



AVIS DE SOUTENANCE DE THESE

Le Doyen de la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz –Fès – annonce que

Mr **JEDDI El Mehdi**

Soutiendra : **le Samedi 26/10/2024 à 10H00**

Lieu : **CURI –USMBA**

Une thèse intitulée :

« Géodynamique et thermicité lié aux eaux thermales nord-orientales, du Maroc : une contribution multidisciplinaire pour la compréhension des systèmes hydrothermaux et le développement durable de la région »

En vue d'obtenir le Doctorat

FD : Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable

Spécialité : Géosciences et Ressources Naturelles

Devant le jury composé comme suit :

Nom et prénom	Etablissement	Grade	Qualité
Pr OUALI Houssa	Faculté des Sciences, Meknès	PES	Président
Pr Maria do Rosário da Encarnação de Carvalho	Faculté des Sciences, Lisbonne	PES	Rapporteur & Examineur
Pr Eduardo Enselmo Ferreira da Silva	Faculté des Sciences, Aveiro	PES	Rapporteur & Examineur
Pr DRIOUCH Youssef	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès	PES	Rapporteur & Examineur
Pr BENTO DOS SANTOS M. Telmo	Faculté des Sciences, Lisbonne	PES	Examineur
Pr BENAABIDATE Lahcen	Faculté des Sciences et Techniques, Fès	PES	Examineur
Pr BENSLIMANE Anasse	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès	PES	Examineur
Pr SMAILI My Hachem	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès	MC	Invité
Pr NTARMOUCHANT Ahmed	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès	PES	Directeur de thèse



Résumé :

Le Maroc septentrional offre un potentiel hydro-géothermique important par une multitude de résurgences thermo-minérales considérable qui y affleurent. Ces résurgences, concentrées dans sa partie orientale, sont étroitement associées aux principales structures tectoniques actives ayant une extension régionale, notamment l'accident majeur de Melilla-Fès-Smaala-Oulmès (MFSO) dans le Rif et la meseta et les accidents majeurs parcourant le domaine Moyen Atlasique comme les accidents Nord Moyen Atlasique et Sud Moyen Atlasique. Ces structures lithosphériques, généralement orientées NE-SW, forment des corridors complexes à jeux multiples.

L'étude multidisciplinaire a été menée sur seize résurgences thermo-minérales soigneusement sélectionnées et associées aux structures précitées (MFSO, ANMA, ASMA). Huit d'entre elles sont gazeuses sourdant le long de l'accident majeur MFSO, alors que les huit autres sont associées aux accidents du Moyen Atlas. Ces sources présentent des températures d'émergence variant de 20 à 53,6 °C et des faciès hydrochimiques principalement chloruré-sodique et bicarbonaté.

L'analyse approfondie des compositions géochimiques (éléments majeurs, traces et terres rares, isotopes et gaz) des eaux de ces sources, révèle des informations importantes sur leur origine et les caractéristiques des réservoirs profonds. Ces données mettent en évidence d'intenses interactions eau-roche-gaz au sein de réservoirs de nature lithologique variée, interconnectés par les réseaux de fractures générés par les accidents majeurs lithosphériques précités. Les réservoirs identifiés comprennent le socle cristallophyllien du Paléozoïque, les formations argileuses évaporitiques du Trias, les carbonates du Jurassiques et les marnes du crétacées et du Miocène. Les estimations de température pour ces réservoirs varient entre 80 et 200 °C, soulignant ainsi un important potentiel géothermique des régions du Rif oriental et du Moyen Atlas.

Les compositions isotopiques de ces eaux, varient de -9,08 à -5,2‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et de -58,8 à -30,1‰ pour le $\delta^2\text{H}$, suggérant une origine météorique. Leurs zones de recharge se situeraient au niveau des reliefs dépassant 1000m dans le Rif et 2000m dans le Moyen Atlas. La phase gazeuse présente dans les eaux des sources associées à la MFSO, affiche des signatures isotopiques $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ (-19,3 ‰ à -4,25 ‰) et $^3\text{He}/^4\text{He}$ (0,203-3,864 Ra) d'origine mantellique, suggérant un enracinement profond de cet accident. Les teneurs en hélium mantellique décroissent du SE au NE le long de la faille MFSO, depuis le socle mesetien paléozoïque vers les formations plus récentes affleurant dans le Pré-rif et le Mésorif. Cette diminution est contrôlée par le mélange avec des gaz issus de la couverture sédimentaire secondaire et tertiaire, ainsi que par l'influence des gaz d'arc volcanique méditerranéen relevé dans les eaux des sources dans la zone septentrionale de la MFSO.

