



*Département de l'Environnement*

# Diplôme Universitaire de Technologie Génie Minéral et Environnement

## PROJET TUTOIRE

Etude des filons hydrothermaux de quartz liés aux failles hercyniennes de la boutonnière de Bni Mellala (MOYEN ATLAS, MAROC)

Réalisé par : GUERRAOUI Loubna  
ZEHIRI Amina  
ALAOUI BALGHITI Omar

Encadré par Mr. S. HINAJE

Jury et Date de Soutenance : Le 04 Avril 2013

Pr. Charroud M.	EXAMINATEUR
Pr. Hinaje S.	TUTEUR
Pr. El Azzab D.	EXAMINATEUR

Année universitaire 2012 - 2013



# Remerciement

Au terme de cette recherche, nous voudrions exprimer nos remerciements à tous ceux qui y ont contribué et qui ont bien voulu nous apporter leur aide pour l'élaboration de ce travail.

Ils trouveront ici l'expression de notre respectueuse gratitude en particulier :

**Mr. Saïd HINAJE** : Professeur à la faculté des sciences et techniques à Fès.

Nous tenons aussi à vous exprimer nos vifs remerciements d'avoir dirigé ce travail avec beaucoup d'intérêt, de patience et de compréhension.

Permettez nous de vous exprimer notre gratitude et notre reconnaissance pour votre disponibilité, vos conseils, votre aide et compréhension.

**Mr. M. ZOUAK** le Doyen de FST Fès et tout le corps administratif, qui nous ont offert l'occasion d'être des étudiants dans notre établissement.

On remercie aussi : **Mr. Charroud M.** et **Mr. El Azzab D.** comme étant membre de jury de leur présence

On exprime également nos gratitude à l'ensemble du corps enseignant du département de l'environnement et ressource humains de la faculté des sciences et techniques Saïss et celui de la faculté des sciences Dhar Imahraz de leur accueil et de leurs aides, pour avoir porté un vif intérêt à notre formation, et pour avoir accordé la plus claire de leur temps, leur attention et leur énergie, dans un cadre très agréable de complicité et de respect.

Enfin, nos remerciements à nos familles et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.



# SOMMAIRE

CHAPITRE.I : GENERALITE SUR LA GEOLOGIE DU MAROC.....	6
I. Les grands traits structuraux du Maroc.....	8
1)- Domaine Anti Atlasique et Saharien.....	8
2)-Domaine Atlaso-mésitien.....	10
3)-Domaine Rifain.....	11
II. Les grands ensembles structuraux du Moyen Atlas.....	12
1)- Evolution générale du Moyen Atlas.....	13
1-1).Le rifting moyen atlasique.....	13
a-).Au Trias supérieur-Lias inférieur.....	13
b-).Au Lias Moyen.....	14
c-).Au Jurassique moyen et supérieur.....	14
1-2). L'inversion tectonique et l'édification de la chaîne moyenne atlasique.....	16
1-3) Les accidents majeurs dans le Moyen Atlas.....	17
2)- Moyen Atlas Plissé.....	18
3)- Moyen Atlas Tabulaire.....	19



---

CHAPITRE.II : LA BOUTONNIERE DE BENI MELLALA.....	20
1)- Situation géographique et cadre géologique.....	21
2)- la stratigraphie.....	23
3)- La structure.....	28
4)- La microtectonique.....	29
CHAPITRE.III : LES FILONS DE QUARTZ HYDROTHERMALES.....	37
1)-les étapes de la formation des filons.....	38
1-1).Phase1 : Fracturation du socle.....	38
1-2).Phase2 : Circulations hydrothermales de hautes et moyennes températures..	39
2)-Relation entre fracturation et minéralisation.....	40
2-1) Les phases tectoniques liées à la minéralisation de quartz .....	40
3)- L'utilisation de la silice dans l'industrie.....	43
3-1). Peintures et plastiques, .....	43
3-2). Verre.....	44
3-3). Pièces de fonderie.....	44
3-4).Filtration.....	44
3-5). Produits de construction et matières premières.....	44
3-6). Sports.....	45
3-7). Application dans l'exploitation pétrolière.....	45
3-9). Secteur chimique.....	45
3-10). Industrie métallurgique (Panneaux solaires) .....	46
CONCLUSION.....	47
BIBLIOGRAPHIE.....	48



# Liste des figures

<b>Fig.1 : Carte géologique du Maroc .....</b>	<b>7</b>
<b>Fig2 : Carte structural de l'Anti Atlas d'après.....</b>	<b>9</b>
<b>Fig3: carte géologique montrant le domaine atlaso-mésétien.....</b>	<b>10</b>
<b>Fig : 4 Carte géologique du domaine rifain.....</b>	<b>11</b>
<b>Fig5 : Carte géologique du moyen atlas.....</b>	<b>12</b>
<b>Fig.6 : Log stratigraphique du rifting triasico-liasique du moyes atlas.....</b>	<b>13</b>
<b>Fig 7 : Carte géologique simplifiée du Moyen Atlas.....</b>	<b>18</b>
<b>Fig. 8 : croquis de l'emplacement de la boutonnière de Beni Mellala sur l'image satellitaire.....</b>	<b>21</b>
<b>Fig. 9 : Carte schématique de la boutonnière de Beni Mellala.....</b>	<b>22</b>
<b>Fig. 10 : Photo qui montre les dépôts de la couverture Triasico-Liasique.....</b>	<b>26</b>
<b>Fi g. 11 : Log stratigraphique du primaire de la Boutonnière de Beni Mellala.....</b>	<b>27</b>
<b>Fig. 12 : Jeu inverse N170, à composante décrochant dextre, sub-méridiennes.....</b>	<b>30</b>
<b>Fig. 13 : Stéréogramme des décrochements sub-méridiens dextres.....</b>	<b>31</b>
<b>Fig. 14 : Stéréogramme des décrochements senestres WNW-ESE qui décalent les filons de quartz sur failles .....</b>	<b>32</b>
<b>Fig. 15 : stéréogramme des décrochements senestres NNE-SSW accompagnés de fentes a quartz subméridiennes .....</b>	<b>33</b>
<b>Fig.16 : compression N45 associée à l'extension N135 représenté par des fentes de tension à Quartz dans l'Ordovicien de la boutonnière de Beni Mellala.....</b>	<b>34</b>
<b>Fig. 17 : compression NW-SE associée à l'extension NE-SW représentée par des fentes à Quartz dans le quartzite d'âge Ordovicien inférieur.....</b>	<b>35</b>
<b>Fig. 18. : Compression N-S associée à l'extension E-W représentée par des fentes de tension à Quartz dans l'ordovicien de la Boutonnière de Beni Mellala.....</b>	<b>35</b>
<b>Fig. 19 : photo des fentes de tentions à quartz.....</b>	<b>36</b>
<b>Fig. 20 : photo des fentes de tensions de quartz.....</b>	<b>36</b>
<b>Fig 21 : Schéma montrant la fracturation du socle, et la transformation des grés en quartzite sous l'effet de l'orogénèse Hercynienne.....</b>	<b>38</b>



---

<b>Fig. 22 : schéma montrant le mécanisme de la formation des filons de quartz hydrothermal.....</b>	<b>39</b>
<b>Fig.23 : schéma montrant le jeu décrochant senestre de la faille N110, qui a décalé les filons de quartz sur faille N170 qui est suivie par la vallée centrale de la boutonnière...41</b>	<b>41</b>
<b>Fig. 24 : photo photo de filon principale à quartz situé sur la faille N170 au Nord de la vallée .....</b>	<b>41</b>
<b>Fig. 25 : photos de filons de quartz hydrothermal sur failles subméridiennes.....</b>	<b>42</b>
<b>Fig. 26 : photo de poudre de quartz.....</b>	<b>43</b>
<b>Fig. 27: photo d'un Panneau solaire.....</b>	<b>46</b>



# Généralités sur le Maroc

Le Maroc est considéré comme l'une des rares régions dans le monde où l'on peut comprendre facilement la plupart des problèmes des Sciences de la Terre.

Sa situation géographique lui permet de jouer un rôle capital dans les relations géologiques entre l'Afrique et l'Europe, et entre l'Afrique et l'Amérique ; c'est pour cette raison qu'on a nommé le Maroc comme étant **PARADI DES GEOLOGUES**

Le Maroc est situé à l'extrémité Nord-Ouest de la partie continentale de la plaque Africaine. Cette plaque présente plusieurs spécificités :

- Elle est entourée à 90% de dorsales océaniques, à l'exception de son bord Nord (depuis le Maroc à l'Ouest jusqu'à l'Égypte à l'Est), qui subit directement les conséquences de la convergence Cénozoïque Afrique-Europe.
- Sa structuration est ancienne, puisque la plaque Africaine est constituée d'un assemblage de blocs cratoniques agglomérés pendant le Protérozoïque, et pénéplanés au début du Phanérozoïque (De Wit et al., 2001).

Le seul élément de la topographie africaine pouvant être associé clairement à un régime compressif est le système des Atlas, qui apparaît donc ici comme une exception au sein de cette plaque.

En stratigraphie, les affleurements de toutes les époques sont représentés, sous divers faciès. Les subdivisions du précambrien et du Quaternaire au Maroc.

En paléontologie, la flore marine ou terrestre a connu un développement considérable à travers les temps géologiques, en particulier les Algues, les Gymnospermes et les Angiospermes. La faune a fourni des spécimens très variés dans tous les groupes fossiles ou vivants : les Archéocyathes, les Trilobites, les Graptolites, les Brachiopodes, les Echinodermes, les Vertébrés.

En pétrographie, les roches intrusives et extrusives sont très variées et certains types sont définis même au Maroc. Des gisements miniers d'une grande valeur économique sont liés à certaines des formations géologiques représentées.

En tectonique, la majeure partie des terrains marocains a été affectée par les deux principales orogénèses, à savoir l'orogénèse hercynienne et l'orogénèse alpine, en plus des orogénèses précambriennes. Les types d'évolution paléogéographique, de métamorphisme et de style tectonique sont très divers.

Enfin, on peut dire que la Géologie marocaine est très variée et que le Maroc représente un champ d'action privilégié pour la recherche et l'enseignement des Sciences de Terre

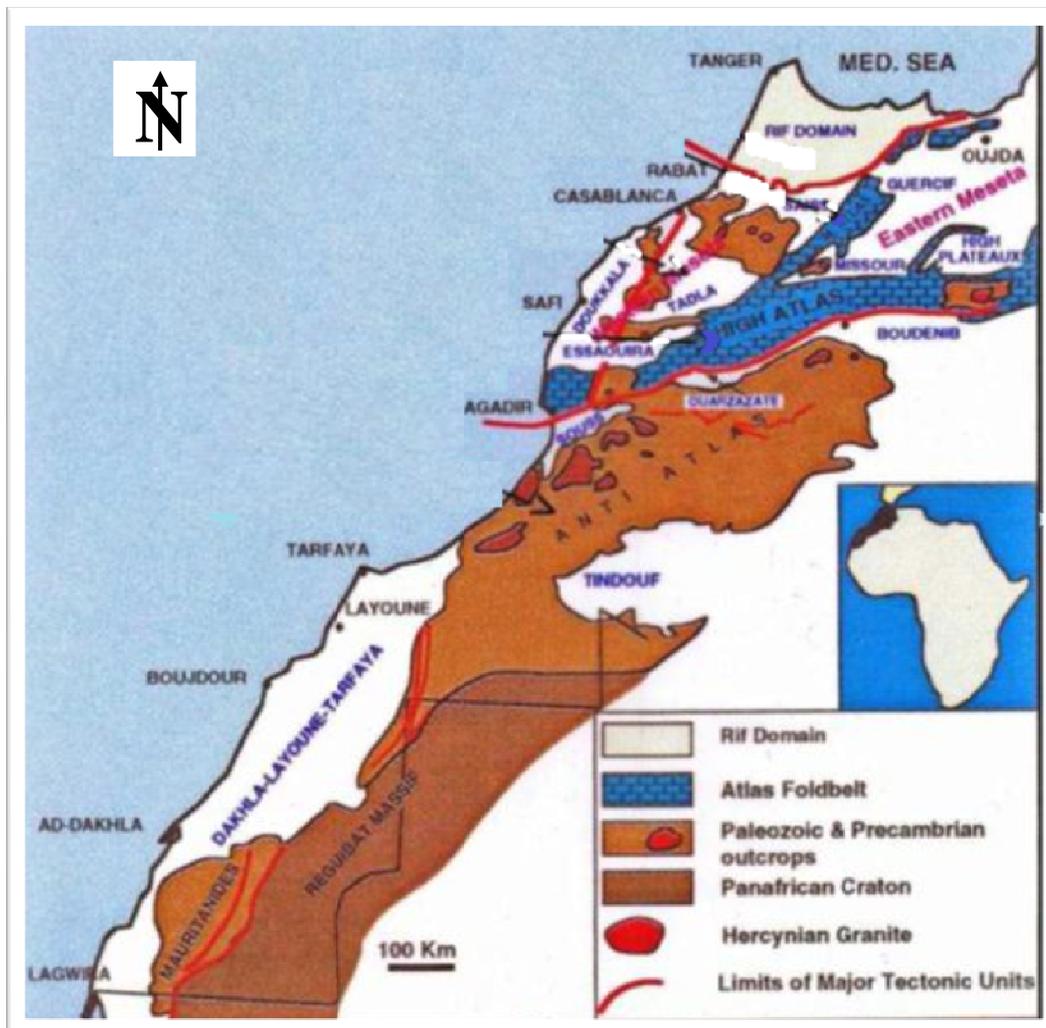


Fig.1 : Carte géologique du Maroc (D'après le site de l'ONHYM)



## 1)-Les grands traits structuraux du Maroc

Au cours de sa longue histoire géologique conditionnée par cette position de charnière, entre les continents africains, européen et américain, plusieurs cycles orogéniques se sont succédés comme on a déjà mentionné dans les généralités, contribuant chacun, par son contexte géodynamique et son ampleur, à façonner les grands domaines structuraux du Maroc.

