



UNIVERSITE IBN ZOHR
CENTRE DES ETUDES DOCTORALES IBN ZOHR
FACULTE DES SCIENCES D'AGADIR



Formation doctorale : **Géosciences Appliquées et Géo-environnement**
Laboratoire : **Géologie Appliquée et Géo-Environnement**
Spécialité : **Hydrogéologie – Hydrogéochimie**

**Caractérisation Chimique et Isotopique des eaux
souterraines de l'Anti-Atlas occidental (Maroc) :**
**Recharge, Interaction eau-roche, Salinité et
Temps de séjours**

Najat ETTAYFI



**UNIVERSITÉ
PARIS-SUD 11**



IAEA

Collaborations Menées

Ce travail de recherche est réalisé au **LAGAGE – UIZ** dans le cadre :

De la convention UIZ-ABHSMD

Notre partenaire principal pour nos recherches dans le domaine de l'eau

Et des projets financés par :

● **Projet NATO SFP 983134 (USA)** “Investigating salinity and radioactivity in water resources in Morocco” **2008-2012**.

● **Action Concertée CNRST-CNRS SDU/10/08** “Chemical and isotopic study of groundwater in Anti-Atlas in collaboration with University of Paris-Sud ” **2008-2011**.

● **Projet entre l'Université de Bonn (Allemagne) et l'Université Ibn Zohr (Maroc)**“Deterioration of groundwater resources in the southern oases of Morocco under environmental change: Souss-Massa-Drâa region”. **2011-2013**.

● **Projet en collaboration avec l' Agence International d'Energie Atomique** “ The use of environmental isotopes to assess sustainability of intensively exploited aquifer systems ” **2012-2015**.

Plan

Introduction Générale

*Partie 1 : Présentation générale
de la région de Lakhssas – Tafraout*

Partie 2 : Matériels et Méthodes

Partie 3 : Résultats

Partie 4 : Discussions

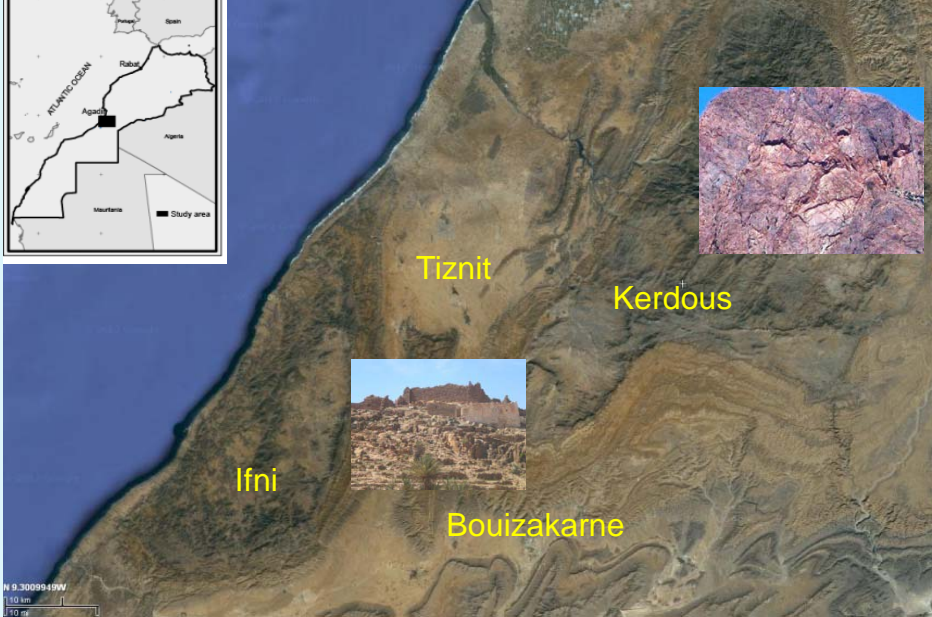
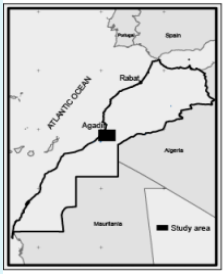
Conclusion Générale

Perspectives

Introduction Générale

- Zone semi-aride située au Sud-Ouest de l'Anti-Atlas Marocain.

- Lithologie très variée avec dominance des formations cristallines et carbonatées



- Formations très fissurées et faillées avec des phénomènes karstiques bien avancés dans les carbonates.

- **Aquifères potentiels** se manifestant par de nombreuses **sources** plus ou moins importantes.



1

Contexte d'étude et Problématique

- La région connaît un déficit hydrique important à cause des **cycles de sécheresse prolongés**.
- Malgré le maintien d'un **écoulement de base significatif** de la majorité des sources de la région étudiée, on constate une dégradation qualitative et quantitative des ressources en eau souterraine (**Augmentation de la salinité** → **surexploitation** et de la **baisse de recharge** de la ressource).

Les études hydrogéologiques fondées généralement sur quelques mesures hydrologiques de débits ne sont pas suffisantes pour caractériser le système aquifère et sa durabilité.

D'où l'intérêt de compléter les études hydrologiques par une caractérisation **hydrogéochimique** et **isotopique** des eaux souterraines de la région

2

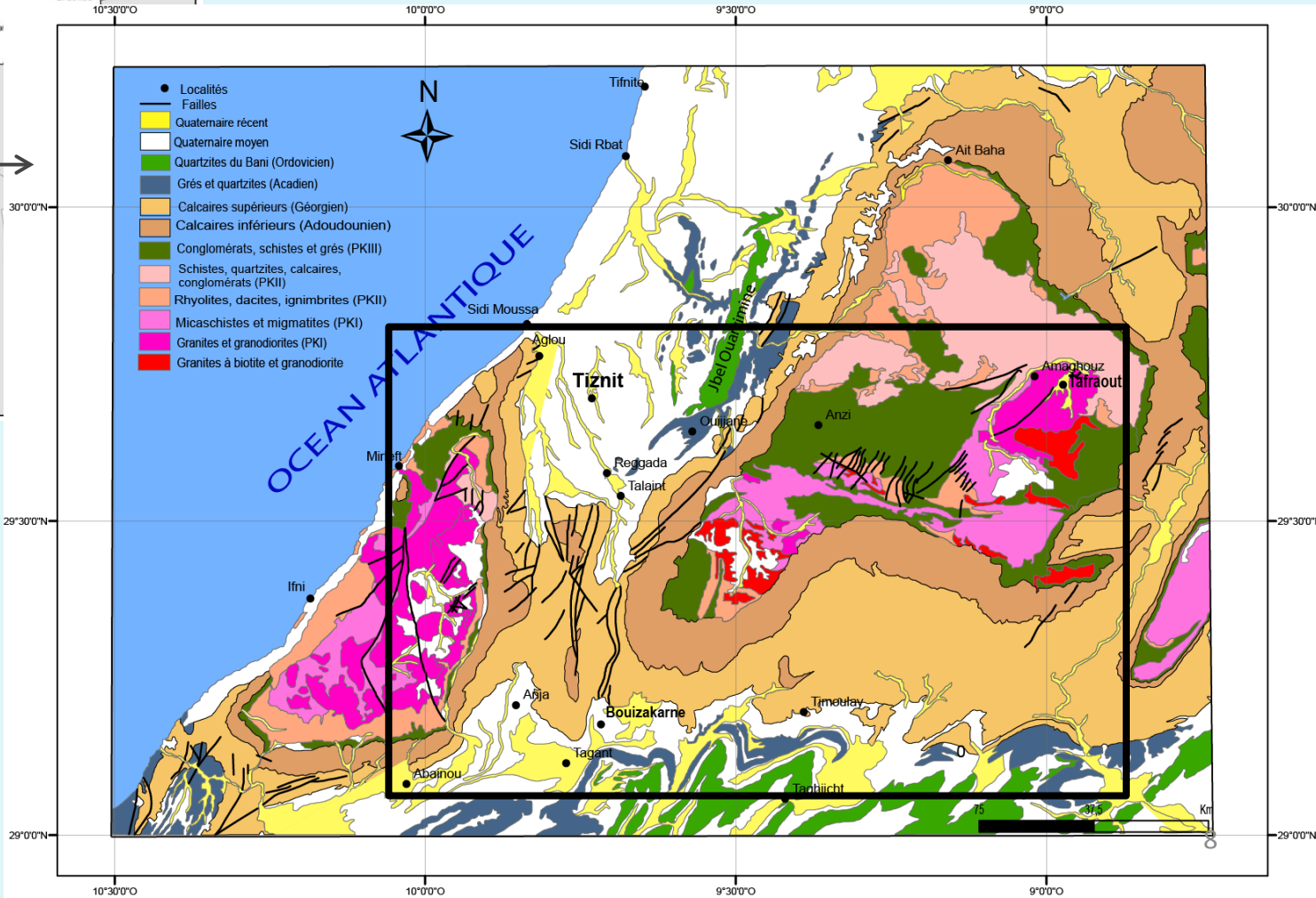
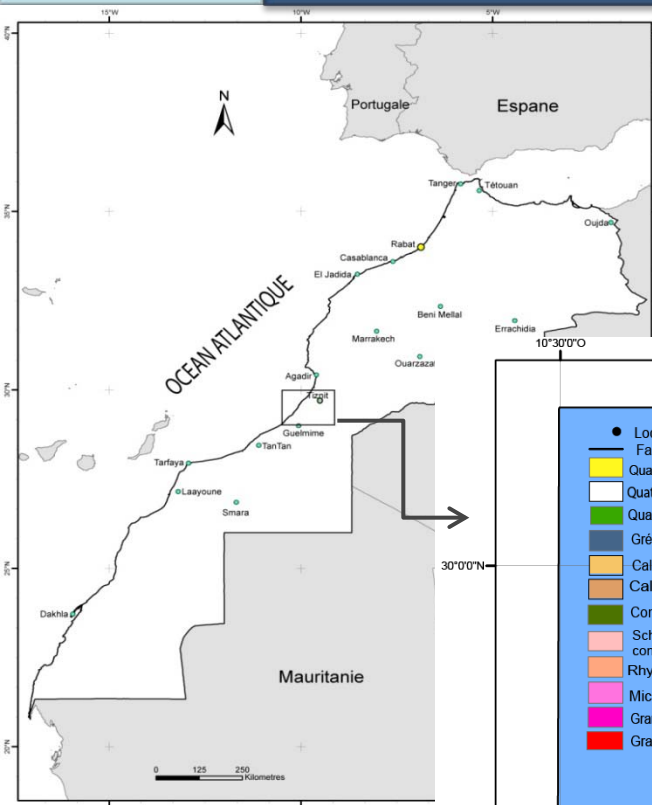
Objectifs

Notre travail de recherche vise à :

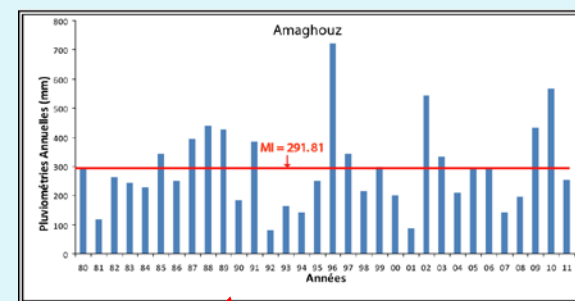
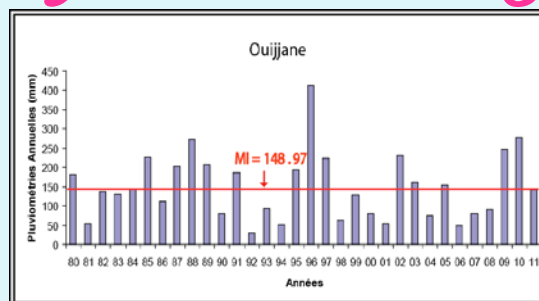
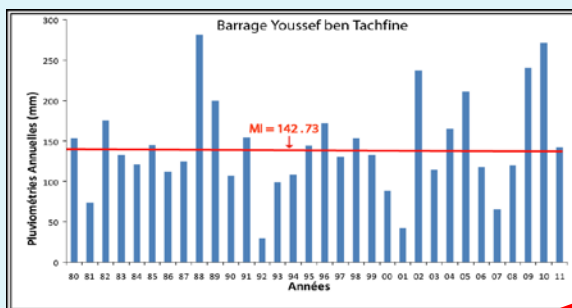
- Caractériser les eaux souterraines de la région de Lakhssas – Tafraout ;
- Rechercher les différentes **modalités de recharge** ;
- Etudier **l'origine de la salinité** ;
- Préciser **le temps de séjour** de l'eau dans l'aquifère ;
- Evaluer l'impact de **l'interaction roche – eau** sur la qualité de l'eau et le temps de séjour apparent détecté par datation au radiocarbone ;