Enfin, ce travail a abouti, pour la première fois, à l'élaboration d'une modélisation hydrogéochimique qui met en évidence :

- Le rôle fondamental de l'accident MFSO dans l'architecture structurale et l'hydrodynamique régionale du Maroc septentrional. La MFSO constitue un système ouvert dont la perméabilité favoriserait la diffusion de la chaleur et des gaz mantelliques et faciliterait la circulation des fluides en profondeur et leur transfert vers la surface. Son comportement asismique, lié à la pression des fluides et à la précipitation des minéraux argileux hydrothermaux secondaires, réduit les frottements le long de cette faille.
- L'existence de systèmes volcaniques-hydrothermaux profonds sous les corridors aménagés par l'ANMA et l'ASMA dans le domaine moyen atlasique où l'interaction eau-roches magmatiques est fortement pressentie par les compositions chimiques de ces eaux. La présence des xénolithes de roches mafiques à ultramafiques et mantelliques au sein des produits volcaniques plioquaternaires est une preuve tangible de l'existence de ces roches magmatiques en profondeur. Une telle preuve appuie l'hypothèse de l'existence de systèmes volcaniques-hydrothermaux profonds.

Mots clés :

Sources thermo-minérales ; Géochimie ; interactions eau-roche-gaz ; Isotopes ; Rif oriental ; Moyen Atlas ; Faille de Melilla-Fès-Smaala-Oulmès



Geodynamics and thermicity related to the thermal waters of north-eastern Morocco: a multidisciplinary contribution to understanding hydrothermal systems and sustainable development in the region

Abstract :

Northern Morocco offers significant hydro-geothermal potential, with a large number of thermo-mineral resurgences with outcropping there. These resurgences, concentrated in the eastern part of the country, are closely associated with the main active tectonic structures with a regional extension, in particular the Melilla-Fès-Smaala-Oulmès (MFSO) major fault in the Rif and meseta and the major faults running through the Middle Atlas domain, such as the North Middle Atlas and South Middle Atlas faults. These lithospheric structures, generally oriented NE-SW, form complex corridors with multiple-play tectonics.

The multidisciplinary study was carried out on sixteen carefully selected thermo-mineral resurgences associated with the above-mentioned structures (MFSO, ANMA, ASMA). Eight of these are gaseous springs emerging along the MFSO major fault, while the other eight are associated with the Middle Atlas faults. These springs have emergence temperatures ranging from 20 to 53.6°C and hydrochemical facies that are mainly chloride-sodium and bicarbonate.

Detailed analysis of the geochemical compositions (major, trace and rare earth elements, isotopes and gases) of the water from these springs reveals important information about their origin and the characteristics of the deep reservoirs. These data highlight intense water-rock-gas interactions within reservoirs of varied lithological nature, interconnected by fracture networks generated by the major lithospheric faults mentioned above. The reservoirs identified include Paleozoic crystalline basement, Triassic evaporitic clay formations, Jurassic carbonates and Cretaceous and Miocene marls. Temperature estimates for these reservoirs range between 80 and 200°C, highlighting the significant geothermal potential of the Eastern Rif and Middle Atlas regions.

The isotopic compositions of these waters, vary from -9.08 to -5.2‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and from -58.8 to -30.1‰ for $\delta^2\text{H}$, suggesting a meteoric origin. Their recharge zones are thought to be located at the level of reliefs exceeding 1000m in the Rif and 2000m in the Middle Atlas. The gas phase present in the spring waters associated with the MFSO, displays $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ (-19.3 ‰ to -4.25 ‰) and $^3\text{He}/^4\text{He}$ (0.203-3.864 Ra) isotopic signatures of mantle origin, suggesting a deep rooting of this fault. Mantle helium contents decrease from SE to NE along the MFSO fault, from the Paleozoic Mesian basement towards the younger formations outcropping in the Prérif and Mesorif. This decrease is controlled by mixing with gases from the secondary and tertiary sedimentary cover, as well as by the influence of gases from the Mediterranean volcanic arc found in spring waters in the northern zone of the MFSO.

Finally, this work has led, for the first time, to the development of a hydrogeochemical model that highlights:

- The fundamental role of the MFSO accident in the structural architecture and regional hydrodynamics of northern Morocco. The MFSO is an open system whose permeability favours the diffusion of heat and mantle gases and facilitates the circulation of fluids at depth and their transfer to the surface. Its aseismic behaviour, linked to fluid pressure and the precipitation of secondary hydrothermal clay minerals, reduces friction along this fault.
- The existence of deep volcanic-hydrothermal systems beneath the corridors developed by ANMA and ASMA in the Middle Atlas region, where water-magmatic rock interaction is strongly suggested by the chemical compositions of these waters. The presence of xenoliths of mafic to ultramafic and mantle rocks within plioquaternary volcanic products is tangible proof of the existence of these magmatic rocks at depth. Such evidence supports the hypothesis of the existence of deep volcanic-hydrothermal systems.

Key Words:

Thermal springs; Geochemistry; Rock-water-gas interaction; Isotopes; Eastern rif; Middle Atlas; Melilla-Fès-Smaala-Oulmès Fault