C'est ainsi que l'on en distingue trois grands traits structuraux au Maroc, en fonction de la localisation et de l'importance des effets des orogénèses les plus récentes.

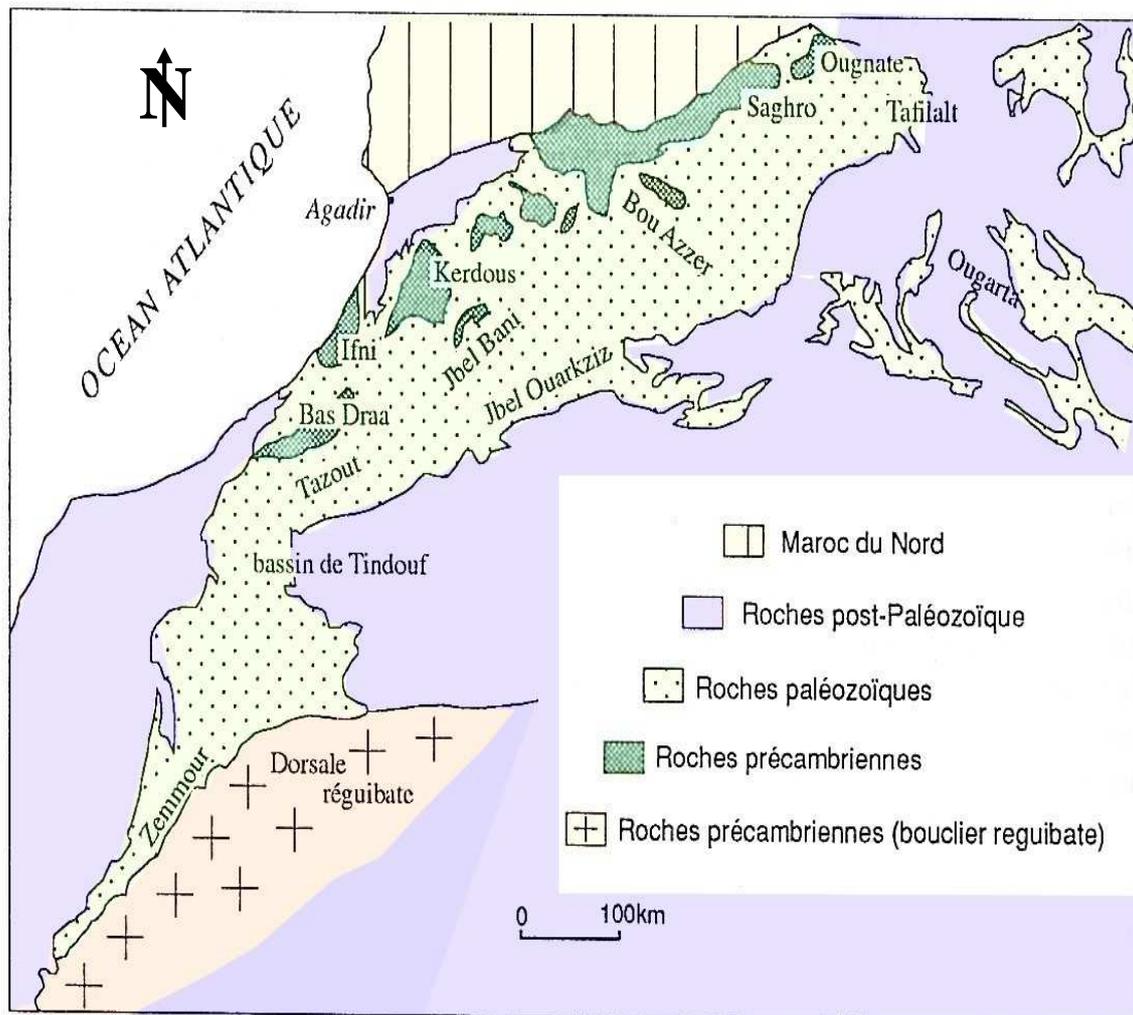
Du Sud au Nord, le domaine anti-atlasique et son prolongement saharien, le domaine atlaso-mésétien et le domaine rifain séparés les uns des autres, par la limite des charriages tertiaires venus du Nord. Les deux derniers domaines sont caractérisés par l'empreinte prédominante laissée par les orogénèses hercynienne et alpine tandis que le premier domaine a été essentiellement façonné par les orogénèses précambriennes et hercynienne.

### 1)- *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 :

- ❖ la partie nord de la dorsale archéenne des Reguibat, datée à 2800 Millions d'années, la plus ancienne du pays et qui est affectée par l'orogénèse éburnéenne à
- ❖ au Nord de ce socle éburnéen, se trouve la partie mobile de la chaîne panafricaine d'âge protérozoïque supérieur, constituée au Sud par une plateforme elle même relayée au Nord par un bassin océanique matérialisé par la paléo-structure ophiolitique de Bou-Azzer.
- ❖ Au Nord-Est de cette structure et dans un contexte de subduction panafricaine, s'est développé un arc volcanique avec un cortège de vulcanites et d'intrusions plutoniques calco-alcalines caractéristiques. Ces ensembles ont été structurés par l'orogénèse panafricaine.

Ces formations protérozoïques sont recouvertes en discordance par des séries transgressives allant de l'Infracambrien au Carbonifère et qui sont déformées, comme celles qu'elles recouvrent, par l'orogénèse hercynienne. Celle-ci est notamment mieux exprimée dans la partie occidentale de l'Anti-Atlas.



**Fig2 : Carte structural de l'Anti Atlas (d'après Piqué, 1994)**

## 2)-Domaine atlaso-mésétien

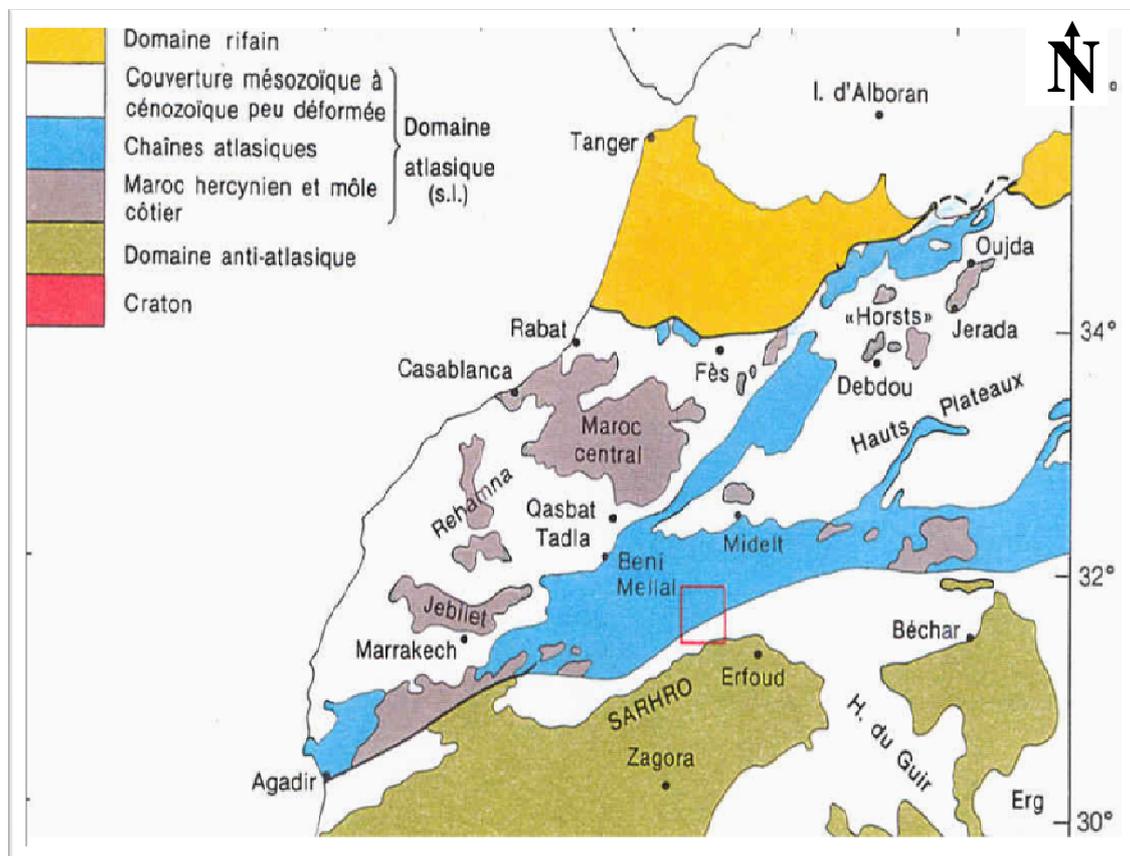
Ce domaine est situé entre l'accident sud atlasique et la limite sud du Prérif. Il est constitué par plusieurs unités structurales.

✓ Un socle paléozoïque (dans 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'orogénèse 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 et une autre hercynienne ;

- une zone à couverture tabulaire comprenant le causse moyen atlasique, les hauts plateaux et le pays des horsts dans le Maroc oriental.

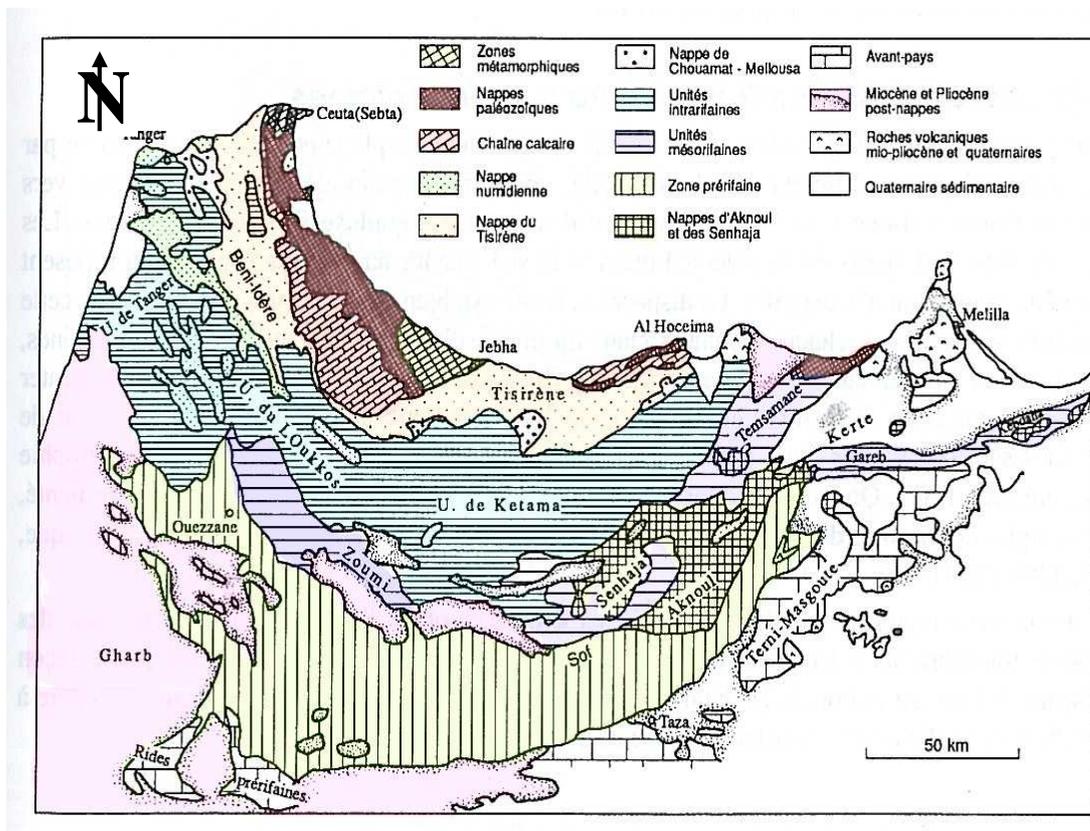


**Fig3: carte géologique montrant le domaine atlaso-mésétien**

### 3- Domaine rifain

Il est constitué par les zones internes, la zone des flyshs et les zones externes. :

- les zones internes sont représentées dans deux régions sur la côte méditerranéenne : entre Sebta et Jabha. Par leur origine, ces zones internes sont liées à la plaque d'Alboran, individualisée au Mésozoïque entre l'Afrique et l'Europe et se composent de plusieurs unités cristallines et sédimentaires ;
- le domaine des nappes des flyshs est constitué d'unités formées de séries sédimentaires détritiques déposées dans un bassin profond, à la marge de la plaque d'Alboran ;
- les zones externes correspondent à l'ancien sillon externe, établi sur la marge nord-africaine, comblé par d'épaisses séries mésozoïques et cénozoïques. Parmi les unités qui constituent ces zones, certaines sont enracinées et d'autres sont sous forme de nappes.