*PRÉSENTATION GÉNÉRALE
DE LA RÉGION LAKHSSAS-
TAFRAOUI*

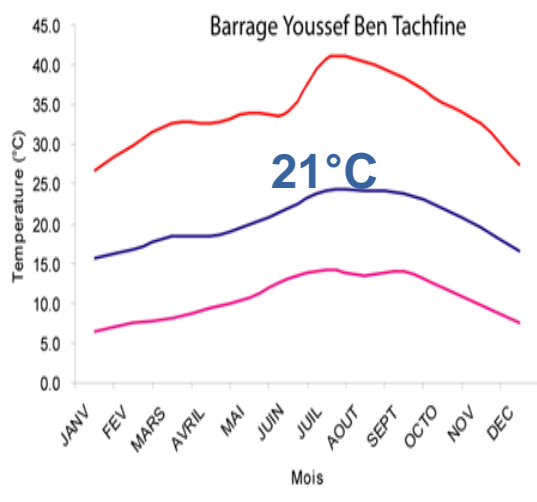
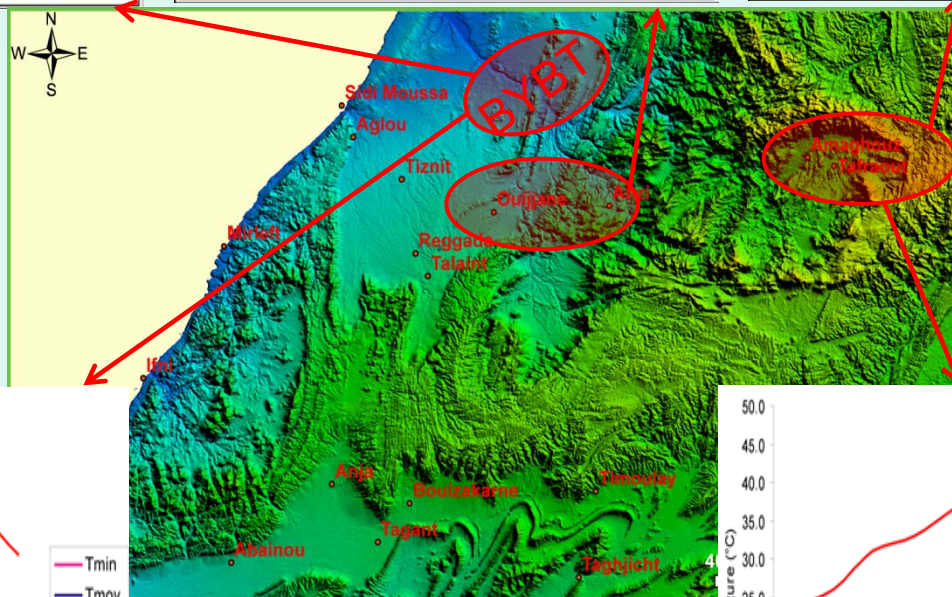
Situation Géographique



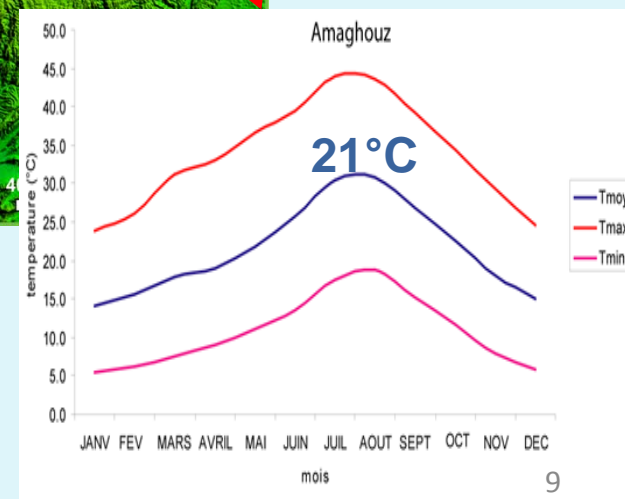
Hydroclimatologie



La moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de 150 mm et peut atteindre 300 mm à Amaghouz.

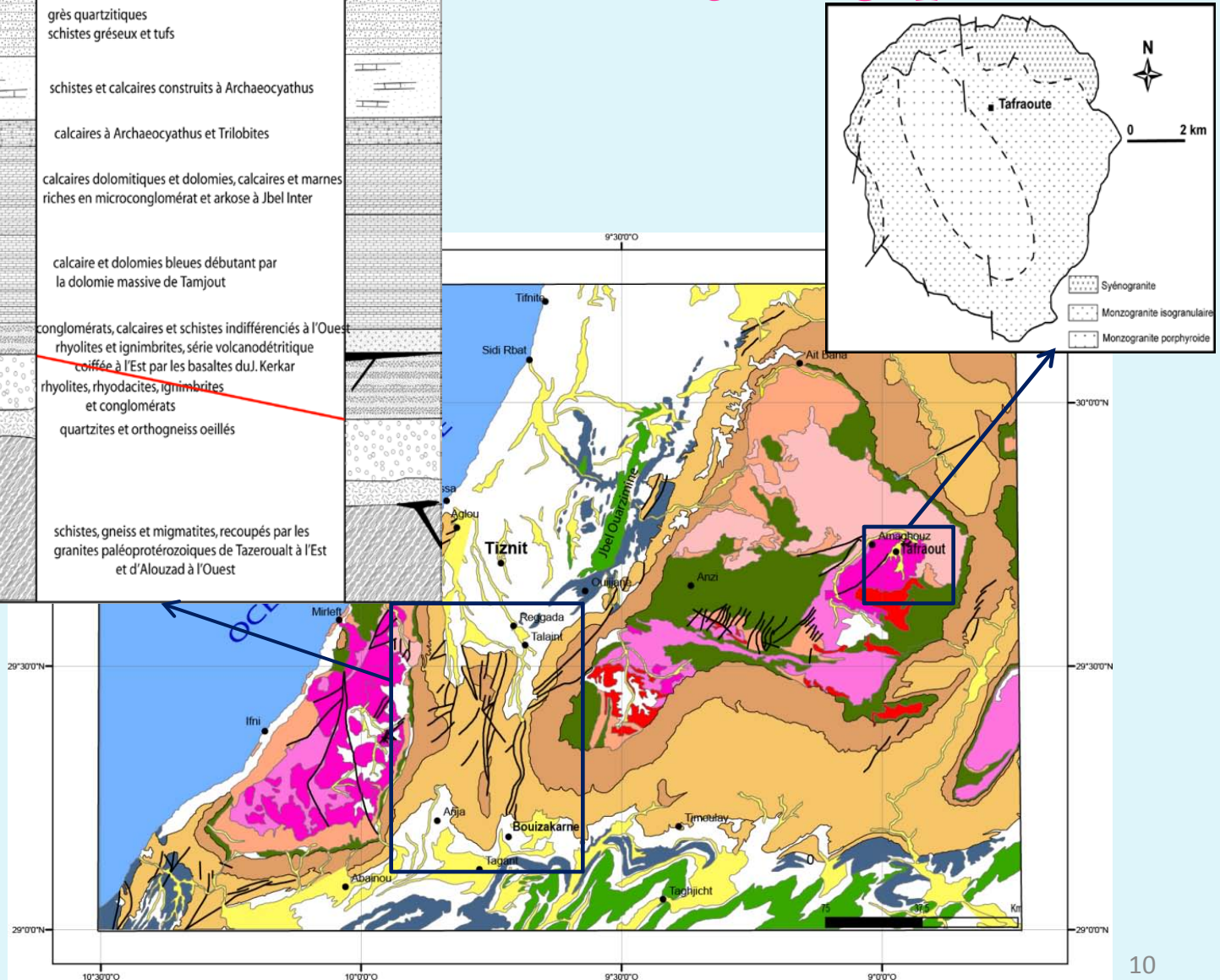


Températures modérées: l'effet adoucissant de l'océan à l'Ouest et des montagnes à l'Est

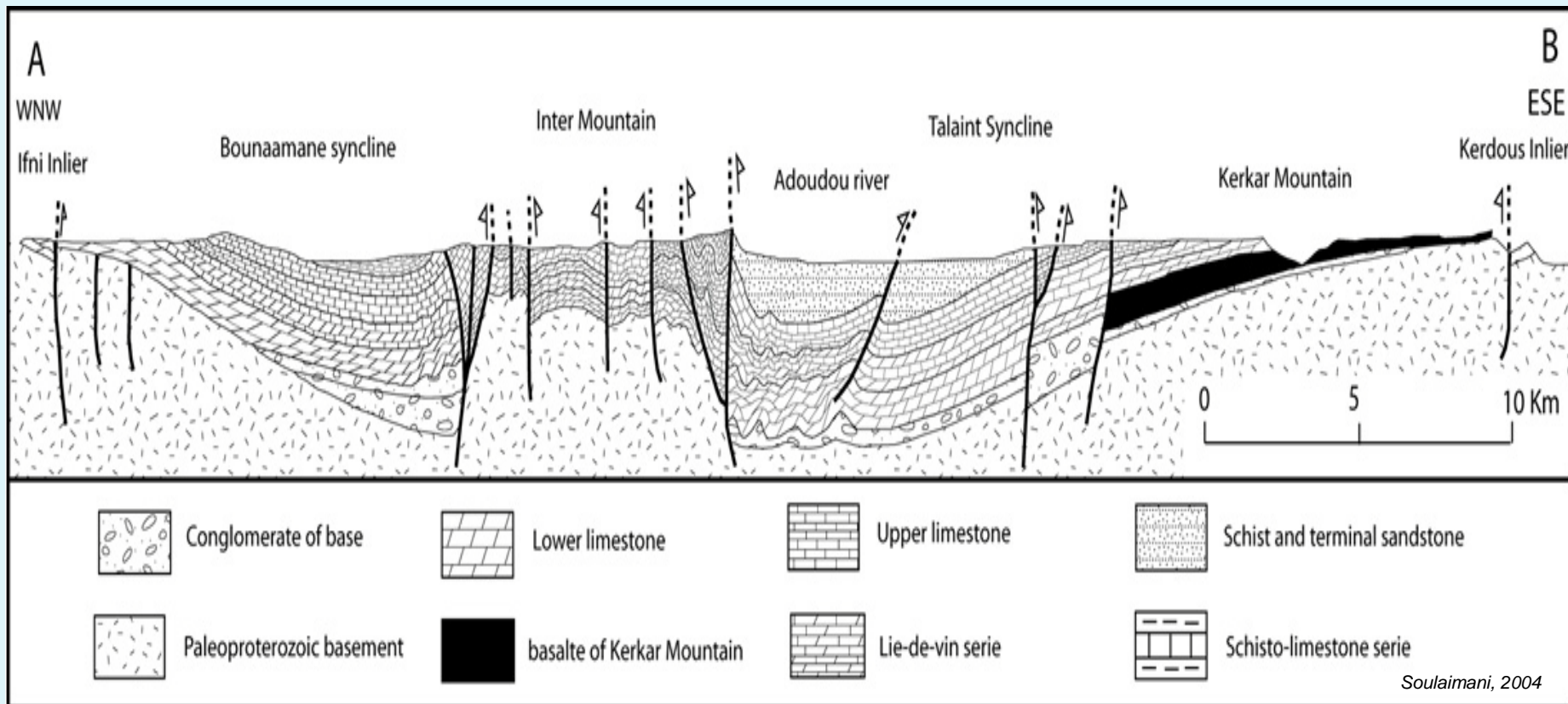


		Bordure Est de la boutonnière d'Ifni	Bordure Sud-Ouest de la boutonnière de Kerdous
		Lithologie	
Paléozoïque	Cambrien	Grès terminaux et Série schisteuse	grès quartzitiques schistes gréseux et tufs
		Série schisto-calcaire	schistes et calcaires construits à Archaeocyathus
		Calcaires supérieurs	calcaires à Archaeocyathus et Trilobites
	Adoudounien	Série Lie-de-vin	calcaires dolomitiques et dolomies, calcaires et marnes riches en microconglomérat et arkose à Jbel Inter
		Calcaires inférieurs	calcaire et dolomies bleues débutant par la dolomie massive de Tamjout
Protérozoïque	Néoprotérozoïque	Série de base	conglomérats, calcaires et schistes indifférenciés à l'Ouest
		Série de Tanalt (PIII)	rhyolites et ignimbrites, série volcanodétritique <i>coiffée à l'Est par les basaltes du J. Kerkar</i>
	Série d'Anzi (PII3)	rhyolites, rhyodacites, ignimbrites et conglomérats	
	Série des quartzites	quartzites et orthogneiss ocellés	
Paléoprotérozoïque	Socle éburnéen (PI)	schistes, gneiss et migmatites, recoupés par les granites paléoprotérozoïques de Tazeroual à l'Est et d'Alouzad à l'Ouest	

