique (CA) ainsi que des petites quantités de chaux libre (CaO), de sulfate de calcium et de silice. Ces ajouts finement broyés ont de fortes propriétés hydrauliques couplées à des propriétés pouzzolaniques ; améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables :

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une très nette amélioration de la résistance des ciments aux eaux douces.



Généralement l'utilisation des schistes à la fabrication des ciments économise la quantité de calcaire utilisé à la fabrication de clinker qui a lieu dans le four produit du CO₂. Ces émissions résultent du procédé de calcination de la pierre calcaire. Les émissions sont pour la plupart directement proportionnelles à la teneur en CaO et en MgO du clinker (qui varie en fonction du type de pierre calcaire utilisée comme matière première) et elles devraient être fondées sur la quantité de clinker produit (par opposition à la quantité de ciment produit puisque les émissions ont lieu en réalité pendant la production du clinker).

Conclusion Générale :

Ce travail a pour but d'étudier la géologie de la boutonnière de Bni Mellala constitué par un socle paléozoïque qui a enregistré plusieurs phases tectoniques. Celles-ci ont donné naissance à des failles inverses décrochantes, des décrochements, des filons de silice sur failles et une schistosité de fracture. La couverture mésozoïque est formée par les argiles rouges et les basaltes du Trias supérieur, les dolomies de Lias inférieur, les paléo-éboulis et les silts du Miocène ; et les dépôts détritiques du Quaternaire.

Dans les terrains d'âge Ordovicien, on exploite les schistes sous forme de carrière à ciel ouvert, pour la fabrication du ciment par l'usine qui se situe à Ras El Maa. L'utilisation de ces schistes dans la fabrication des ciments a pour but d'économiser la proportion de calcaire dans le Clinker, et par la suite minimiser le coût de fabrication ainsi que de réduire la libération de CO₂ dans l'atmosphère.