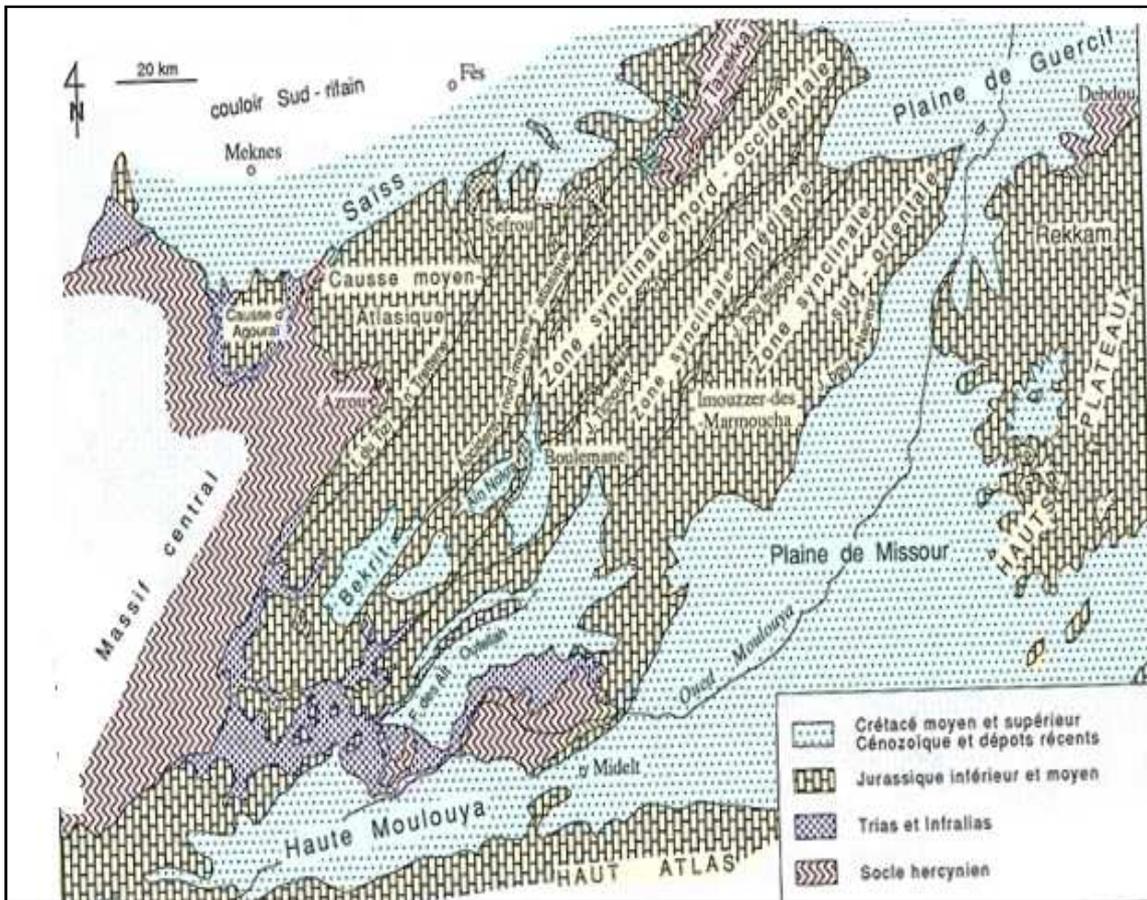
**Fig : 4 Carte géologique du domaine rifain (d'après Pique, 1994)**

## 2) Les grands ensembles structuraux du Moyen Atlas

Le Moyen Atlas est une chaîne intracontinentale, faisant partie du domaine atlasique défini par Choubert et Marçais (1952).

Il est constitué par des édifices montagneux dont les principaux sont orientés NE-SW. Sa structure correspond à de larges cuvettes synclinales séparées par des rides anticlinales faillées.

C'est le siège d'une activité tectonique, néotectonique et sismique importante (Michard, 1976). Aussi, le Moyen Atlas est le siège d'une tectonique polyphasé depuis le Trias jusqu'à l'actuel (Hinaje, 2004).



**Fig. 5 : Carte géologique du moyen atlas (d'après Piqué, 1994)**

## 1)-Evolution générale du Moyen Atlas

### 1-1).Le rifting moyen atlasique

Apparu à l'est du rift continental atlantique, un rift continental téthysien s'est développé sur le domaine atlasique du Maroc au cours du Trias et du début du Jurassique. Il comporte trois étapes majeures (Colo, 1961 ; Michard, 1976 ; Fedan, 1988 ; Charrière, 1990 ; Charroud, 1992 ; Sabaoui, 1998, El Arabi, 2001 ; Hinaje, 2004).

#### a). Au Trias supérieur –Lias inférieur

Dans la plus grande partie du Maroc, le Trias est décrit avec des séquences principalement détritiques. Au Trias supérieur, une extension généralisée affecte le domaine atlasique. Au Maroc la direction d'extension est NW-SE à cette époque ; les failles atlasiques NE-SW, actives au Trias supérieur-Lias inférieur, y sont scellées par les carbonates du lias inférieur.

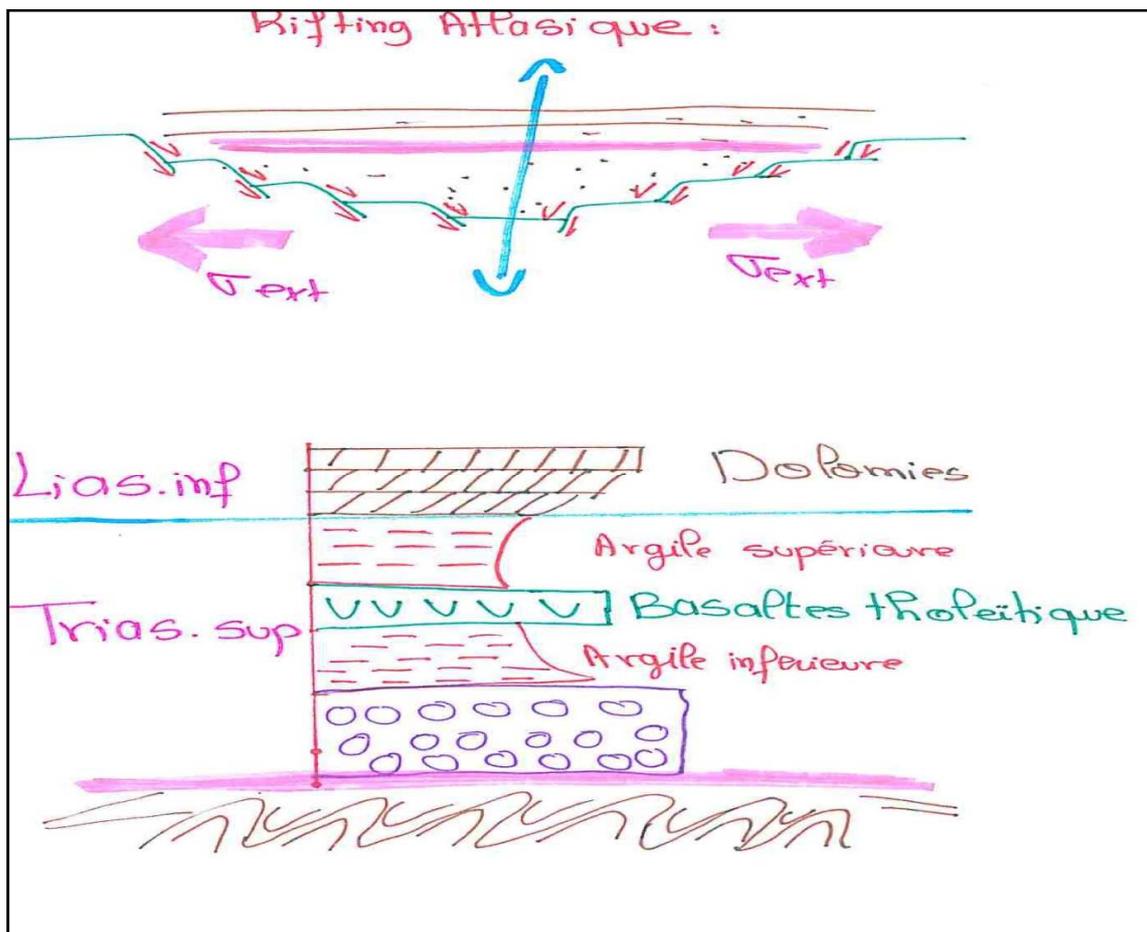


Fig.6 :Log stratigraphique du rifting triasico-liasique du moyes atlas



### **b). Au Lias moyen**

Dès le Lias inférieur, les conditions deviennent partout franchement marines de plateforme, et seuls demeurent émergés le domaine saharien et la meseta marocaine qui furent soulevés à l'issue du rifting atlasique. A l'intérieur de la mer épicontinentale du Lias moyen, des zones de plateformes internes carbonatées (cause moyen atlasique marocaine) sont séparées par des flexures et des alignements récifaux, des zones plus subsidentes correspondent au futur Moyen Atlas et Haut Atlas, où se sont déposés des sédiments de plate forme externe.

### **c). Au Jurassique moyen et supérieur**

Au passage Domérien-Toarcien, la sédimentation carbonatée du Lias moyen s'interrompt et la diversification des faciès sédimentaires du Lias supérieur et du Jurassique moyen montre que l'ancienne plateforme est disloquée, avec une accélération brutale de la subsidence dans l'axe des bassins, désormais nettement individualisés.

Un système de Horsts et grabens s'établit ; il contrôlera la sédimentation jusqu'au Jurassique supérieur dont les couches scellent, en discordance post-rift, les failles normales. A partie de la fin du Bathonien et durant la majeure partie du Crétacé inférieur, la plus grande partie de l'Atlas marocain émerge.

### **- Modèle d'ouverture et de fermeture du rift atlasique NE-SW (Hinaje et Aït Brahim, 2001) :**

L'analyse de la déformation cassante dans la série triasico-liasique de la chaîne moyen atlasique marocaine a permis de définir les paléochamps de contraintes suivants :

- dans les dépôts détritiques grésos-conglomératiques de base du Trias ; l'analyse quantitative sur des populations de failles à jeu synsédimentaire permet de définir un état de paléocontraintes distensif où l'axe  $\sigma_3$  est horizontal et orienté NW-SE, et l'axe  $\sigma_1$  est vertical. Ceci est matérialisé sur le terrain par des failles normales synsédimentaires orientées N20 à N60 qui délimitent des grabens et hémi-grabens à remplissages détritiques et scellés.



Le rapport de forme  $\phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = 0,36$ , c'est à dire que la valeur de  $\sigma_3$  se rapproche de celle de  $\sigma_2$ . Donc la distension est presque biaxiale. Ce paléochamp de contraintes où  $\sigma_1$  est verticale,  $\sigma_2$  est horizontale orientée NE-SW ( $\sigma_2 \geq \sigma_3$ ) et  $\sigma_3$  est horizontale orientée NW-SE ; est responsable de l'ouverture du rift atlasique sur des structures héritées orientées N45. Ce rift orienté NE-SW correspond au Moyen Atlas au sens large qui regroupe aussi la partie du Haut Atlas central où les failles majeures sont orientées N45 (Atlas de Bni Mellal – Zaouiat Ahencal – Assoul) ;

- dans les basaltes tholeiitiques ; l'analyse microtectonique des failles synvolcaniques révèle un régime de paléocontraintes où l'axe  $\sigma_3$  est orienté NNW-SSE,  $\sigma_2$  et  $\sigma_1$  sont obliques. Dans ce régime tectonique où les axes  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  peuvent permuté ; les structures mesurées correspondent à des failles normales orientées N60 à N80 et des décrochements dextres orientés N10 à N30 ;

- le régime de paléocontraintes où  $\sigma_3$  est horizontale orientée NW-SE à NNW-SSE et  $\sigma_1$  verticale (avec parfois permutation  $\sigma_1 - \sigma_2$ ) ; persiste au Lias inférieur et au Carixien inférieur. Il est matérialisé par des failles normales synsédimentaires orientées NE-SW et des failles normales à composante décrochante senestre orientées E-W dont le plan contient des stries viscoplastiques. Ce paléochamp de contraintes reste favorable à la persistance du rift atlasique où les failles N45 guident et influencent la sédimentation ;

- dans les dépôts du Carixien supérieur, du Domérien et du Toarcien, l'analyse des failles synsédimentaires révèle un régime de paléocontraintes où  $\sigma_3$  est horizontale orientée NE-SW et  $\sigma_1$  est aussi horizontale orientée NW-SE (avec parfois permutation  $\sigma_1 - \sigma_2$ ). Ce paléochamp de contraintes qu'on peut qualifié d'une « inversion tectonique », est responsable de l'avortement du rift atlasique qui a eu une durée de vie de 35 à 45 M.a. Les anciennes failles normales de direction NE-SW présentent alors un rejeu inverse avec surrection des rides, et c'est les failles NW-SE à jeu normales qui commencent à influencer la paléogéographie, la répartition et la nature des sédiments.



## 1-2). L'inversion tectonique et l'édification de la chaîne moyenne atlasique

La convergence entre les deux plaques, africaine et européenne devient effective au Crétacé supérieur et se poursuit au cours du Tertiaire (Sabaoui, 1987)

Au Miocène supérieur, le Moyen Atlas, siège d'une tectonique polyphasée depuis le Trias jusqu'à l'actuel, a connu au Néogène et au Quaternaire la succession des événements tectoniques suivants (Hinaje et al., 2002) :

- le premier événement tectonique d'âge Vallésien à Paléocène inférieur regroupe au moins trois épisodes tectoniques correspondant à un paléo-champ de contraintes dont l'axe compressif  $\sigma_1$  est orienté N120 à N140 et l'axe extensif  $\sigma_3$  orienté N30 à N50 ;
- dans la région de l'Oued Zraa où les dépôts du passage Miocène moyen-Miocène supérieur (Vallésien) sont datés (Charrière, 1990) ; le premier épisode tectonique correspond au paléo-champ de contraintes matérialisé par des failles inverse scellées de direction N30 à N40, et des décrochements syn-sédimentaire à jeu dextre orienté N75 à N120 ;
- au Miocène supérieur, le second épisode tectonique est caractérisé par une contrainte compressive  $\sigma_1$  orientée NW-SE et une contrainte extensive  $\sigma_3$  orientée NE-SW. Ce paléo-champ de contraintes est à l'origine d'un système de fentes de tension rectilignes et parallèles orientée N130 à N155 à remplissage synsédimentaire, affectant la barre carbonatée miocène.