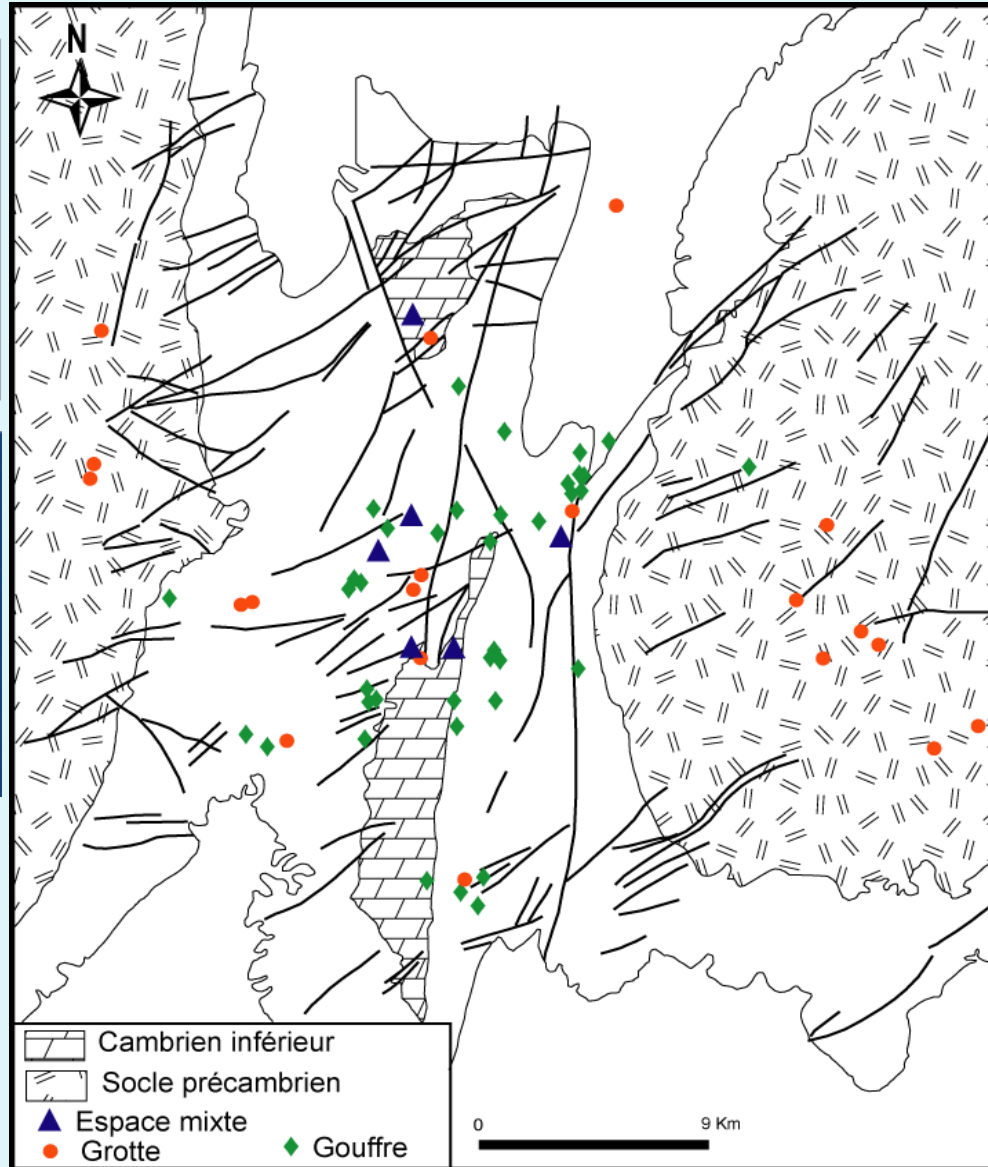
Cadre Géologique



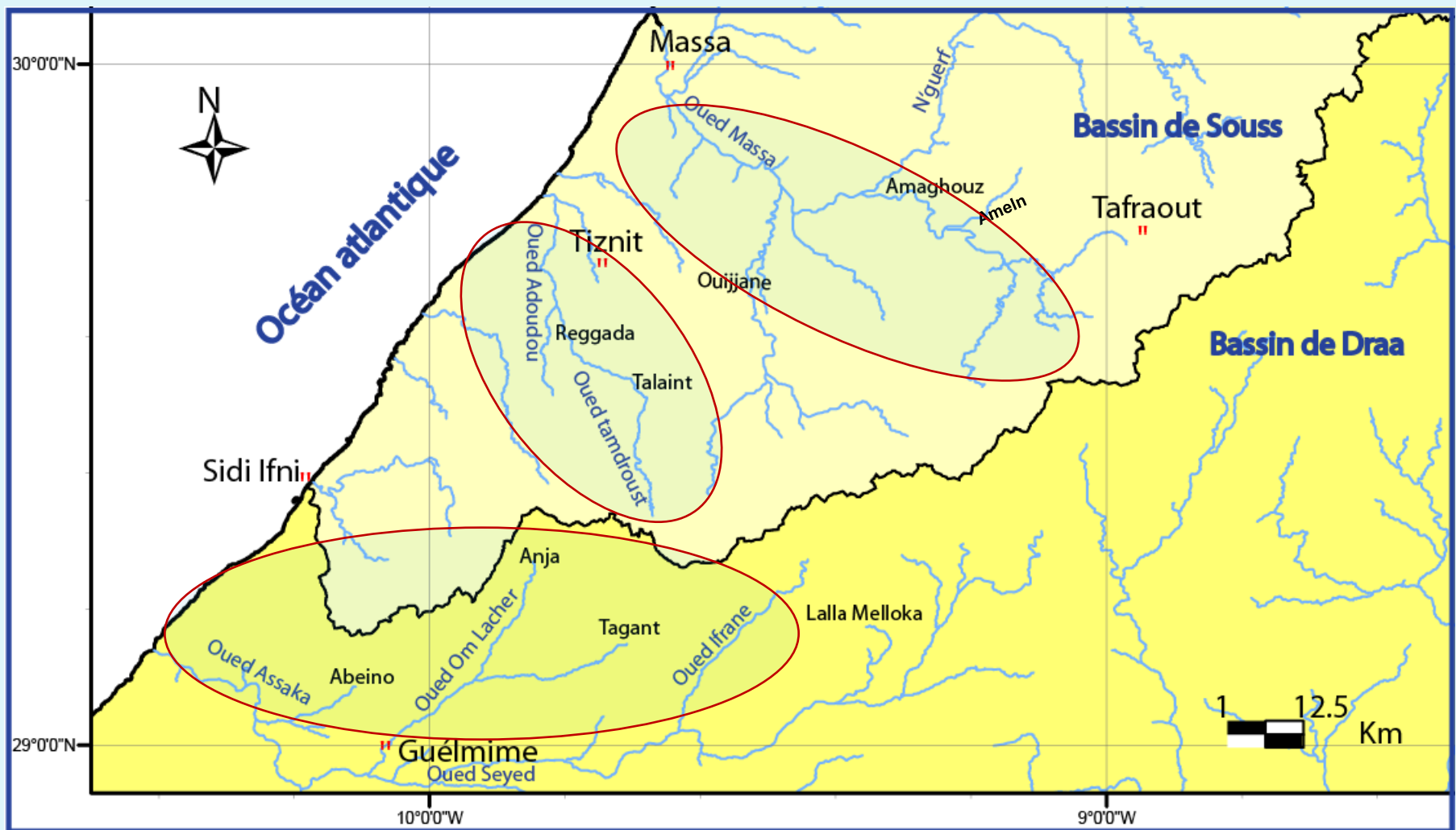
Structures Géologiques



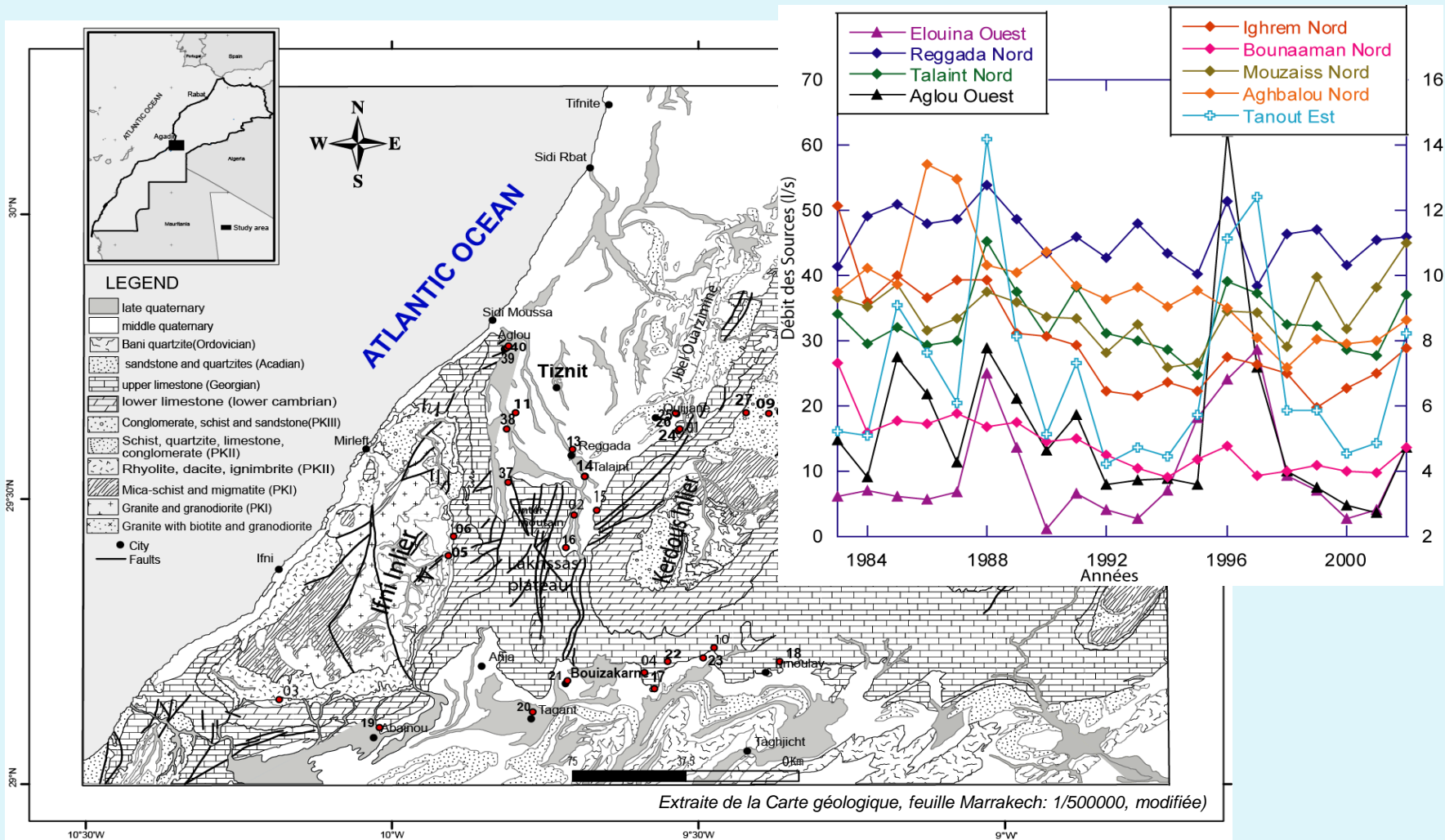
Formes karstiques du plateau de Lakhssas



Hydrologie



Hydrogéologie

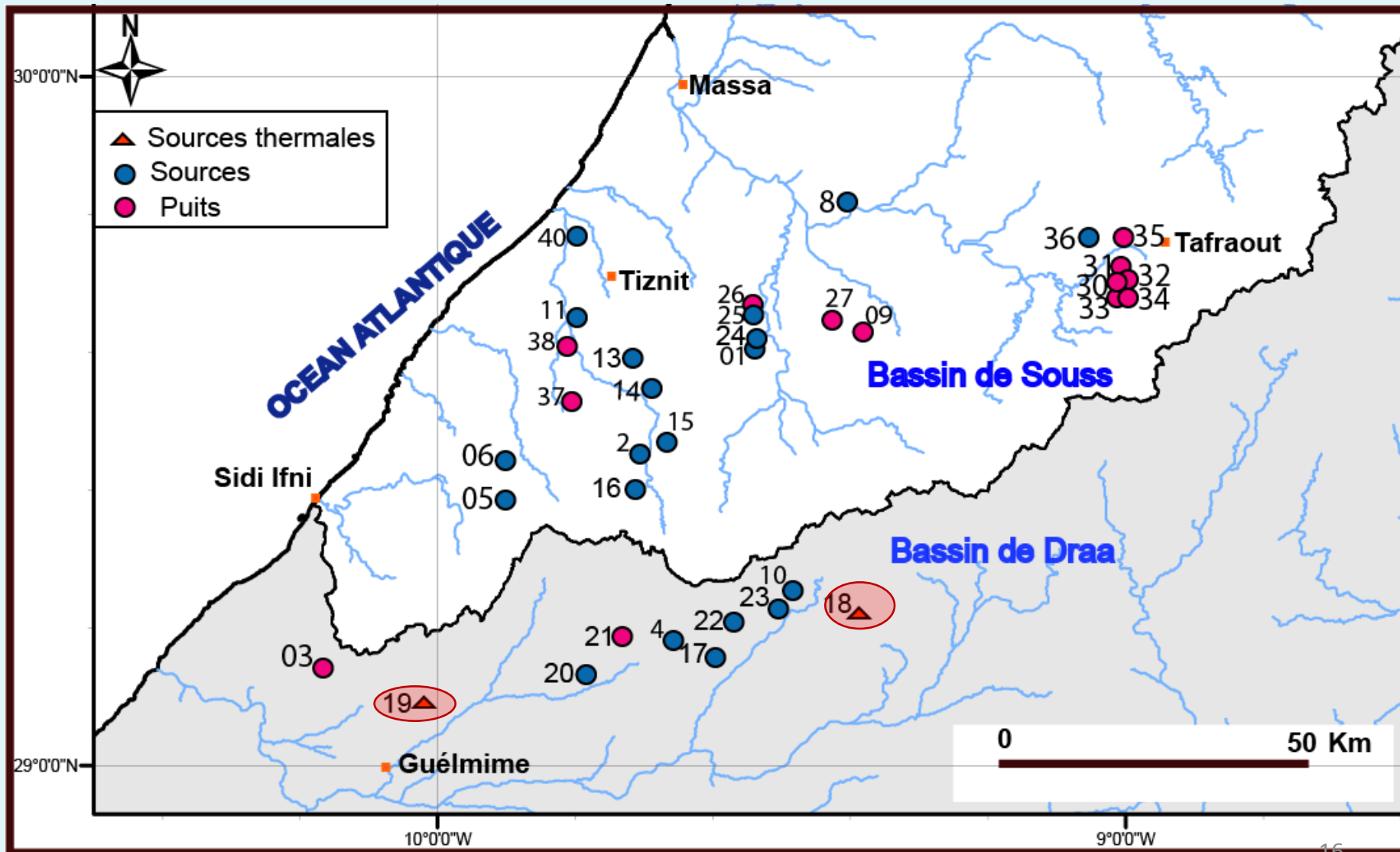


Formations carbonatées et fissurées → Présence d'aquifères potentiels
Fonctionnement mal connu?



Matériels et Méthodes

Echantillonnage



Méthodologie

Les paramètres physiques (pH, T, E.C) ont été mesurés sur le terrain.

Analyse	Nbr d'échantillons
Éléments majeurs	58 échantillons
^2H et ^{18}O (origine de la recharge)	32 échantillons
^{13}C et ^{14}C (âge des eaux)	11 échantillons
Éléments traces, ^{226}Ra et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	21 échantillons



Résultats

Etude des paramètres physico-chimiques



Variation des paramètres physico-chimiques

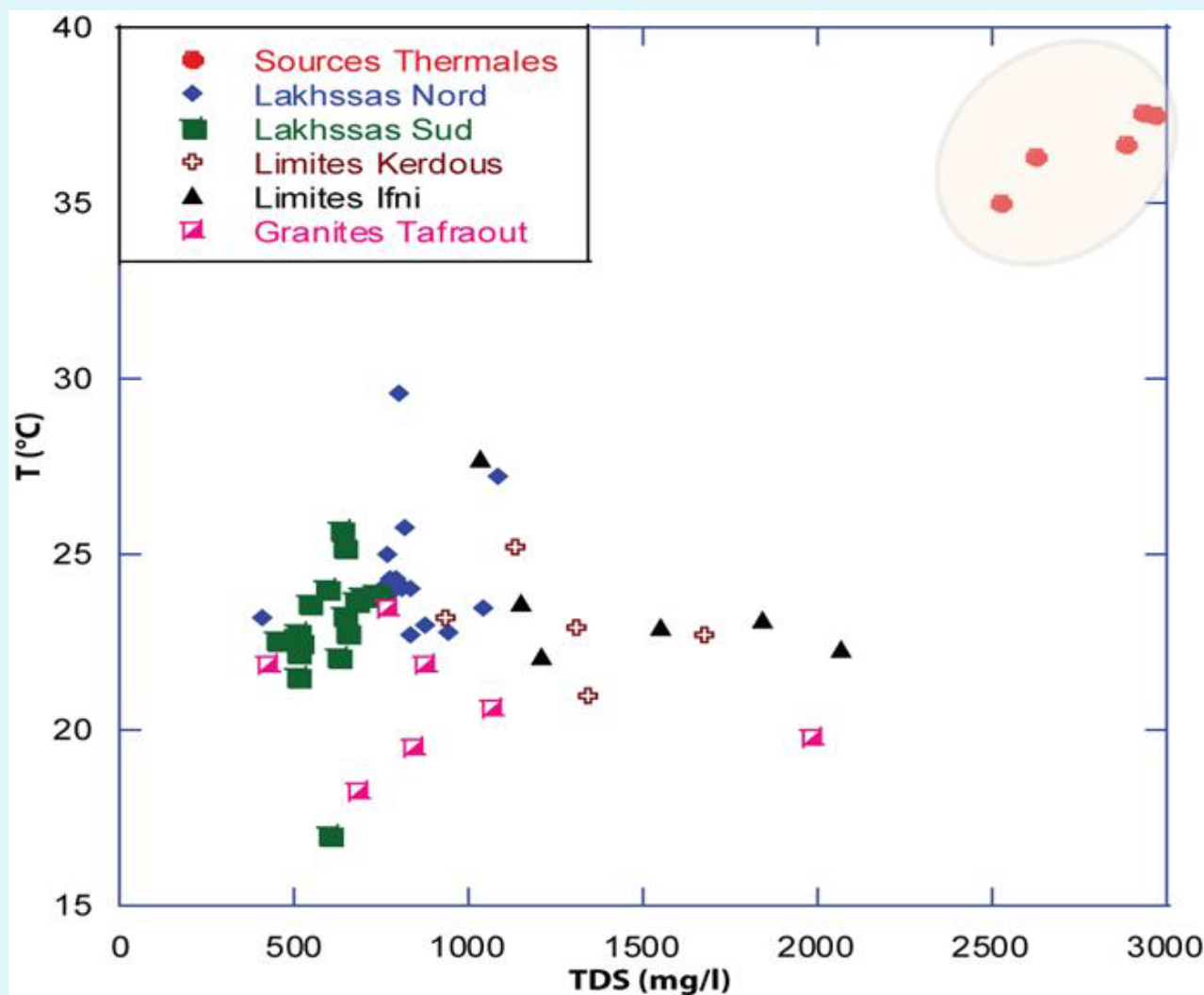


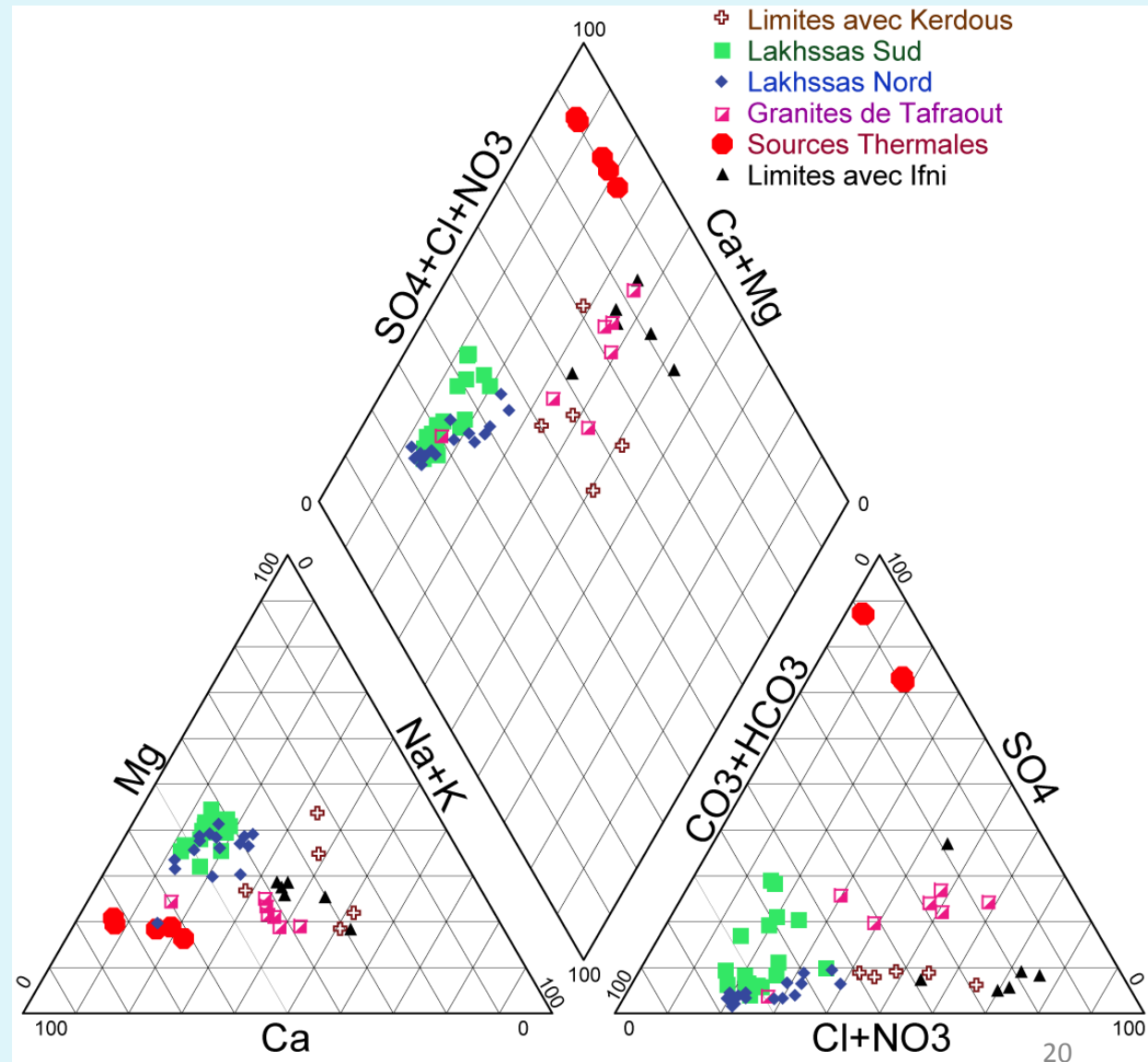
Diagramme de Piper

● Faciès *hyper-sulfaté calcique* :
sources thermales

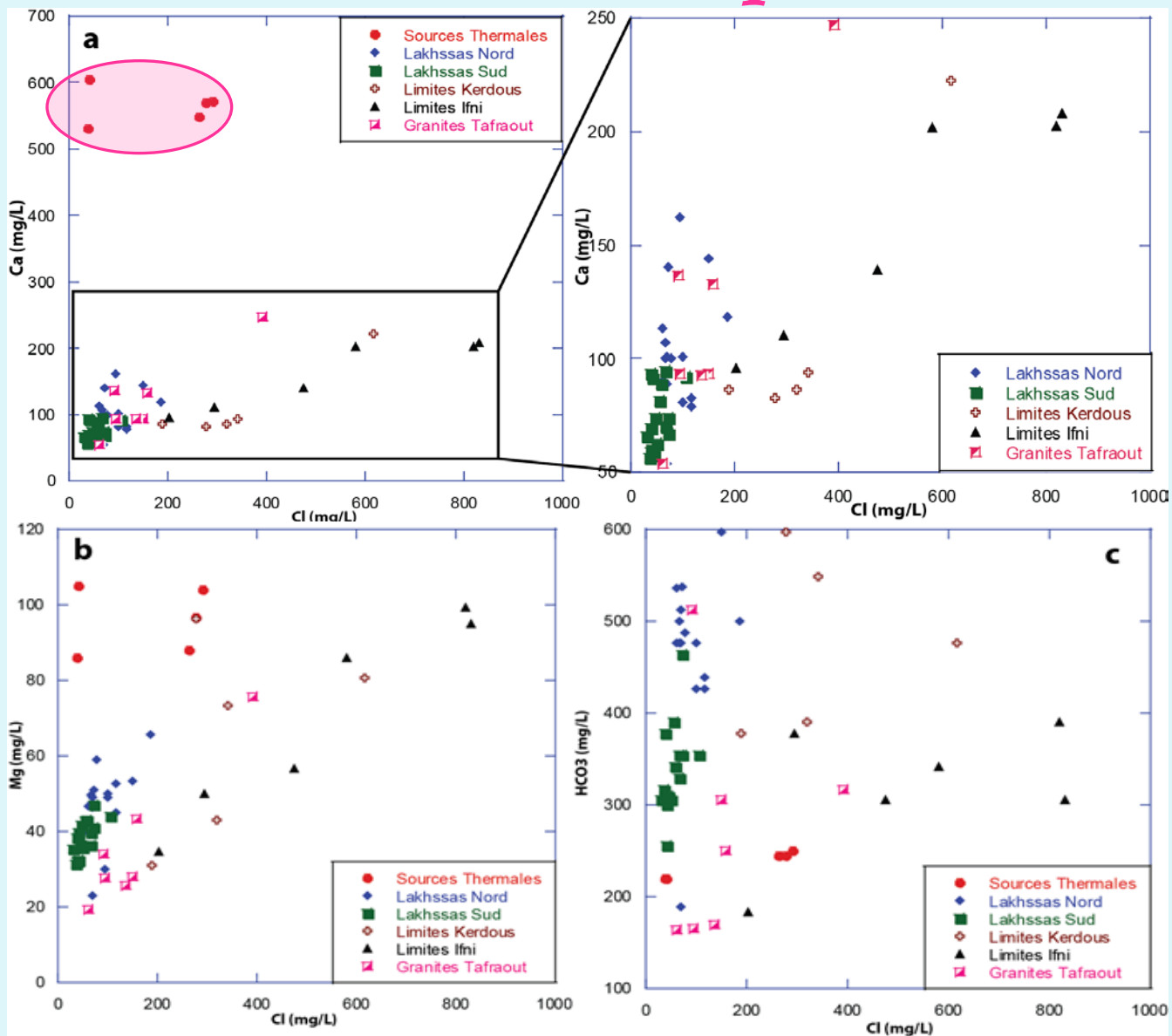