Ces paléo-champs de contraintes regroupant trois épisodes tectoniques avec extension NE-SW responsables de la formation des bassins sédimentaires vallésiens et tortono-messinens orientés en gros NW-SE (Oues Zraa, Sefrou-Tahla, Tazouta-Ribat El Kheir) par le jeu normal des failles majeures NW-SE. Celles-ci ont favorisé la rentrée de la mer jusqu'à la zone de Skoura (Flan NW de la ride de Tichoukt) où elle est arrêtée par la ride de Tichoukt qui matérialise un accident N40 à jeu inverse.

Les formations qui constituent le Moyen Atlas sont du plus ancien au plus récent:

- Les formations paléozoïque qui affleure dans le massif de Tazekka et les boutonnières de Kander El Hajeb Bsabis Bni Mellala...



- Les formations triasico-liasiques affleurent autour des terrains paléozoïques, et aussi affleurent le long des grands accidents.
- Les formations du Jurassique inférieur et moyen constituant l'essentiel de la chaîne moyen atlasique.
- Les formations Crétacés 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 périphérie de la chaîne.

### **1-3). Les accidents majeurs dans le Moyen Atlas**

Dans le Moyen Atlas il y'a quatre accidents majeurs jouent un rôle important dans la structure de la chaîne qui sont :

- ✓ l'accident Nord Moyen Atlasique (Colo, 1961 ; Duée et al, 1977) sépare le causse moyen-atlasique du Moyen atlas plissé, elle se localise dans la partie septentrionale de la chaîne ;
- ✓ l'accident Sud Moyen Atlasique (Laville, 1977 ; Fedan, 1988) sépare le Moyen atlas plissé de la meseta orientale et la plaine de la Moulouya ;
- ✓ l'accident de Dayet Aoua (Charrière, 1990) qui sépare le causse moyen atlasique et le bassin de Saïs. Il passe par la boutonnière de Bni Mellala et possède un jeu normal au Quaternaire ancien-moyen (Hinaje, 2004) ;
- ✓ l'accident Tizi N'Tretten (Colo, 1961) divise le causse moyen atlasique en deux parties, une contient les boutonnières orientales : El Bhalil, Bni Mellala, Kandar, El Hajeb. Et l'autre où se trouvent les boutonnières orientales : Bsabis , Pont de Sebou, El Menzel, Tazzeke

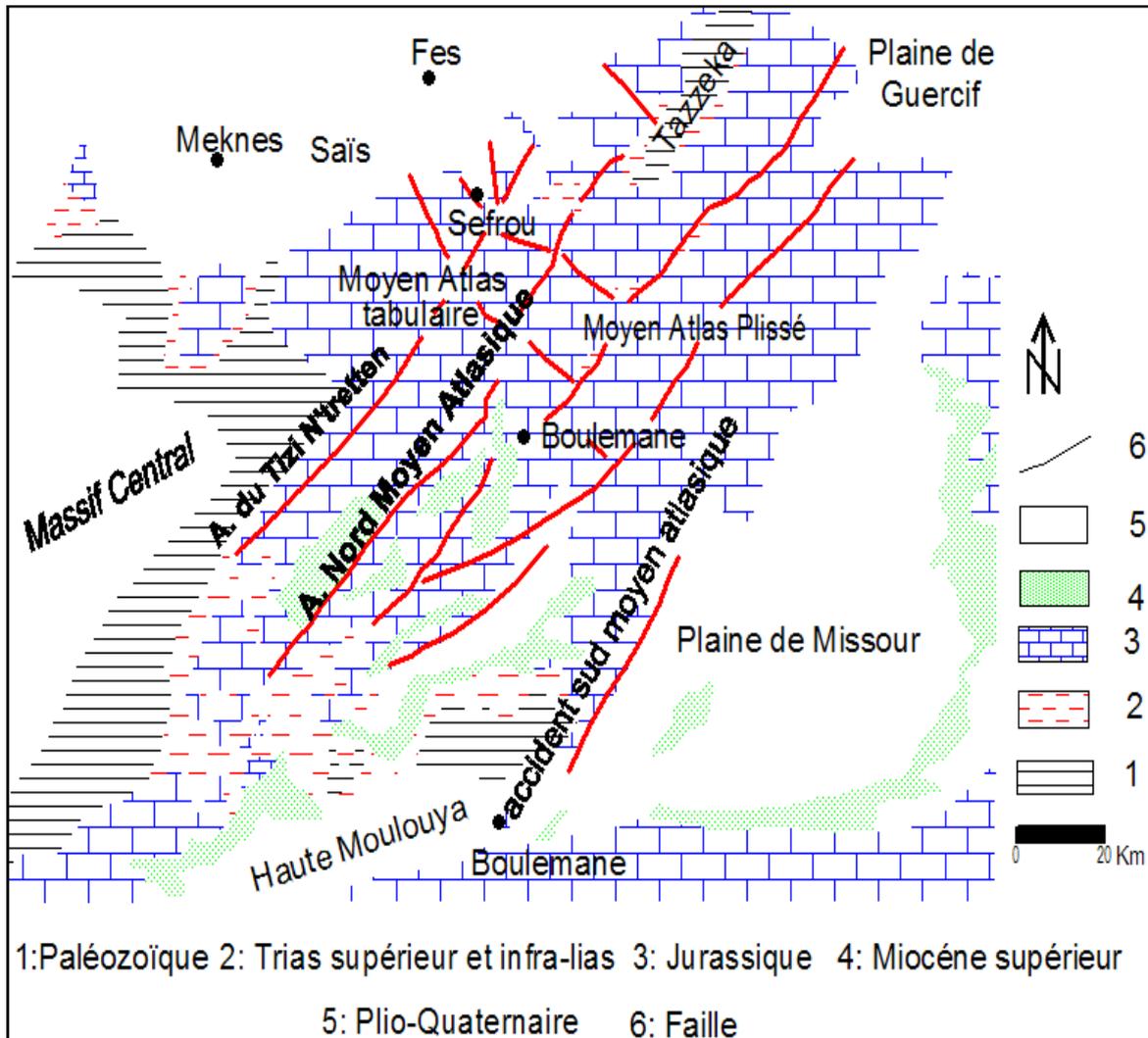


Fig.7 : Carte géologique simplifiée du Moyen Atlas (HINAJE, 2004, redessiné)

## 2)-Le Moyen Atlas plissé

Le Moyen Atlas plissé, Comme le Haut Atlas central et oriental, c'est une succession de cuvettes séparées par des lignes de crêtes où s'individualisent les plus hauts sommets : Jbel Tichoukt (2796m), Jbel Bou-Iblan (3190m) et Jbel Bou-Naceur (3340m). A la terminaison nord-est du Moyen Atlas, où il s'interrompt au niveau de Taza. Le Tazekka est un massif paléozoïque où affleure le socle des séries atlasiques plissées. Au sud-est, la chaîne domine la plaine de la Moulouya qui forme une zone affaissée entre le Moyen Atlas et le Haut Atlas.



### 3)- Le Causse Moyen Atlasique

Le Causse Moyen Atlasique pris dans sa totalité est un vaste secteur (4200km<sup>2</sup> environ). C'est une région tabulaire située directement au nord et nord ouest de l'accident nord-moyen atlasique qui les sépare du Moyen Atlas plissé situé au S-E.

Le Causse est limité à l'ouest par les terrains paléozoïques de la meseta marocaine et au nord-ouest par ceux du massif de Tazzeka sur lesquels, il repose. Au Nord, la limite est déterminée par les terrains de recouvrement tertiaires et quaternaires du couloir sud-rifain sous lesquels, il forme un vaste synclinal dissymétrique affectant tous les terrains secondaires, et s'interrompt sur son flan nord au contact des rides pré-rifaines.

Le Causse a été subdivisé, suivant les critères géographiques et structuraux. On distingue une partie occidentale qui va de la bordure de la méseta jusqu'à l'ouest Sebou à l'est et une partie orientale qui correspond aux bordures liasiques du massif de Tazzeka.

La partie occidentale est subdivisée en deux tronçons suivant des critères structuraux : un tronçon septentrional au nord-ouest et un tronçon méridional au sud-est. Ces deux tronçons sont séparés par l'importante ligne d'accidents de Tizi-N'Tretten.

- Le tronçon méridional comprend le causse de Guigou, d'El Menzel, d'el Hammam, de Tahla, ...etc.

- Le tronçon septentrional qui nous intéresse correspond au causse d'Immouzer, au causse d'Ifrane-El Hajeb et au causse de Sefrou. Notre travail portera sur le causse de Sefrou.



# CHAPITRE II : LA BOUTONNIERE DE BENI MELLALA

### ***1)-Situation géographique et cadre géologique:***

La boutonnière de Beni Mellala se situe sur le coté NW du Moyen atlas tabulaire à une trentaine de km au Sud de Fès et à une dizaine de km à l'Ouest de Sefrou. On a pu facilement accéder à la boutonnière en passant par la route secondaire qui relie la route principale 24 (entre Fès et immouzer kander) et la route principale 20 (entre Fès et Sefrou). Cette boutonnière occupe la base d'un demi-horst alpine (charrière 1990), le socle paléozoïque affleure sur un prés de 2km de longueur et un 1km de largeur, ce socle est caractérisé par des terrains d'âge Ordovicien inférieur et supérieur, et aussi par des affleurements du Silurien au SW de la boutonnière, caractérisé par des formations des schistes à graptolites.



**Fig. 8 : Croquis de l'emplacement de la boutonnière de Beni Mellala sur l'image satellitaire (source : Google earth, 2011)**

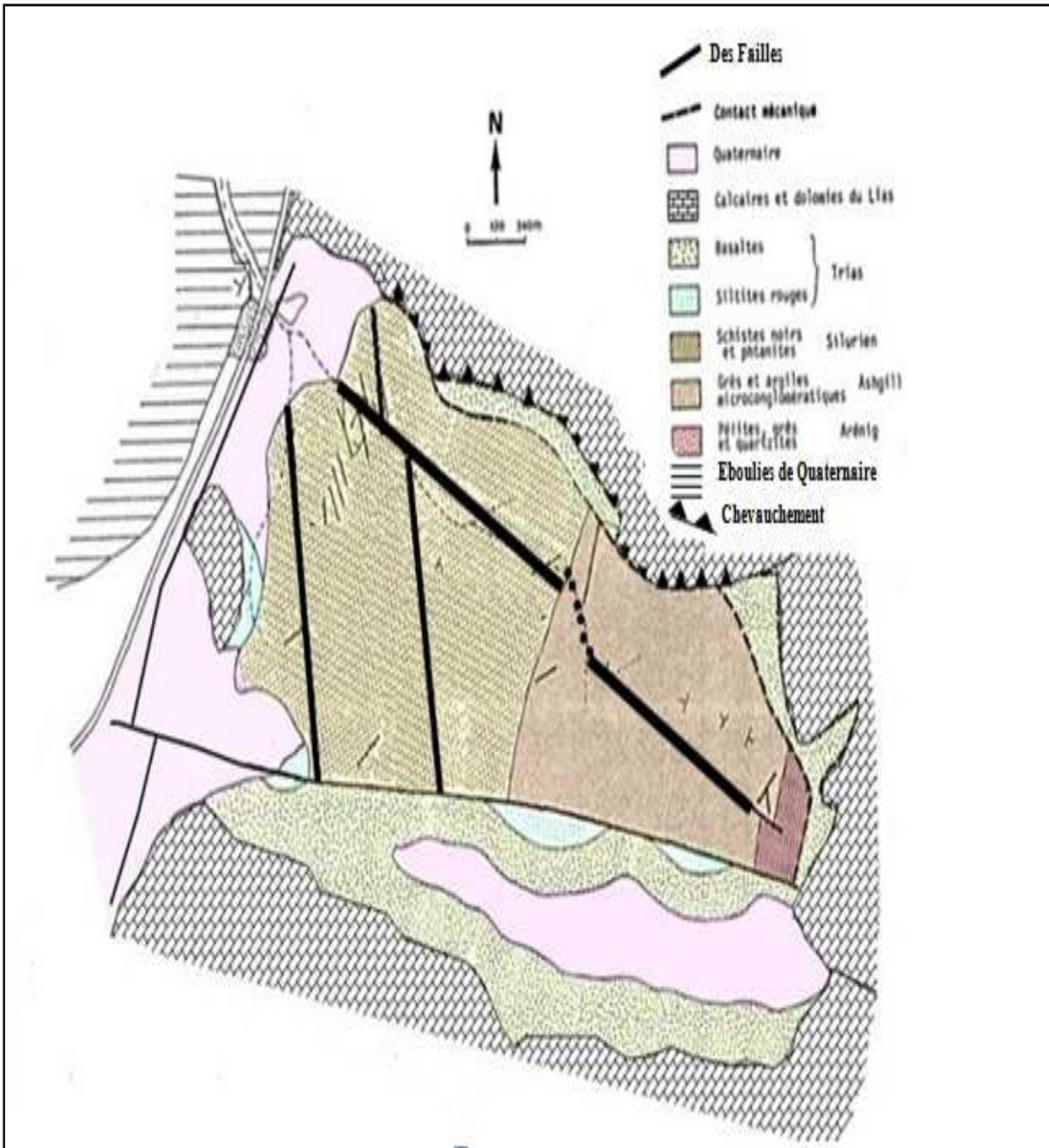


Fig. 9 : Carte schématique de la boutonnière de Bni Mellala, (Ouarhach 1987, modifiée)



## 2)- La stratigraphie

### 2-1) Socle Paléozoïque

#### a- Cambrien

De façon générale, dans les boutonnières occidentales du Moyen Atlas tabulaire, les formations cambriennes ne sont pas abondantes. Les plus anciens terrains du socle qui affleurent en général sont d'âge Ordovicien.