● Faciès *HCO₃-Ca-Mg* :
Nord et Sud

● Faciès *mixte à tendance chlorurée* :
Est et Ouest

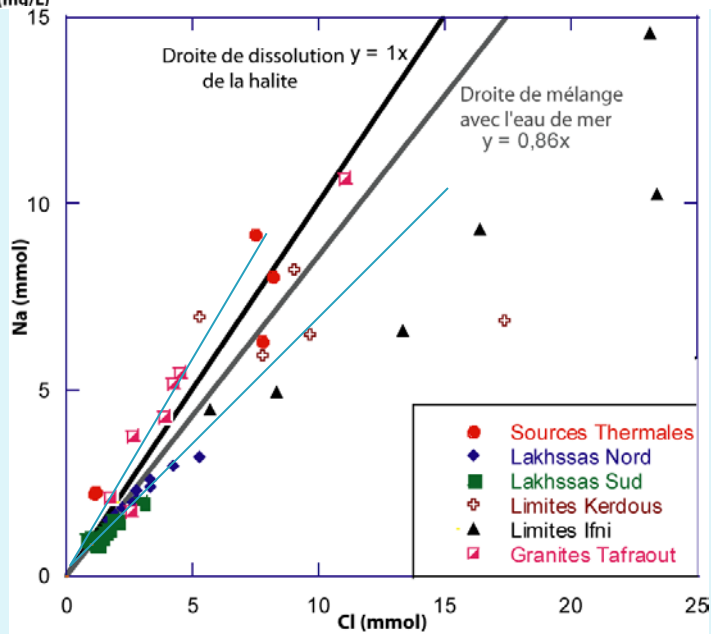
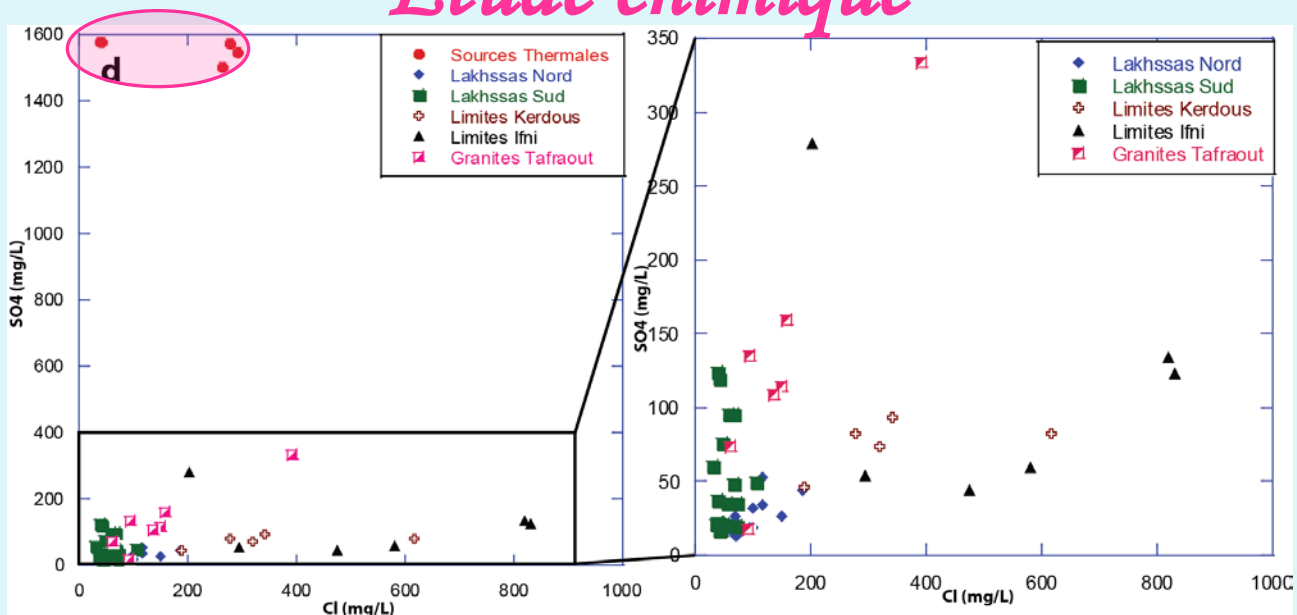
● Faciès *mixte à tendance chlorurée plus au moins enrichi en sulfates* :
aquifère Taфраout



Etude chimique



Etude chimique



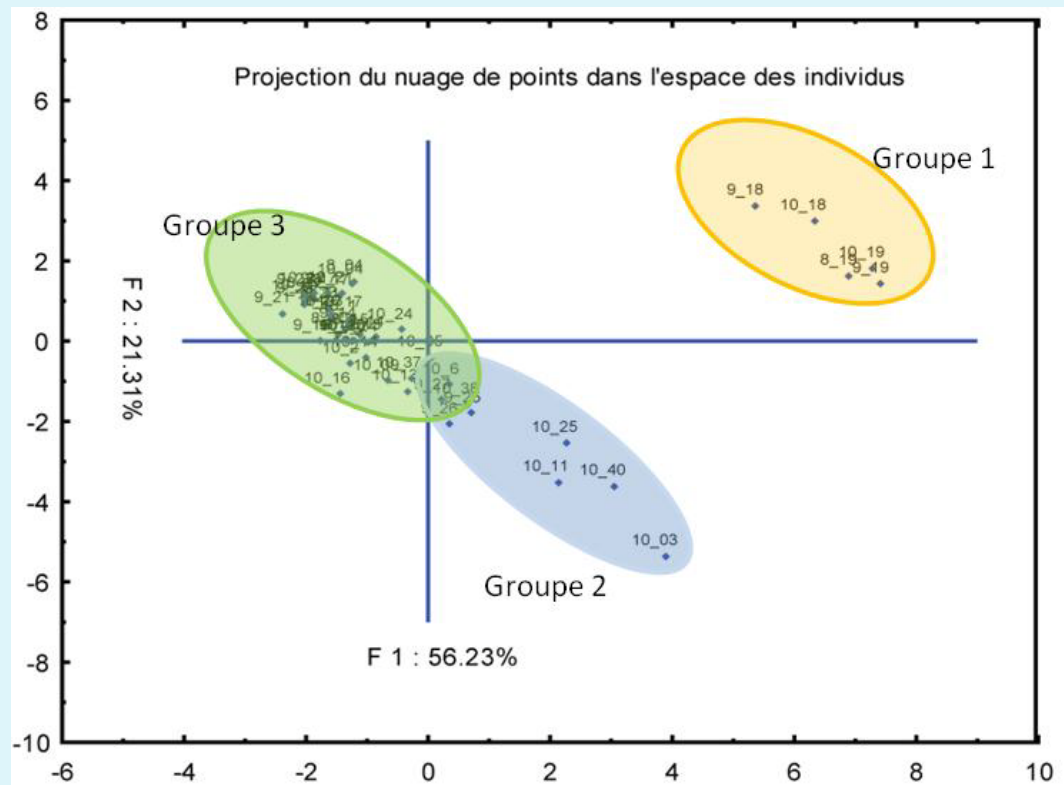
L'ACP sur les données

Sur l'espace des individus :

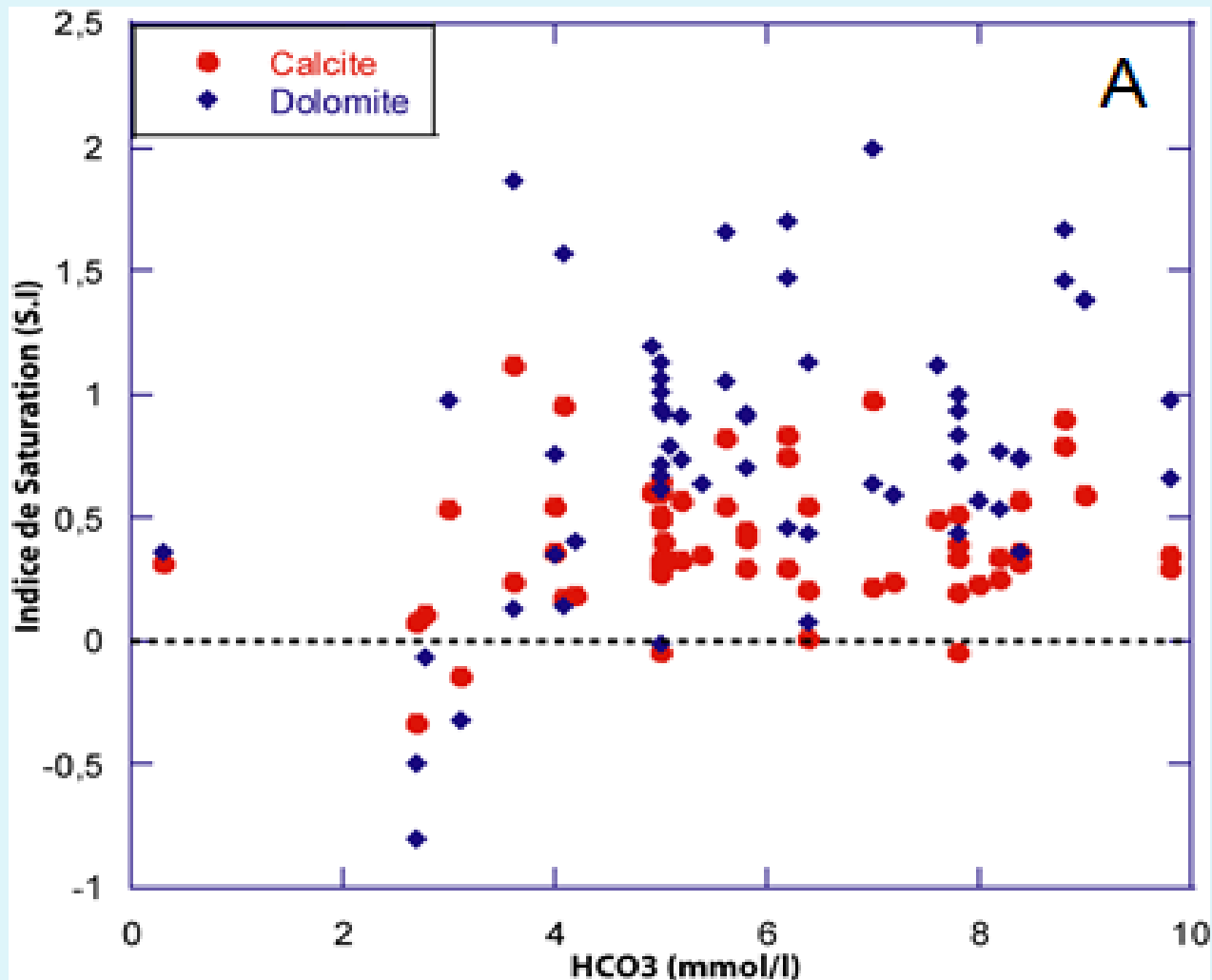
(i) Eaux plus minéralisées < == > eaux thermales;

(ii) Eaux relativement minéralisées < == > limites Est-Ouest et réservoir granitique;

(iii) Eaux moyennement à faiblement minéralisées < == > flancs Nord et Sud.



Indice de saturation

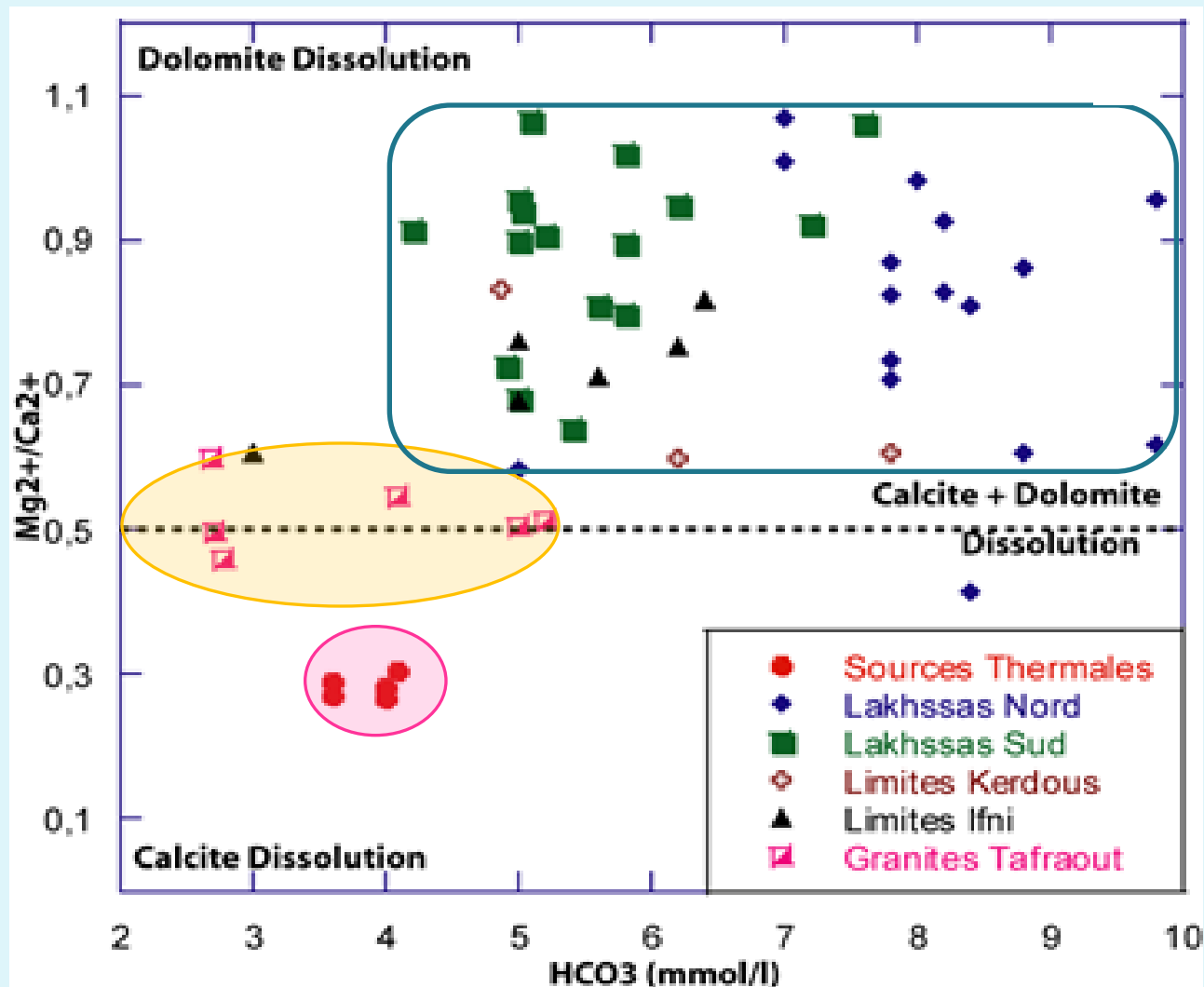


Indice de saturation

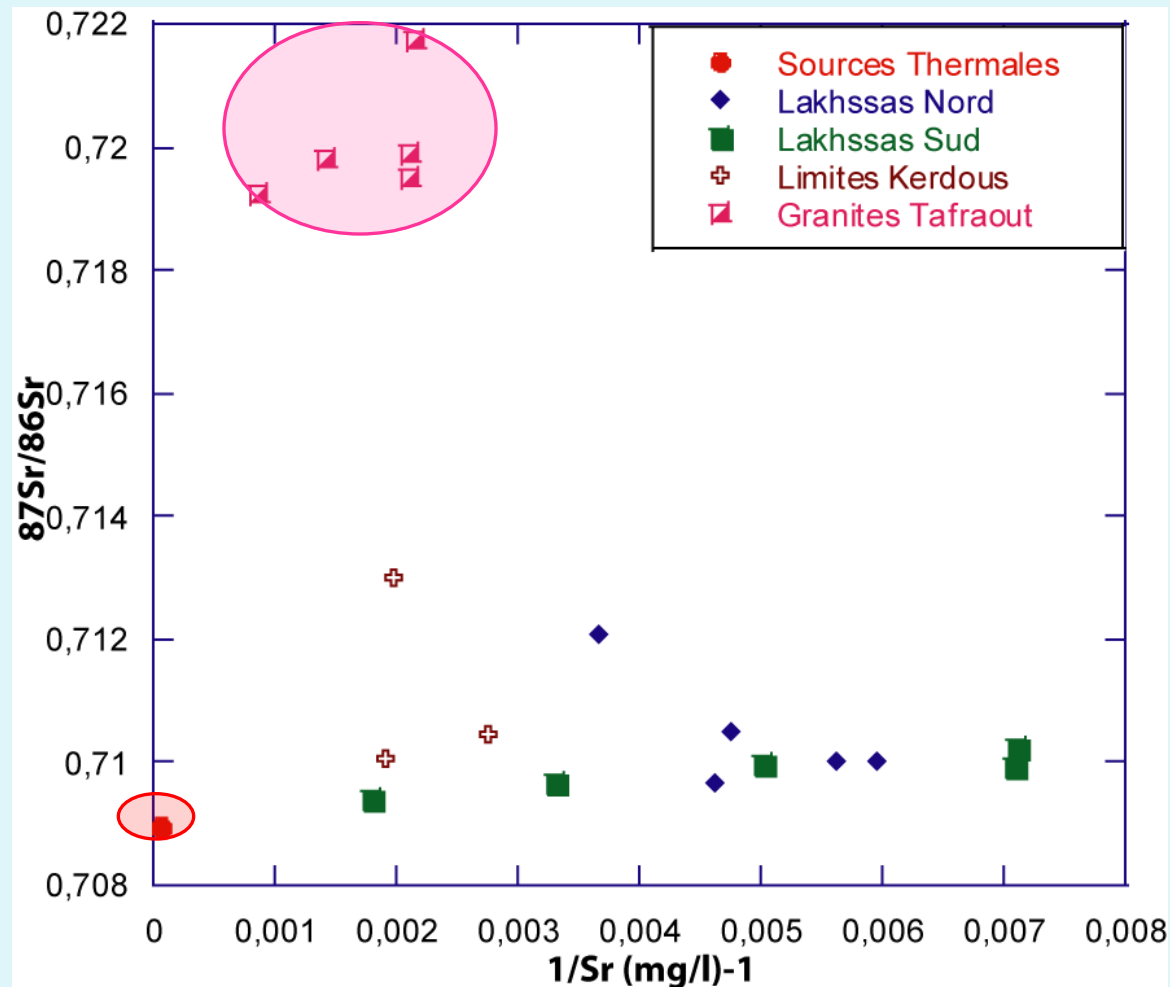
Eaux douces du plateau de Lakhssas

Eaux du réservoir granitique

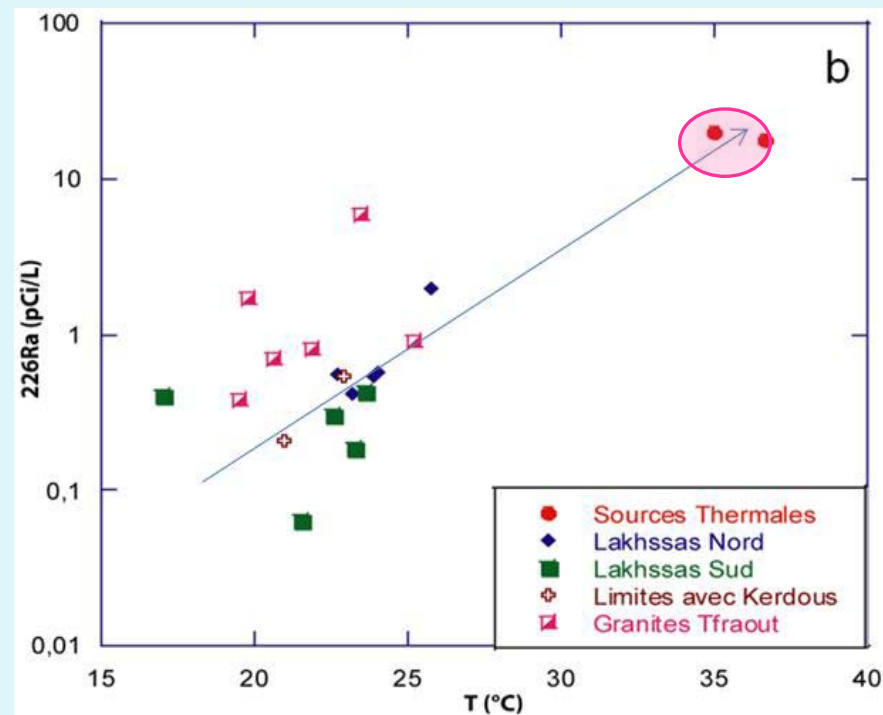
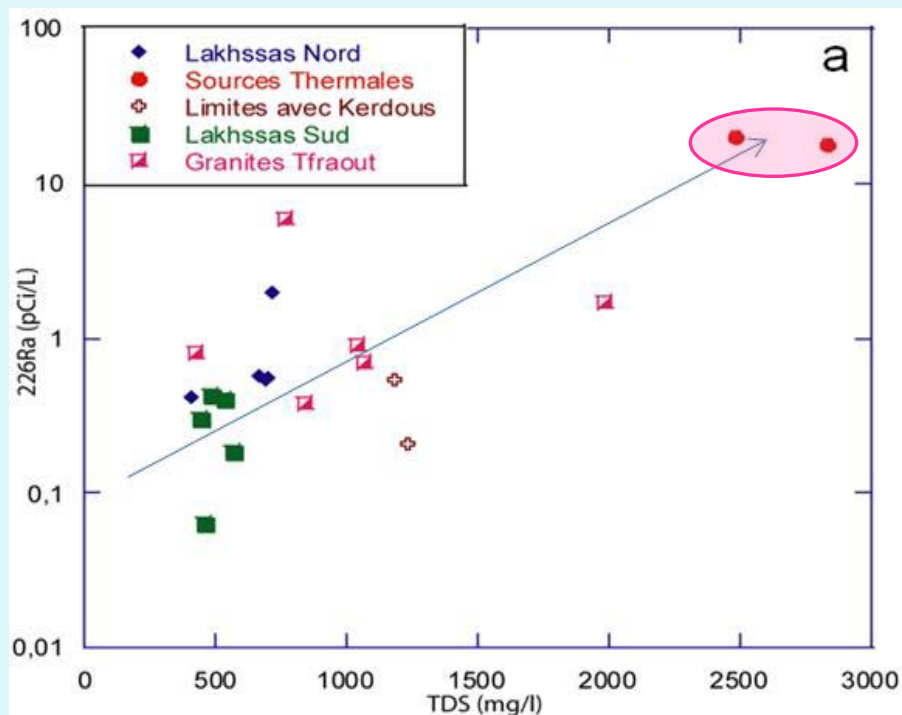
Eaux thermales