#### b- Ordovicien

Les couches d'âge Ordovicien sont les terrains les plus anciens reconnus dans les boutonnières du Moyen Atlas Tabulaire. Dans la boutonnière de Beni Mellala, l'Ordovicien représente la majeure partie d'affleurement. Au niveau de la boutonnière de kandar, l'ordovicien affleure sur 200 à 300m à la base de la série paléozoïque. Par contre dans les boutonnières de Bhalil et d'El-Hajeb, l'Ordovicien n'apparaît plus. Pour ce qui concerne la boutonnière sur laquelle nous réalisons notre étude on a pu distinguer :

- **L'Arinigen** : L'Ordovicien inférieur dans la boutonnière de Beni Mellala est caractérisé par un ensemble de barres quartzitiques contenant des fentes de tensions à quartz. Ces quartzites, sont affectés par un réseau de failles à caractère décrochant. A partir des mesures que nous avons réalisé, elles sont orientées N110 et de pendage 80°S. Ces décrochements sont caractérisés par des minéralisations de quartz hydrothermal.

- **Ashgillien** : à cette époque, le Sahara a connu une grande glaciation qui s'étendait jusqu'en Lybie (S. Beuf et al, 1968) Les formations dominant sont les dépôts d'argiles micro-conglomératiques à caractères périglaciaires.

Les affleurements des couches de l'Ordovicien dans le domaine de notre étude ; sont caractérisés par une sédimentation dominée par :

- à la base, des dépôts de quartzites (Arginien),
- vers le sommet, les argiles micro-conglomératiques (Ashgillien).



### c- Silurien

Les affleurements siluriens sont d'extension très réduite et se limitent à l'extrémité ESE de la boutonnière de Bni Mellala, et à la partie NW de la boutonnière de kandar où ils sont entourés par les argiles micro-conglomératiques de l'Ashgillien. Au niveau des autres boutonnières, les dépôts du silurien sont absents.

Dans la boutonnière de Beni Mellala les formations siluriennes sont caractérisées par l'abondance des schistes noirs en plaquettes, de quelques millimètres d'épaisseur, suivant les plans de stratification. Ces schistes sont surmontés par des phanites à Graptolites, de 4 à 5m de puissance totale, la partie supérieure de la série silurienne est masquée par les terrains triasiques.

Grâce à l'abondance en Graptolites, la stratigraphie du silurien est bien établie en plusieurs endroits du Maroc central et des boutonnières du Causse Moyen Atlasique.

Dans tous ces régions, les terrains siluriens se présentent sous le même faciès, seulement au niveau de la boutonnière d'Imouzzer kandar et Beni Mellala il y'a une continuité de sédimentation entre l'Ordovicien supérieur et le Silurien, alors que dans la partie E et NE du Maroc central, le style de la tectonique hercynienne fait que ces terrains sont écaillés et parfois entraînés dans les nappes dont ils formaient la semelle, (D. Ouarhache, 1987)

### d- Dévonien

Les terrains Dévoniens affleurent largement dans la boutonnière d'Imouzzer du Kandar et dans la partie E et SE de la région d'Adarouch.

La sédimentation au Dévonien est caractérisée par des dépôts détritiques alternant avec des épisodes carbonatés, riches en fossiles. Cependant le Dévonien n'affleure pas dans la boutonnière étudiée.



### e- Carbonifère

Les terrains carbonifères constituent la totalité des affleurements dans les boutonnières d'El-Hajeb et de Bhalil, ils occupent environ 70m en surface dans la région d'Adrouch et le tiers SE de la boutonnière d'Imouzzer du Kandar (Ouarhache, 1987).

La sédimentation au carbonifère est dominée par des dépôts détritiques grossiers syn à post-orogéniques (conglomérats, grés et flysch) pauvres en fossiles, avec des épisodes carbonatés, notamment dans la région d'Adarouch et au niveau de la boutonnière d'Imouzzer de kandar qui sont très riches en fossiles comme l'espèce *Posidonia becheri* (C. Babin), et des Brachiopodes dans le niveau grés-carbonatés, (OUARHACHE, 1987).

## 2-2). La couverture Triasico-Liasique

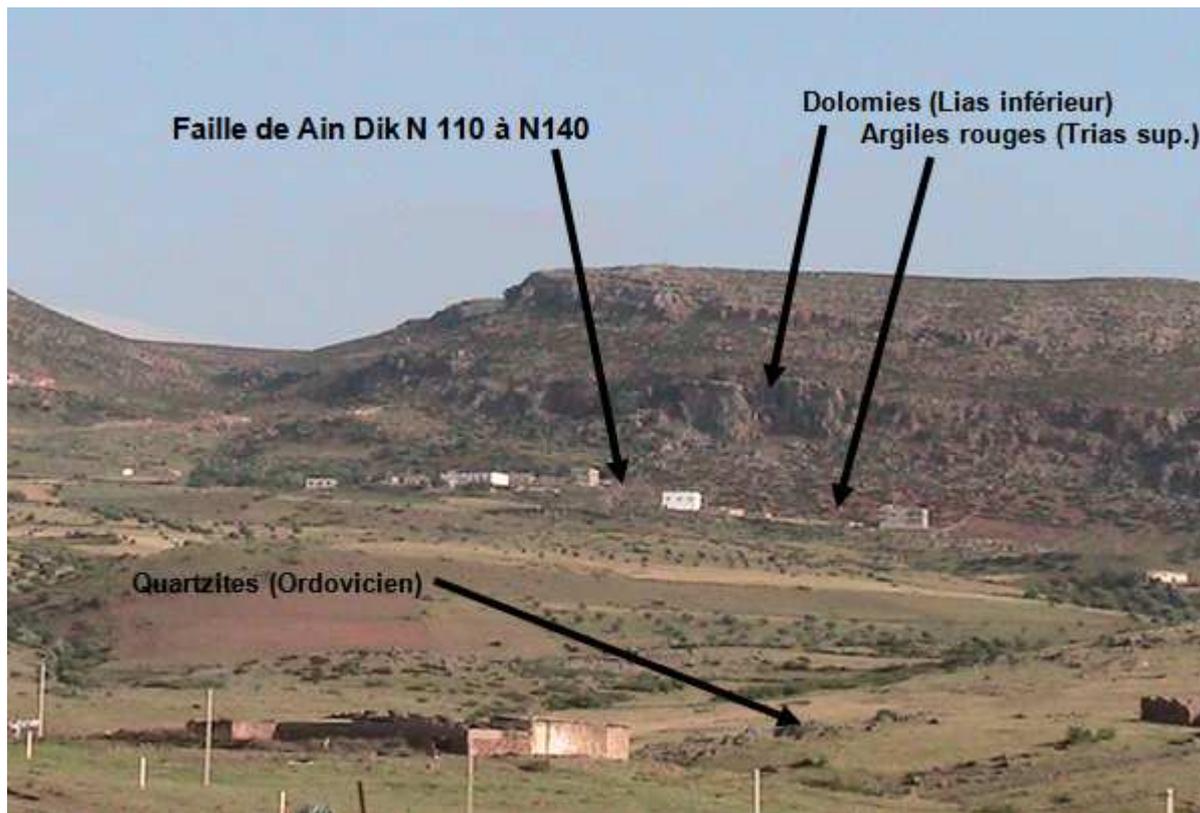
### a- Trias

Il s'agit en effet d'un Trias à dominance argileuse présentant le plus souvent dans sa partie moyenne des intercalations de Basalte tholeiitique, le Trias connu depuis la marge Sud jusqu'au Rif, (Michard, 1976) et c'est pareil dans les couverture mésozoïques des boutonnière du Causse Moyen Atlasique.

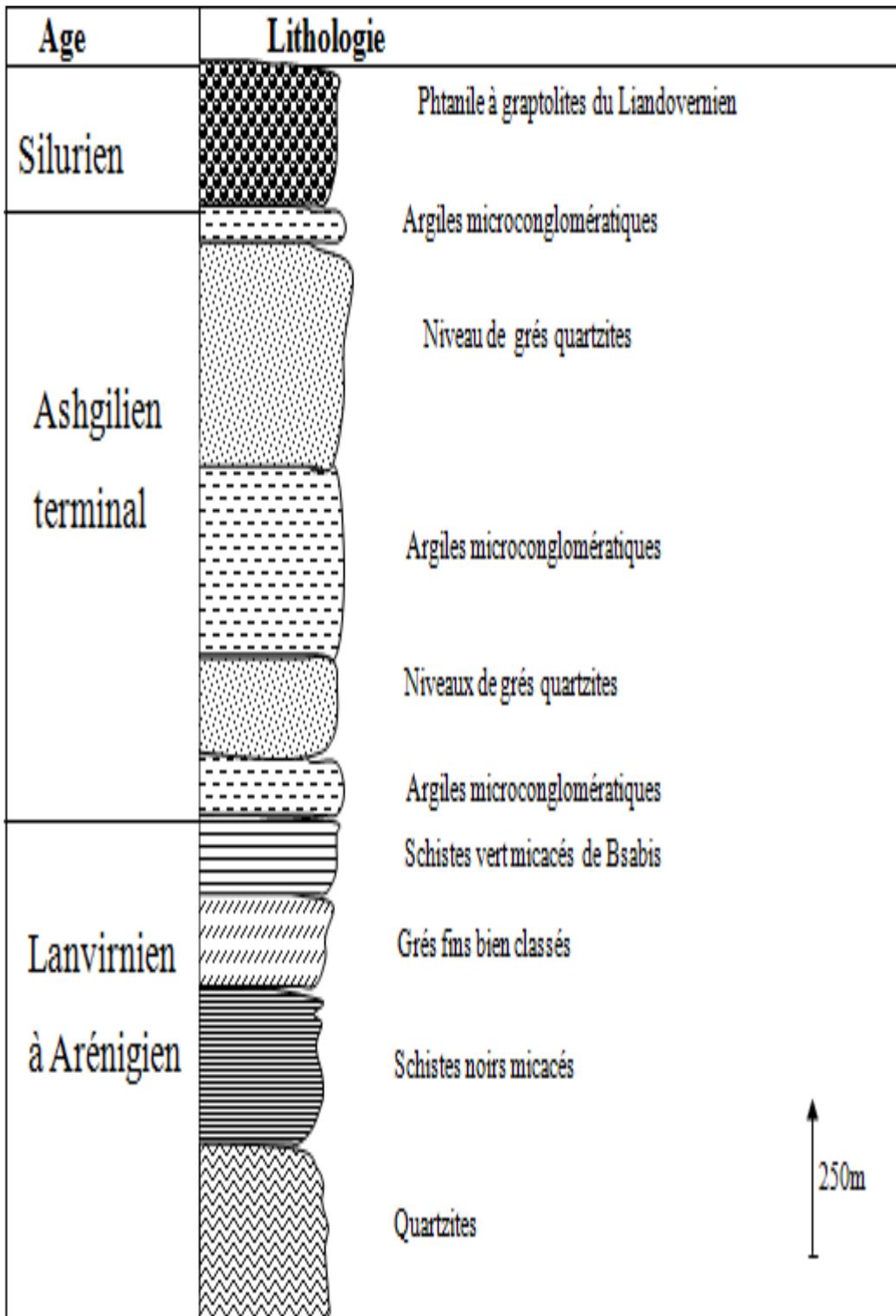
Dans la boutonnière de Bni Mellala, le Trias est présent au niveau des deux grandes failles qui limitent l'affleurement du socle Paléozoïques, joue le rôle d'une couche savon entre la couverture liasique et le socle Paléozoïque. Ces deux failles sont : la premier qui est située au Nord de la boutonnière qui a un jeu chevauchant, et l'autre c'est celle de Ain Dik qui a un jeu normale d'âge Miocène et décrochant d'âge Plio-Quaternaire.

### b- Lias

Lias inférieur : en dépit de leur extension considérable dans le Moyen Atlas tabulaire, les terrains dolomitiques n'ont livré que de rares éléments paléontologiques (Termier, Dubar, 1942). Outre cette absence de repères biostratigraphiques, la monotonie de la lithologie et parfois l'absence de repères biostratigraphiques, et lithostratigraphique concourent à la difficulté, de lever des coupes significatives corrélables entre elles. Toutefois des structures sédimentaires sont fréquemment discernables et constituent de précieux marqueurs permettant de suivre une évolution séquentielle locale. On y retrouve d'abord les structures sédimentaires classiques des milieux intertidaux et supratidaux ("bird eyes", laminites, stromatolites, brèches monogéniques...) signalées pour la première fois au Maroc par du R. Dresnay (1972), mais également des structures graveleuses, oncholites et parfois oolitiques, à litage oblique bien marqué, caractéristiques d'un milieu subtidal à hydrodynamisme élevé (Charrière ; 1990).