Rapports isotopiques en Strontium

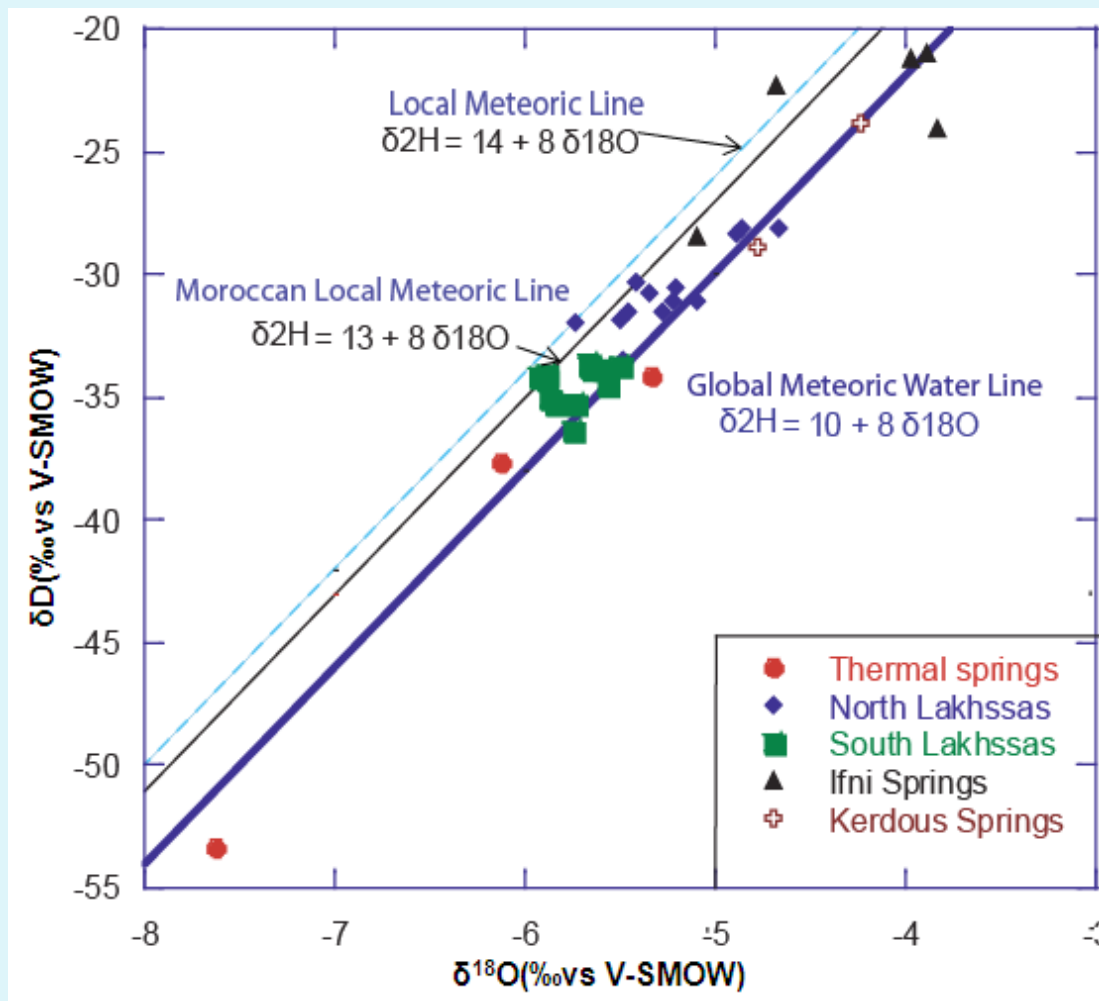


Relation radioactivité – Température et TDS



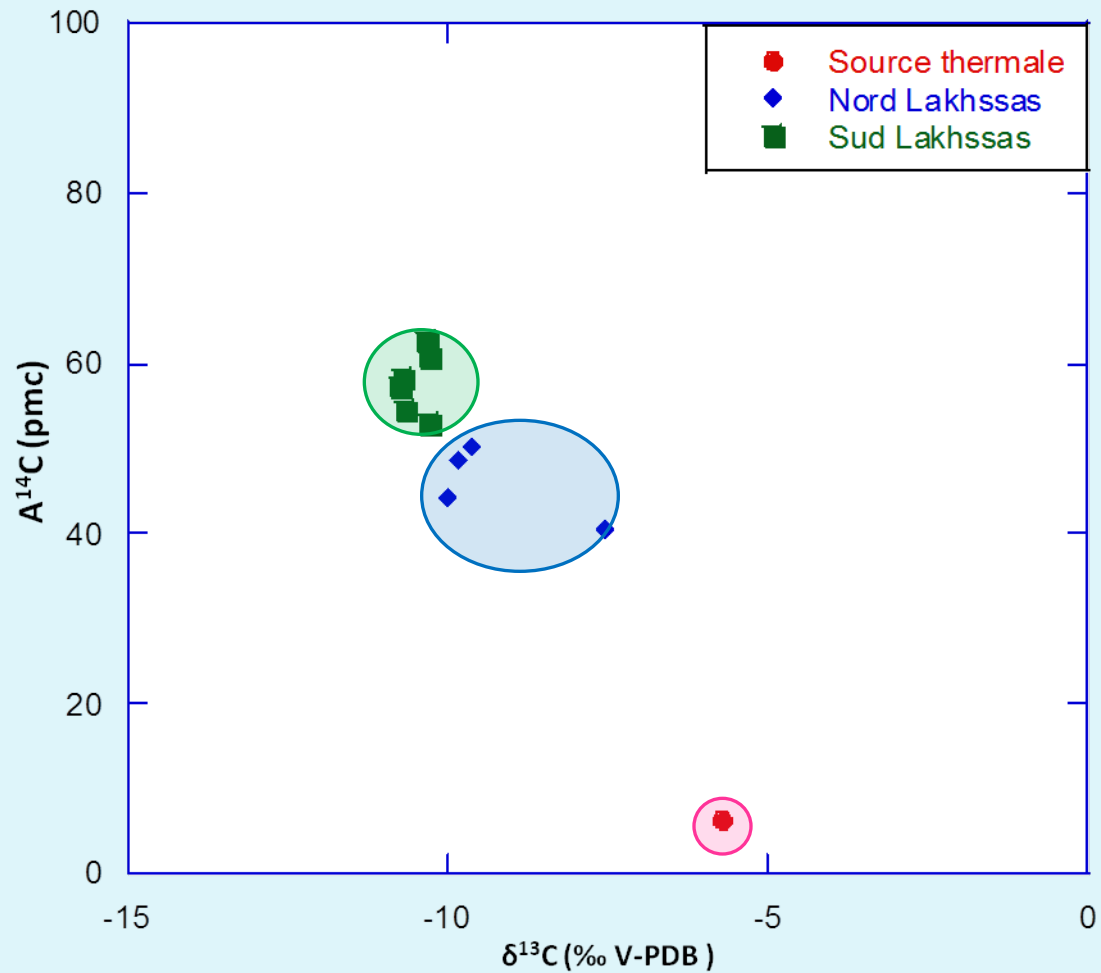
La radioactivité des eaux souterraines est en deçà de la norme OMS de potabilité des eaux (8,75 Bq/L)

Isotopes stables



Les eaux souterraines du plateau de Lakhssas sont d'origine océanique

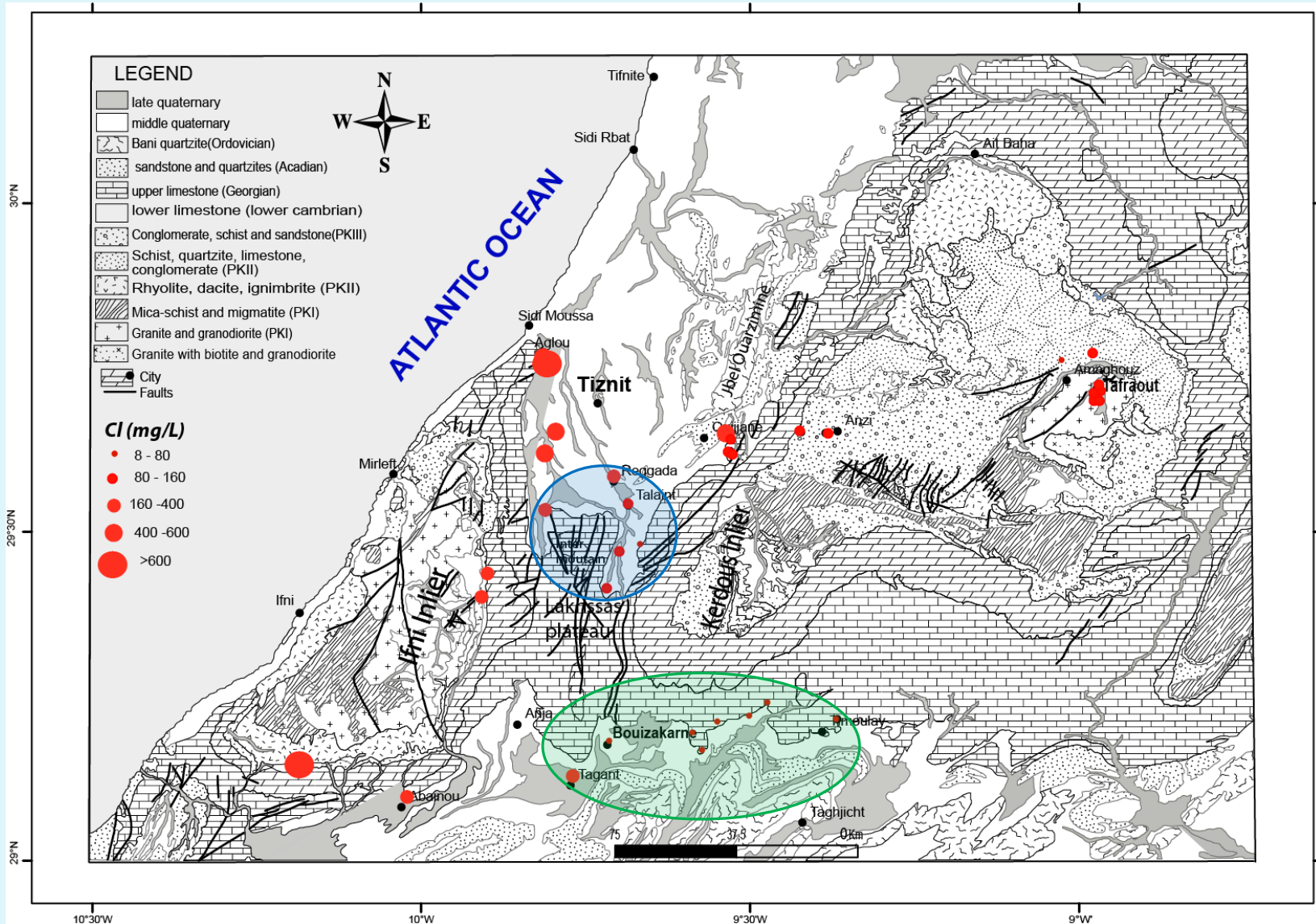
Carbone-13 et Carbone-14



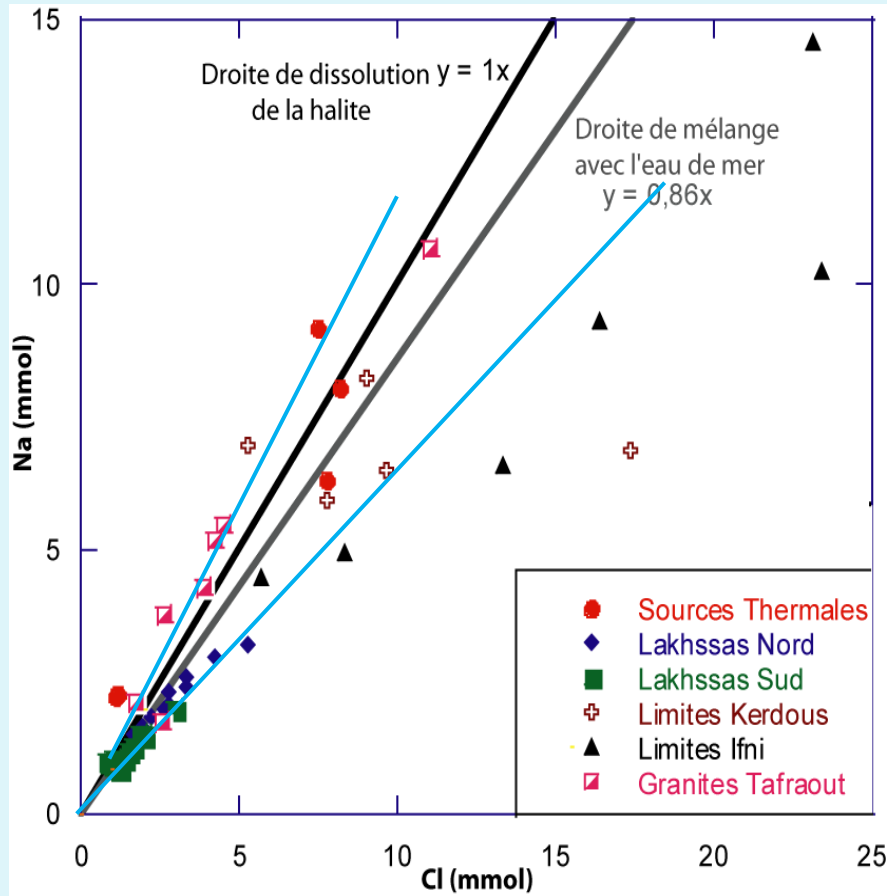
Discussions et Interprétations

- *Origine de la minéralisation*
- *Origine de la recharge*
- *Temps de résidence*