**Fig. 10 : Photo qui montre les dépôts de la couverture Triasico-Liasique et la faille de Ain Dik**



Fi g. 11 : Log stratigraphique du socle primaire de la Boutonnière de Bni Mellala



### ***3)-La structure***

Le socle paléozoïque de la boutonnière affleure entre deux failles majeurs : la première située au Nord, elle correspond à un chevauchement orienté N120 formant une surface en palier qui sépare la couverture Triasico-Liasique du socle paléozoïque. Le contact entre les dolomies liasique et le socle correspond à une surface broyée contenant des niveaux de basalte, marnes jaunes et des argiles rouges. Ce chevauchement est d'âge anté-miocène signalé comme décollement par A. Charrière. Ce contact en palier correspond à un chevauchement à pendage NNE car il rebrousse la schistosité du socle et les strates de dolomies. Il est rebroussé et basculé vers le NW par la faille normale de Dayet Aoua orientée N30 et à jeu normal au Quaternaire (Hinaje et al., 2001 ; Hinaje, 2004).

Vers le Sud de la boutonnière, se situe la faille de Ain Dik (Charrière, 1990), orientée N120 à jeux multiples. Elle a un jeu normal à composante décrochante dextre, probablement d'âge Miocène supérieur, et elle a rejoué et décale en décrochement senestre l'accident de Dayet Aoua.



## 4)- La microtectonique

### 4-1).Légende des stéréogrammes analytiques

-  : Projection de Schmidt, hémisphère inférieur.
-  : Trace cyclographique du plan.
-  : Pole de faille, de schistosité et de diaclase
-  : Pole de fente de tension
-  : Polaire de schistosité
-  : Strie de mouvement de faille normale ou inverse (strie vers la périphérie ou vers le centre du canevas).
-  : Jeu décrochant dextre
-  : Jeu décrochant senestre
-  : Jeu normal ou inverse-décrochant dextre
-  : Jeu normal ou inverse-décrochant senestre
-  : Direction de compression (flèche centripète)
-  : Direction d'extension (flèche centrifuge)
-  : Contrainte normale principale maximale  $\sigma_1$
-  : Contrainte normale principale intermédiaire  $\sigma_2$
-  : Contrainte normale principale minimale  $\sigma_3$

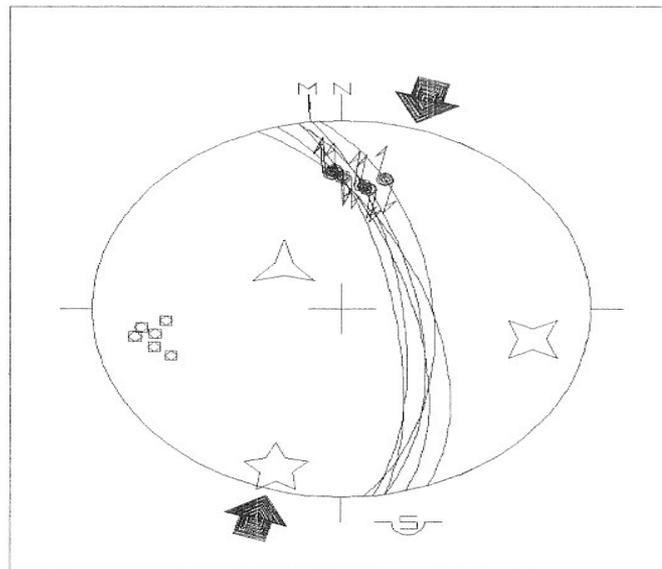
## 4-2). Résultats des mesures microtectonique

Les analyses tectoniques et microtectoniques que nous avons effectués dans la boutonnière de Beni Mellala, située dans la partie septentrionale du Moyen Atlas tabulaire, nous ont permis d'établir la chronologie des différentes phases tectoniques qui ont affecté la zone. Ceci par analyse des terrains paléozoïques.

### a - Phase tectonique : 1 d'âge Ante-Emsien

Cette phase d'âge hercynien (probablement antérieure à l'Emsien), est caractérisée par un régime compressif. Elle est divisée en deux épisodes :

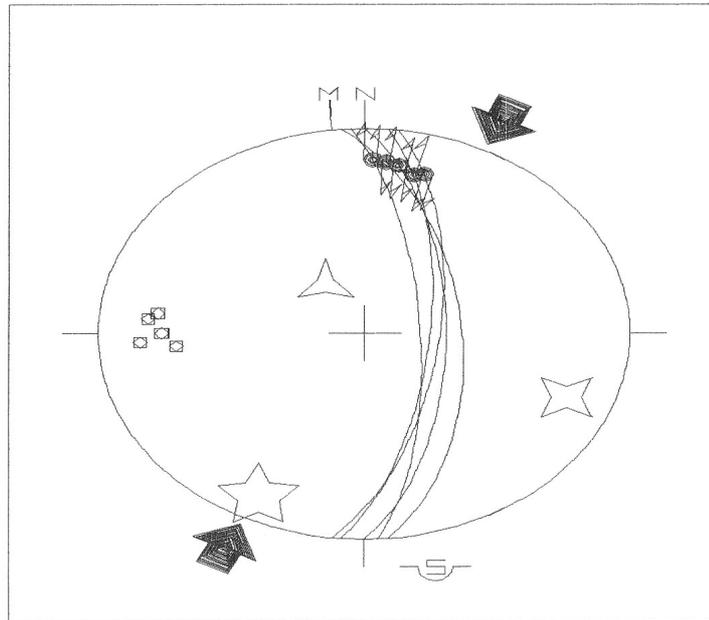
#### a-1). Premier épisode



**Fig. 12 : Jeu inverse à composante décrochante dextre des failles sub-méridiennes**

Cet épisode tectonique a pour rapport  $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = 0,54$ , il s'agit d'un régime compressif qui a donné naissance aux failles inverses à composante dextre, qui sont antérieures à la mise en place du quartz hydrothermal. L'axe de compression maximale est orienté vers le Nord, avec  $\sigma_1$  : N17, 12° SSW, l'axe d'extension a une direction N134 et un pendage de 64° NW,  $\sigma_2$  : N102, 23°ESE.

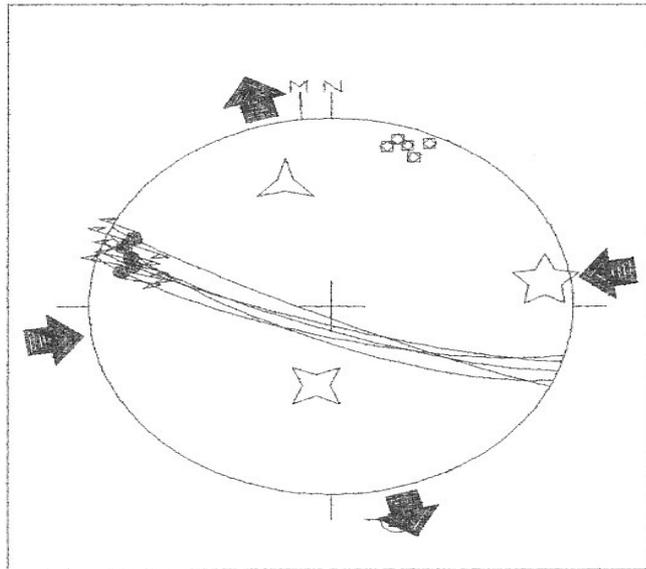
a-2). Deuxième épisode



**Fig. 13 : Stéréogramme des décrochements sub-méridiens dextres**

La principale caractérisation de cet épisode c'est qu'il appartient à la même phase de la cristallisation du quartz sous forme de filon, il a pour rapport  $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = 0,33$  ; donc un régime de compression supérieur au régime de l'épisode précédent. Il est attesté par des failles sub-méridiennes décrochantes dextres, dont l'axe de compression principale est orienté NNE-SSW. D'après les mesures que nous avons effectuées, nous avons trouvé que la faille principale est orientée N170 avec un pendage de 75° E. Le traitement automatique par le programme Tensor, nous a permis de trouver le paléo-champ de contraintes suivant : l'axe de contrainte maximale  $\sigma_1$  : N27, 13SSW ;  $\sigma_2$  : N112 avec un pendage de 19°ESE, et pour l'axe d'extension  $\sigma_3$  : N149 , 67°NW.

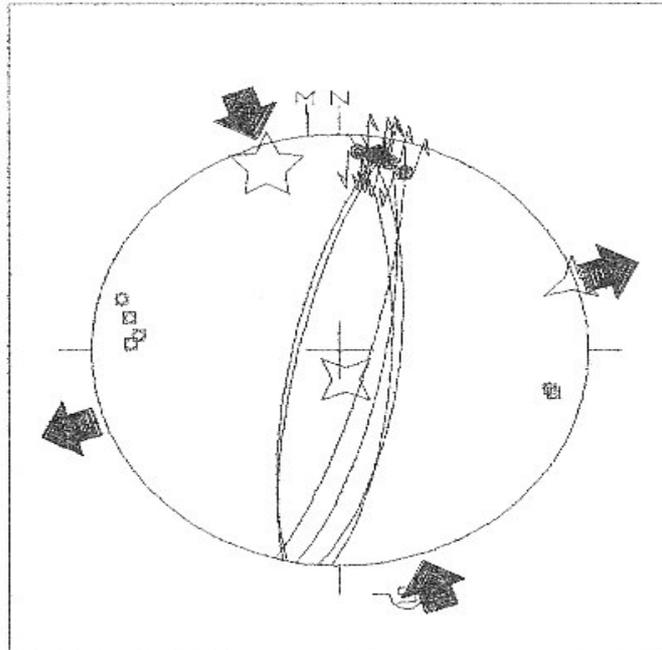
**b - Phase 2 d'âge Emsien à post-Emsien**



**Fig. 14 : Stéréogramme des décrochements senestres WNW-ESE qui décalent les filons de quartz sur failles**

Cette phase est postérieure à la minéralisation des filons de quartz. Les décrochements décalent les failles inverses qui sont liées à la minéralisation de quartz. D'après les mesures microtectoniques que nous avons réalisé, nous avons trouvé que la direction de la faille la plus importante qui est suivi par la vallée a une direction N110 avec un pendage de 80° vers le SSW, et un pitch de 15° W. Nous avons pu déterminer que le jeu correspond à un décrochement senestre, ce jeu a pour rapport  $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = 0.46$ , donc un régime compressive dont l'axe de compression maximale est orienté ENE-WSW (N81, 12ENE),  $\sigma_2$  est orienté N08 avec un pendage de 55° SSW, et un axe d'extension  $\sigma_3$  N164, 33°NNW.

a- Phase 3 d'âge Namurien à Permien

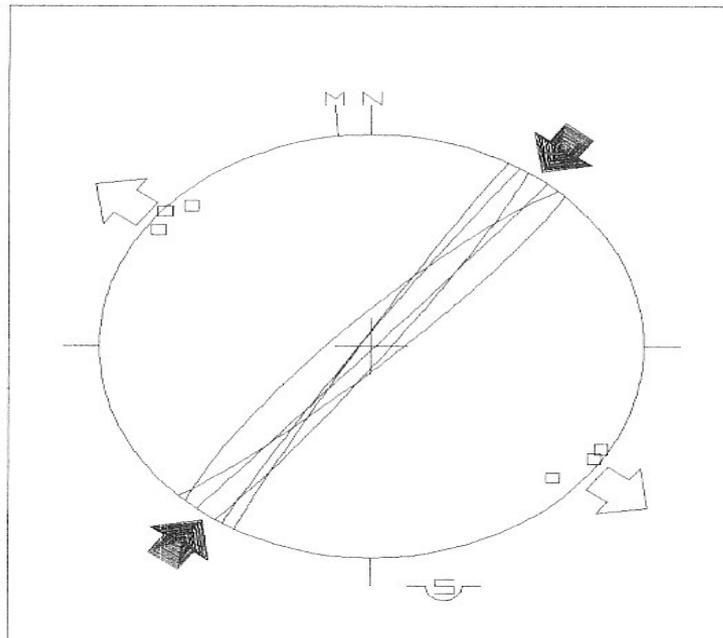


**Fig. 15 : stéréogramme des décrochements senestres NNE-SSW  
accompagnés de fentes a quartz subméridiennes**

Ce régime compressive est caractérisé par des failles décrochantes senestres, orientées NNE-SSW. Il a pour rapport  $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = 0,35$ . Les caractéristiques géométriques des axes de contraintes sont :  $\sigma_1$  : N161, 11 NNW ;  $\sigma_2$  : N169, 79 SSE ;  $\sigma_3$  : N71, 02ENE. Les décrochements sont accompagnés de fentes sub-méridiennes à quartz. L'âge de cette phase est retrouvé d'après les données bibliographiques (Michard, 1976 ; Bouabdelli, 1989 ; Hinaje, 2000).

➤ Les trois familles de fentes à quartz NE-SW, N-S et NW-SE

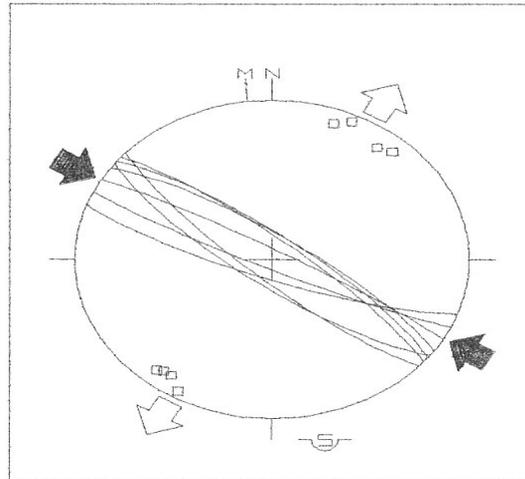
a- Phase 1 : compression d'âge antérieur au Viséen



**Fig.16 : compression N45 associée à l'extension N135 représentées par des fentes de tension à Quartz dans les couches ordoviciennes de la boutonnière de Beni Mellala**

Cette phase tectonique est caractérisée par des fentes rectilignes à quartz orientées NE-SW que nous avons mesuré dans les quartzites et les schistes d'âge Ordovicien. Cette phase tectonique de déformation hercynienne est attribuée à un âge antérieur au Viséen (Carbonifère inférieur) (Bouabdelli, 1982).

### Phase 2 : compression d'âge post Namurien probable

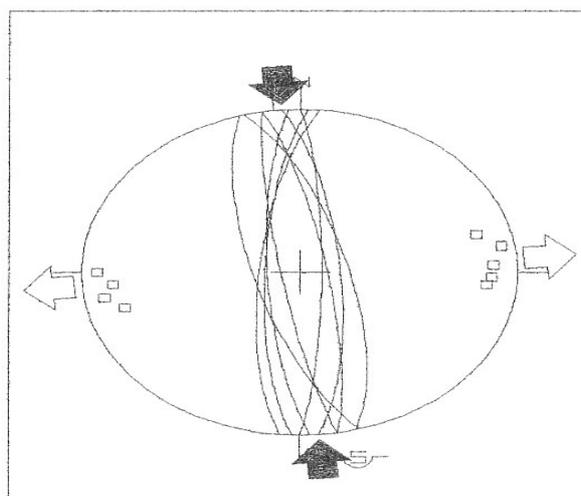


**Fig. 17 : compression NW-SE associée à l'extension NE-SW représentées par des fentes à Quartz dans les quartzites d'âge Ordovicien inférieur**

Cette compression est attestée surtout par des fentes de tension à Quartz orientées N130 à N 140. Elles sont compatibles avec une contrainte de compression maximale  $\sigma_1$  orientée NW-SE associée à une contrainte d'extension  $\sigma_3$  orientée NE-SW.

Cette Phase correspond à une déformation d'âge postérieure au Namurien (Bouabdelli, 1982).

### Phase 3 : compression d'âge Permo-Trias



**Fig. 18. : Compression N-S associée à l'extension E-W représentées par des fentes de tension à Quartz dans l'Ordovicien de la Boutonnière de Bni Mellala**

Cette phase tectonique a été datée dans d'autres secteurs du Maroc. Elle a été attribuée à la fin du cycle hercynien (Permo-Trias) (Hinaje, 1995).



**Fig. 19 : photo des fentes de tensions à quartz**



**Fig. 20 : photo des fentes de tensions de quartz**



# CHAPITRE III : LES FILONS DE QUARTZ HYDROTHERMAL

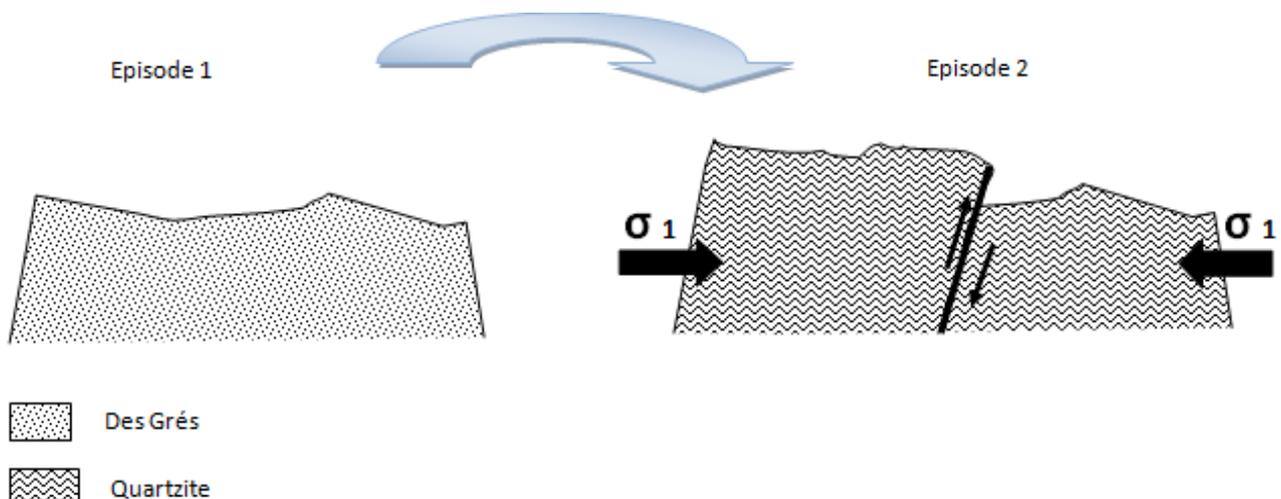
## 1)- Les étapes de la formation de ces filons

Les filons hydrothermaux sont des solutions aqueuses très chaudes (plusieurs centaines de degrés), qui sous l'effet d'une pression élevée, s'infiltrent dans les fractures des roches encaissantes, leur pression et leur température diminue au fur et à mesure qu'elles se rapprochent de la surface de la croûte terrestre. Elles déposent sur les parois des fissures une succession des minéraux selon les conditions de température et de pression qui constituent les filons hydrothermaux.

### 1-1). Phase 1: Fracturation du socle

Durant l'orogénèse hercynienne, de nombreuses failles de compression (failles inverse) se sont formées dans le socle Ordovicien de Bni Mellala ; lorsque ce dernier a commencé à subir des transformations métamorphiques. Les contraintes tectoniques et les élévations de pression et températures, provoquent les jeux de failles et décrochements, accompagnés de métamorphisme. Ce dernier a provoqué la transformation des grès ordoviciens en quartzites.

On simplifie ce qui est déjà expliqué dans la première phase de la formation des filons par deux épisodes selon les schémas ci-dessous :



**Fig .21 : Schéma montrant la fracturation du socle, et la transformation des grès en quartzite sous l'effet de l'orogénèse Hercynienne**

## 1-2). Phase 2: Circulations hydrothermales de hautes et moyennes températures

Durant le Carbonifère, la formation de la chaîne hercynienne a dégagé une énergie considérable qui a provoqué la remontée d'intrusions granitiques. Ces processus ont conduit au dégagement d'une forte chaleur qui a induit des circulations de fluides hydrothermaux de haute et moyenne température. En effet, une forte chaleur ( $\sim 400^{\circ}\text{C}$ ) provoque l'expulsion de l'eau contenue dans les roches qui va dissoudre et entraîner avec elle de nombreux minéraux présents en petite quantité dans la roche. La silice ( $\text{SiO}_2$ ), abondante dans les roches cristallines, est le plus important minéral dissous et constitue donc la gangue des filons de haute et moyenne température. D'autres éléments solubles à haute température peuvent l'accompagner selon la température et la composition de la roche : étain (Sn), molybdène (Mo), antimoine (Sb), titane (Ti), cuivre (Cu), fer (Fe), etc...

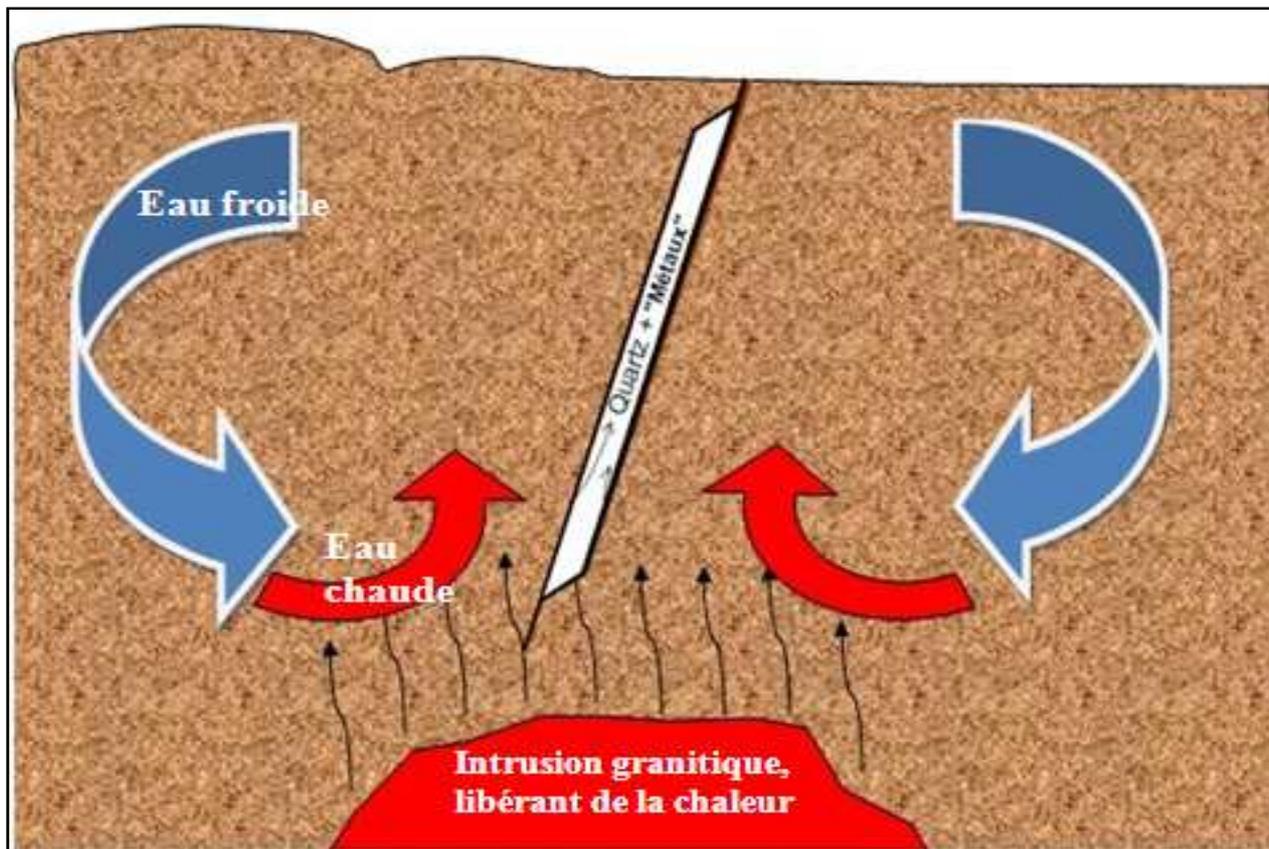


Fig .22 : schéma montrant le mécanisme de la formation des filons de quartz hydrothermal



L'eau chaude étant moins dense que la roche ; les fluides minéralisés vont remonter vers la surface en suivant les failles existantes (effet de pompe hydrostatique). La température des fluides diminuant au cours de leur remontée, les minéraux vont cristalliser et se déposer sur les parois de ces failles. On aboutit ainsi à la formation d'un filon hydrothermal de haute température qui ne peut se former que durant les orogènes actives, souvent en périphérie des intrusions granitiques. Ces circulations hydrothermales de haute température obéissent donc à des mouvements exclusivement ascendants alimentés par de l'eau endogène. De tels filons sont essentiellement remplis de Quartz qui peut parfois être associé à des minéraux "métalliques", tels que Pyrite, Chalcopyrite, Galène, Molybdénite, etc... . Si les conditions sont favorables (la composition de l'encaissant, la profondeur...) le remplissage des fractures se poursuit et peut même donner naissance à des gîtes minéralisés.

## 2)-Relation entre fracturation et minéralisation

### 2-1) Les phases tectoniques liées à la minéralisation de quartz

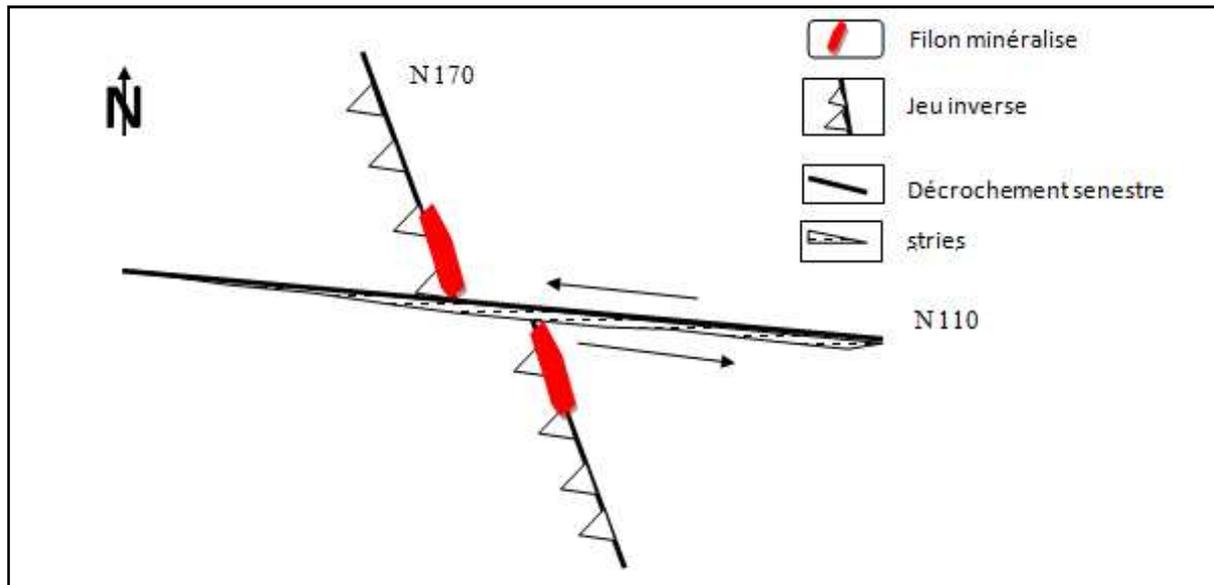
#### **a. Phase 1 : Anté-Emsien**

L'analyse microtectonique que nous avons effectuée dans la boutonnière du Beni Mellala, nous a permis de mettre en évidence trois phases tectoniques majeures qui sont :

- la première phase correspond à une compression NNE-SSW d'âge antérieur à l'Emsien (Bouabdelli 1989). Ce régime tectonique a donné naissance à des failles inverses sub-méridiennes, à composante décrochante dextre ;

- la deuxième phase correspond à un régime compressif attesté par des décrochements dextres orientés NNE-SSW. Ces failles appartiennent à la même phase de la mise en place du quartz sous forme de filon qui ont une direction N170, avec un pendage sub-vertical (75°).

- la troisième phase tectonique est d'âge Emsien (Bouabdelli, 1989). Il est caractérisé par un axe de compression maximale  $\sigma_1$  orienté ENE-WSW. Il est responsable du jeu décrochant senestre des failles orientées N110. (Fig.19).



**Fig. 23 : schéma montrant le jeu décrochant senestre de la faille N110, qui a décalé les filons de quartz sur faille N170 qui est suivie par la vallée centrale de la boutonnière**



**Fig. 24 : photo de filon principale à quartz situé sur la faille N170 au Nord de la vallée**

C'est une faille avec filon de quartz. La faille a une direction N110 et décale une autre faille N170. Puisqu'il y a la présence des stries sur le quartz, alors c'est un jeu postérieur à la minéralisation quartzifère.

Miroir de faille strié : N10, 75°E pitch 12°N, jeu dextre



**Fig. 25 : photos de filons de quartz hydrothermal sur failles subméridiennes**

### *3) L'utilisation de la silice dans l'industrie*

Le quartz et la cristobalite sont principalement utilisés par l'industrie sous forme granulaire, ou pulvérulente constituée de particules plus fines. Sous ces deux états, la silice est dure, chimiquement inerte et son point de fusion est élevé en raison de l'énergie de liaison du réseau cristallin. Ces qualités sont particulièrement recherchées dans diverses utilisations industrielles. Parmi lesquelles on peut citer les industries ci-dessous.



**Fig. 26 : photo de poudre de quartz**

#### *3-1) Peintures et plastiques:*

La silice cristalline, sous forme de quartz et de cristobalite, est utilisée à l'état le plus finement divisé comme charge de renforcement dans tous ces produits. La poudre de silice apporte une résistance à l'abrasion et à l'attaque chimique. Les revêtements autonettoyants pour murs extérieurs et les peintures de haute résistance pour des applications maritimes ou des installations off-shore en sont des exemples typiques. Les propriétés intrinsèques de la poudre de silice la rendent utile dans les plastiques d'enrobage.



### 3-2) Verre:

La silice est le composant principal de presque tous les types de verres pour les récipients (bouteilles, ...), le verre plat (vitres, miroirs, pare-brise), la vaisselle (verres, récipients, carafes), le verre d'éclairage (ampoules, tubes fluorescents), les écrans de TV et d'ordinateurs (y compris les écrans plats), le verre de décoration, le verre optique, etc. Les fibres de verre, utilisées surtout pour renforcer les matériaux composites ou dans les tissus décoratifs sont fabriquées à partir de poudre finement broyée. Quant à la laine de verre, elle est utilisée pour l'isolation thermique et autre.

### 3-3) Pièces de fonderie:

La silice cristalline possède un point de fusion supérieur à celui du fer, du cuivre et de l'aluminium. Cette propriété permet de réaliser des pièces moulées par coulage de métal en fusion dans des moules constitués de sable de silice et d'un liant. Les pièces coulées sont utilisées dans les industries mécaniques et les industries de fabrication. Les poudres de quartz et de cristobalite sont les principaux composants utilisés en moulage de précision pour la réalisation de produits dans divers secteurs tels que la joaillerie, les prothèses dentaires, les turbines d'avions etc.

### 3-4) Filtration:

Le sable de silice préparé avec un faible écart granulométrique est utilisé comme filtre dans le traitement des eaux usées ; pour séparer les matières solides.

### 3-5) Produits de construction et matières premières:

Le sable et les poudres de silice sont les matériaux de base du secteur de la construction. Parmi les nombreuses applications on peut citer la fabrication du ciment, les enduits, les produits de ragréage, les blocs de silice et de béton cellulaire, les colles pour les revêtements de toiture et de sol, les mortiers pour la pose de carrelage et de gobetis, les marquages routiers, le carton bitumé et les systèmes d'injection de ciment et de résines.



### 3-6).Sports et loisirs :

Le sable de silice est utilisé pour les terrains d'équitation, ainsi que pour l'aménagement de champs de courses résistant aux conditions climatiques. Il est également utilisé pour la réalisation de couches d'enracinement et comme matériau de drainage pour les terrains de sports professionnels (football, rugby ...) et pour les terrains de golf. Sans oublier son utilisation dans les bacs à sable et pour la construction de châteaux de sable.

### 3-7) Application dans l'exploitation pétrolière:

Le sable de silice à granularité élevée et à grains sphériques est injecté dans les puits de pétrole pour améliorer la perméabilité et la récupération du pétrole dans les champs pétrolifères.

### 3-8) Secteur chimique:

Le sable de cristobalite et le quartz de pureté élevée sont utilisés pour fabriquer des produits chimiques à base de silicium, comme le silicate de sodium, le gel de silice, les silicones, le tétrachlorure de silicium, les silanes et le silicium pur. Le silicium pur est utilisé pour les puces électroniques qui constituent le cœur de l'informatique. Les produits à base de silicium sont employés dans la production de détergents, de produits pharmaceutiques et de cosmétiques.

### 3-10) Industrie métallurgique (Panneaux solaires)

Le silicium est nécessaire pour exploiter ses propriétés de semi-conducteur pour la fabrication de composants électroniques ou de panneaux solaires.

On fait subir à cette silice de très hautes températures dans des fours et on obtient du silicium métallurgique: c'est la matière première" de toute la chaîne qui aboutit aux panneaux solaires,

Ce silicium métallurgique, encore "pollué" par du bore, du phosphore, des poussières, est purifié par un procédé chimique qui utilise de l'acide chlorhydrique et produit un gaz qui contient le silicium.

Ce gaz est ensuite soumis à un procédé électro-métallurgique qui fait se déposer les atomes de silicium sur des filaments.

A la sortie, les filaments se sont épaissis et sont devenus des "barreaux" d'une dizaine de centimètres de diamètre. Ces barreaux de silicium sont concassés, fondus et transformés en lingots qui sont découpés en lamelles qui sont enfin de "qualité solaire". Ces tranches de silicium subissent encore un traitement qui en fait des cellules photovoltaïques, des carrés de 15 cm de côté dont les propriétés de semi-conducteur transforment le rayonnement du soleil en électricité.

Les cellules sont juxtaposées pour former un "module photovoltaïque", couramment appelé "panneau solaire (photovoltaïque)", à ne pas confondre avec un panneau solaire thermique qui ne contient pas le moindre atome de silicium mais de l'acier.



**Fig. 27: photo d'un Panneau solaire**



# Conclusion

Ce travail a pour but d'effectuer une étude de la boutonnière de Bni Mellala (situé dans le causse moyen atlasique) et l'étude des filons de quartz hydrothermal qui sont lié aux failles hercyniennes. Cette étude nous a permis de savoir :

- la situation géographique de la boutonnière
- sa structure
- la stratigraphie du socle et de la couverture
- faire l'analyse microtectonique
- faire une comparaison entre la zone étudiée et les autre boutonnières du cause moyen atlasique (kandar, bhalil..)
- l'affleurement des filons de quartz hydrothermal
- la formation des filons de quartz hydrothermal
- l'utilisation de la silice dans l'industrie...

Durant l'élaboration de ce travail on a pu acquérir le sens du travail en groupe aussi bien qu'on a pu renforcer et approfondir les connaissances acquises durant notre cursus d'étude universitaire.



# Bibliographie

**BOUABDELLI, M. (1982).**- Stratigraphie et évolution structurale du Paléozoïque d'Azzrou(NE du Maroc central ).Thèse Doctorat 3ème cycle 164p.Université Louis Pasteur, Strasbourg, France

**BOUABDELLI, M. (1989).**-Tectonique et Sédimentation dans un bassin orogénique : le sillon Viséen d'azrou-Khenifra (Est du Massif hercynien central du Maroc).Thèse Docotart és-Sciences 262p.Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.

**BOUABDELLI, M et A.PIQUÉ. (1996).**- du bassin sur décrochements au bassin d'avant pays : dynamique du bassin d'Azrou-Khénifra"(Maroc hercynien central" (Journal of african earth sciences.Vol.23, No.2, pp213-214).

**CHARRIERE A. (1990).** - Héritage hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intracontinentale : le Moyen Atlas au SE de Fès (Maroc). Thèse Doct. Etat, Toulouse, 589p.

**CHOUBERT G. et MARCAIS J. (1952).** - Aperçu structural. In 19° Gong. Géol. Int., Alger, « Géologie du Maroc » (Monog. Régio., 3° sér. : Maroc), n° 6, p. 9-73

**COLO G. (1961-64).** - Contribution à l'étude du Jurassique du Moyen Atlas septentrional. Notes et Mém. serv. Géol. Maroc, n° 139, 226 p., 2 vol.

**Duée et al. (1977).** – l'accident nord moyen atlasique dans la région de Boulmane (Maorc) : une zone de coulissement synsédimentaire. Ann. Soc. Géol. Nord, XCVIII, p.145-162

**DRESNAY R. du (1972).** - Sédiments carbonates intercotidaux et supra - cotidaux du Lias inférieur dans le domaine atlasique marocain. C. R. Acad. Se. Paris vol. 275, sér. D. p. 341-344.



**DRESNAY R. du (1972).** - Les phénomènes de bordure des constitutions carbonatées du Lias moyen du Haut Atlas oriental (Maroc). C. R. Acad. Sci. Paris, 275 D, pp. 535-537.

**FEDAN B. (1988).**- Evolution géodynamique d'un bassin intraplaque Cénozoïque. Thèse doctorat d'état. Univ. Mohammed V, RABAT, 338p, 124 fig., Annexes h.t.

**HINAJE S. (1995).** – Apport de l'analyse de la tectonique cassante tardi et post-panafricaine à la modélisation de la mise en place des minéralisations dans la boutonnière de bou-azzar (Anti-Atlas; Maroc). Thèse Doct. 3ème cycle, 238p+carte h.t.

**HINAJE S. (2004).** – Tectonique cassante et paléochamps de contrainte dans le Moyen Atlas et la Haut Atlas central (Midelt-Errachidia) depuis le trias jusqu'à l'actuel. Thèse Doct. Etat, Rabat, 364p

**LA VILLE E. (1977).**- L'évolution sédimentaire et tectonique de la couverture Jurassique de la région d'Imouzzer des Marmoucha (Moyen-Atlas, Maroc). Bull, Soc. Géol. Fr., (7), t.XIX, n°5, p. 1151-1158.

**LAVILLE E., LES AGE J. L. et SEGURET M. (1977).**- Géométrie cinématique et dynamique de la tectonique atlasique sur le versant sud du Haut Atlas marocain. Aperçu sur les tectoniques hercyniennes et tardi-hercyniennes. Bull. Soc. Géol. France (7), t. XIX, n° 3, pp. 527-539.

**MICHARD A. (1976).**- Elément de géologie marocaine. Notes et mém. Serv. . Géol. Maroc, 252, 408p.

**OUARHACHE D. (1987).** - Etude géologique dans le paléozoïque et le Trias de la bordure NW du causse moyen-atlasique (S et SW de Fès, Maroc). Thèse 3° cycle, Toulouse, 130 p.

**PIQUE A. et MICHARD A. (1981).**- Les Zones structurales du Maroc hercynien .sci. Géol. Bull., 34, 2, p.135-146.

**PIQUE, A (1944) :** Géologie du Maroc, les domaines régionaux et leur évolution structurale, Edit. PUMAG, Marrakech, 284p



**SABAOUI A. (1987).**- Structure et évolution alpine du Moyen-Atlas septentrional sur la transversale Tleta des Zerarda -Merhraoua (Sud Ouest de Taza, Maroc). Thèse 3<sup>o</sup> cycle. Toulouse, 189p.

**SABAOUI A. (1998).**- Rôles des inversions dans l'évolution méso-cénozoïque du Moyen-Atlas Septentrional (Maroc). L'exemple de la transversale El Menzel - Ribat Al Khayr - Bou Iblane. Thèse Doct. Etat, Rabat, 410p.

**SABAOUI A. (1998).** - Rôles des inversions dans l'évolution méso-cénozoïque du Moyen-Atlas Septentrional (Maroc). L'exemple de la transversale El Menzel - Ribat Al Khayr - Bou Iblane. Thèse Doct. Etat, Rabat, 410p.

**SABAOUI A. et HINAJE S. (2000).** - Le Néogène du Moyen Atlas : évolution tectono-sédimentaire, paléogéographie superposée et essai de corrélation avec le couloir sud-rifain. XI congress of régional committee on Mediterranean néogène stratigraphy.