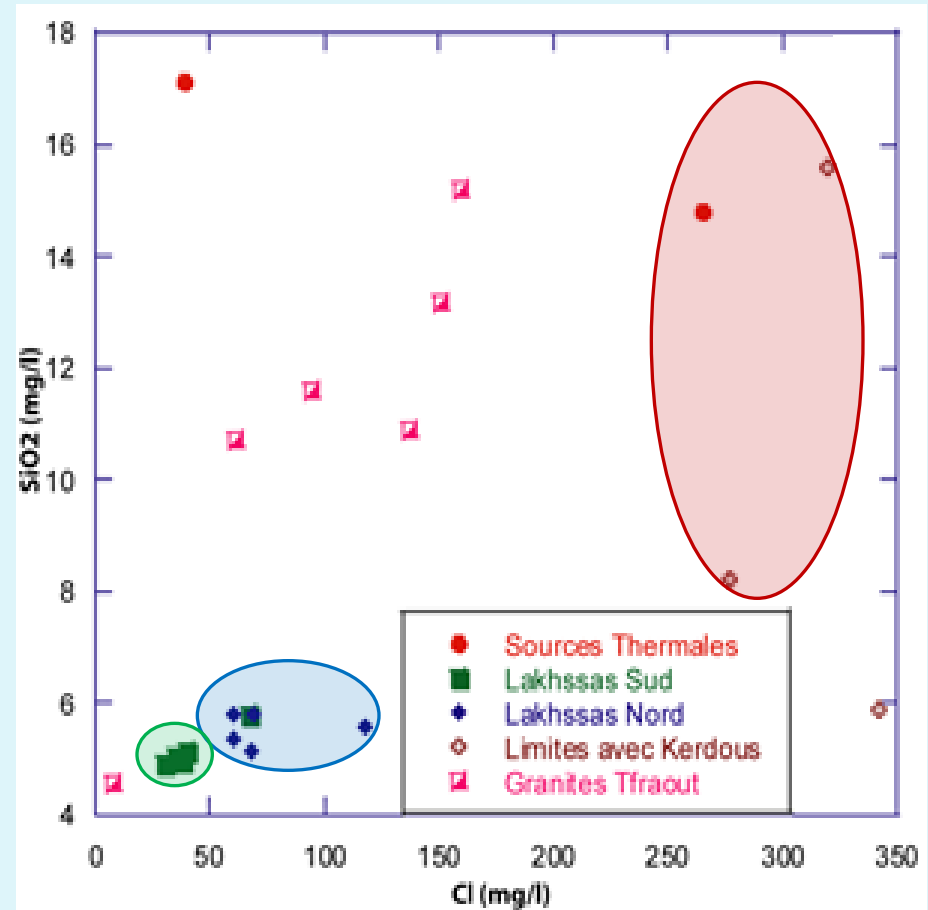
Origine de la minéralisation



Origine de la minéralisation



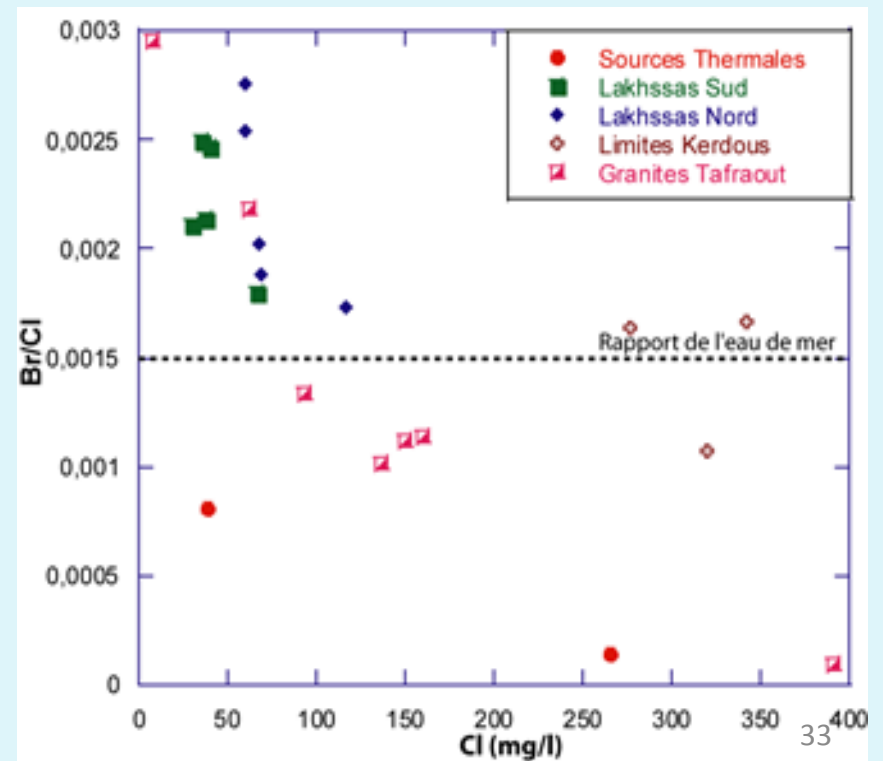
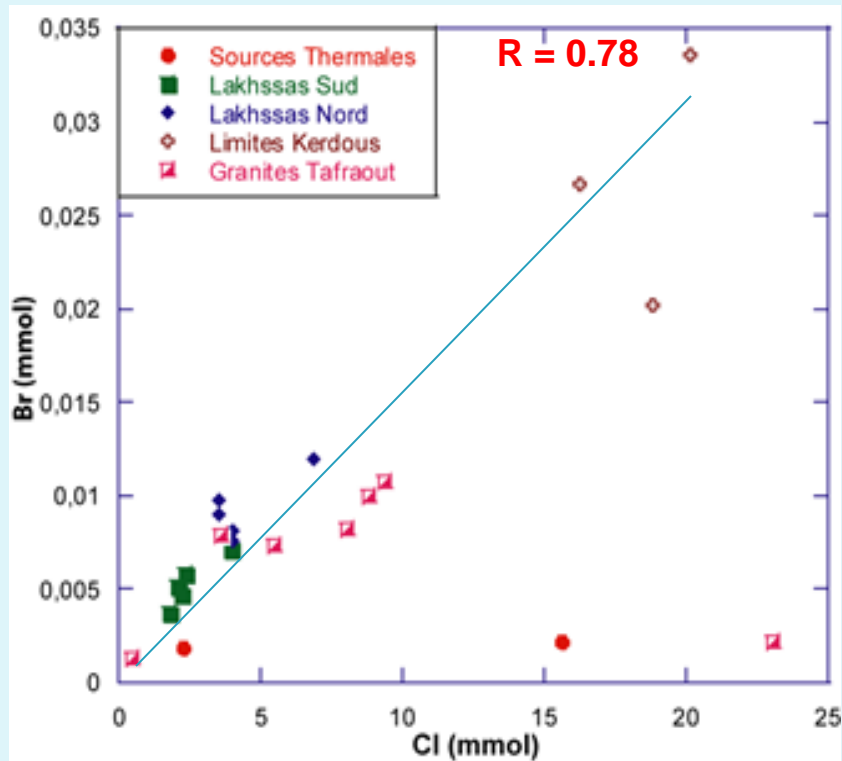
Source de minéralisation chlorurée indépendante de la minéralisation sodique



Interaction avec les roches ignées (Nord, Est) et avec les carbonates (Sud)

Origine de la minéralisation

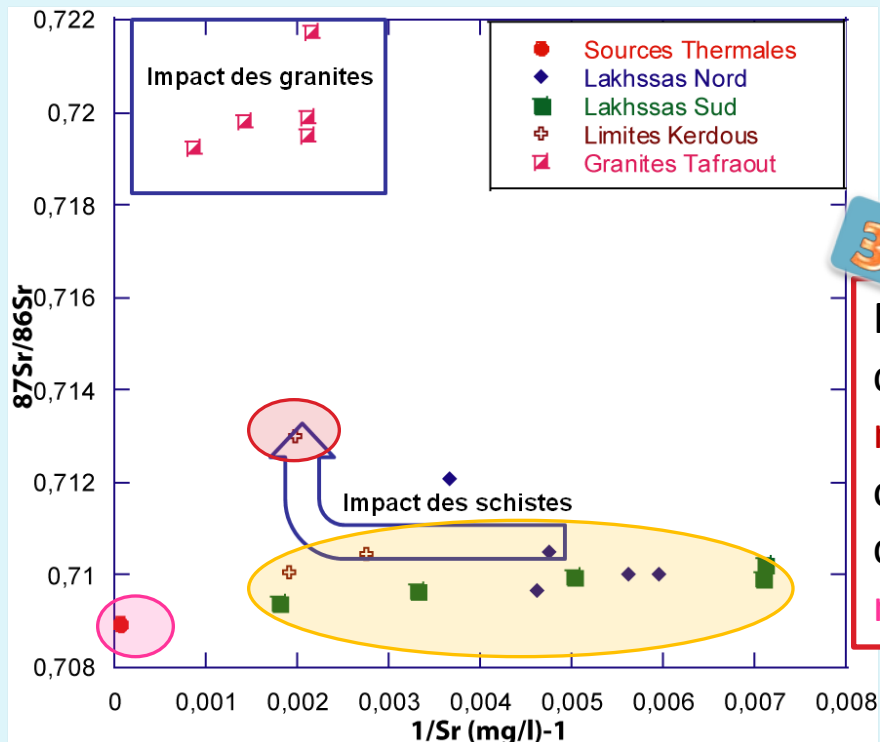
- La bonne corrélation entre les Cl et les Br indique un mode d'acquisition identique des Cl et des Br.
- Les eaux des bordures Est, de l'aquifère granitique de Tafraout et les eaux thermales présentent des faibles rapports en Br/Cl. Ceci peut refléter l'influence des ambrins marin



Interaction Eau-Roche

4

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en accord avec $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des roches granitiques de Tafraout



3

Forte interaction de ces eaux avec les roches schisteuses ou l'influence d'une contribution du réservoir granitique

1

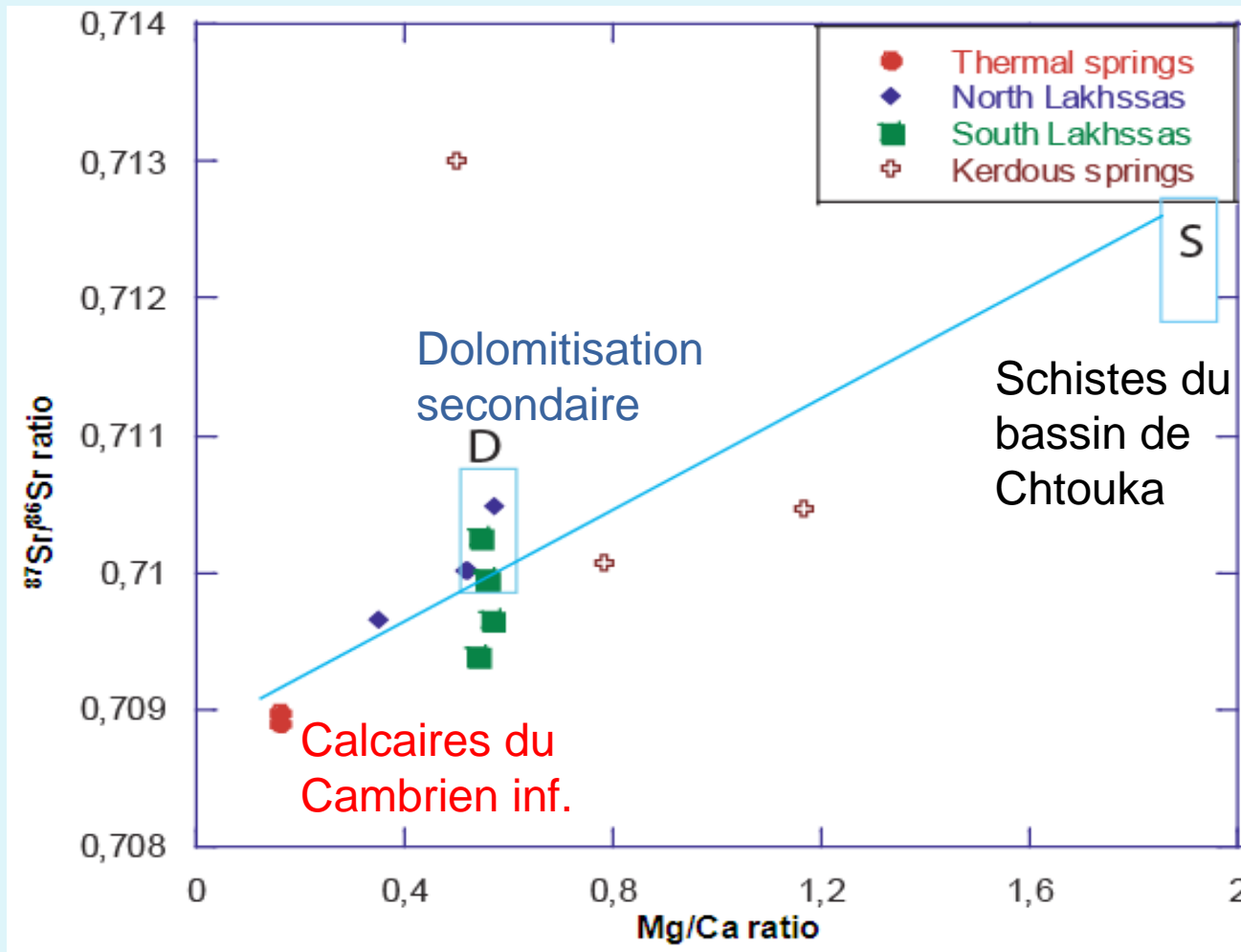
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ compatible avec le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de l'eau de mer du Cambrien inférieur représenté aussi bien par les carbonates et les évaporites

2

Rapports relativement élevés en $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ → interaction avec les carbonates du Cambrien inférieur et les schistes du Cambrien moyen et supérieur

Interaction Eau-Roche

La chimie des eaux souterraines du plateau de Lakhssas est contrôlée par les deux pôles de mélange « D » et « S ».

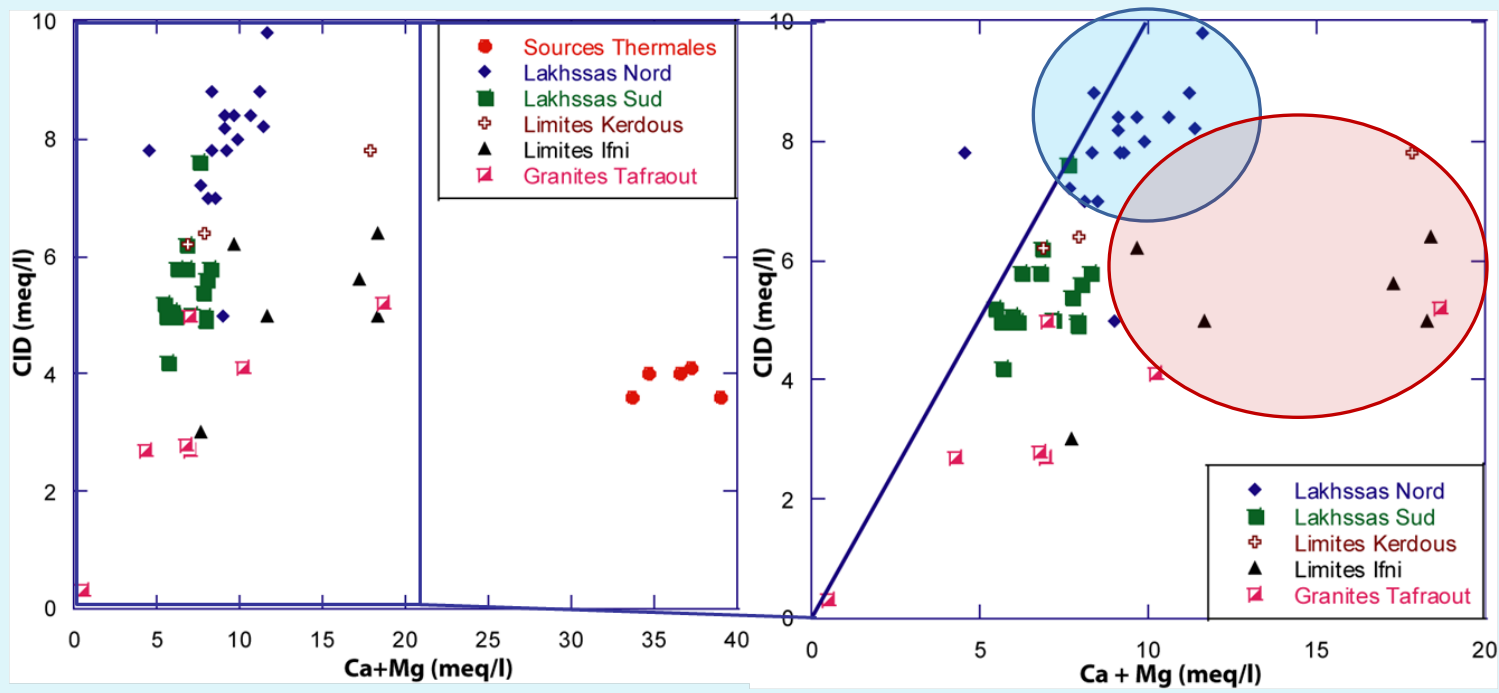


Interaction Eau-Roche

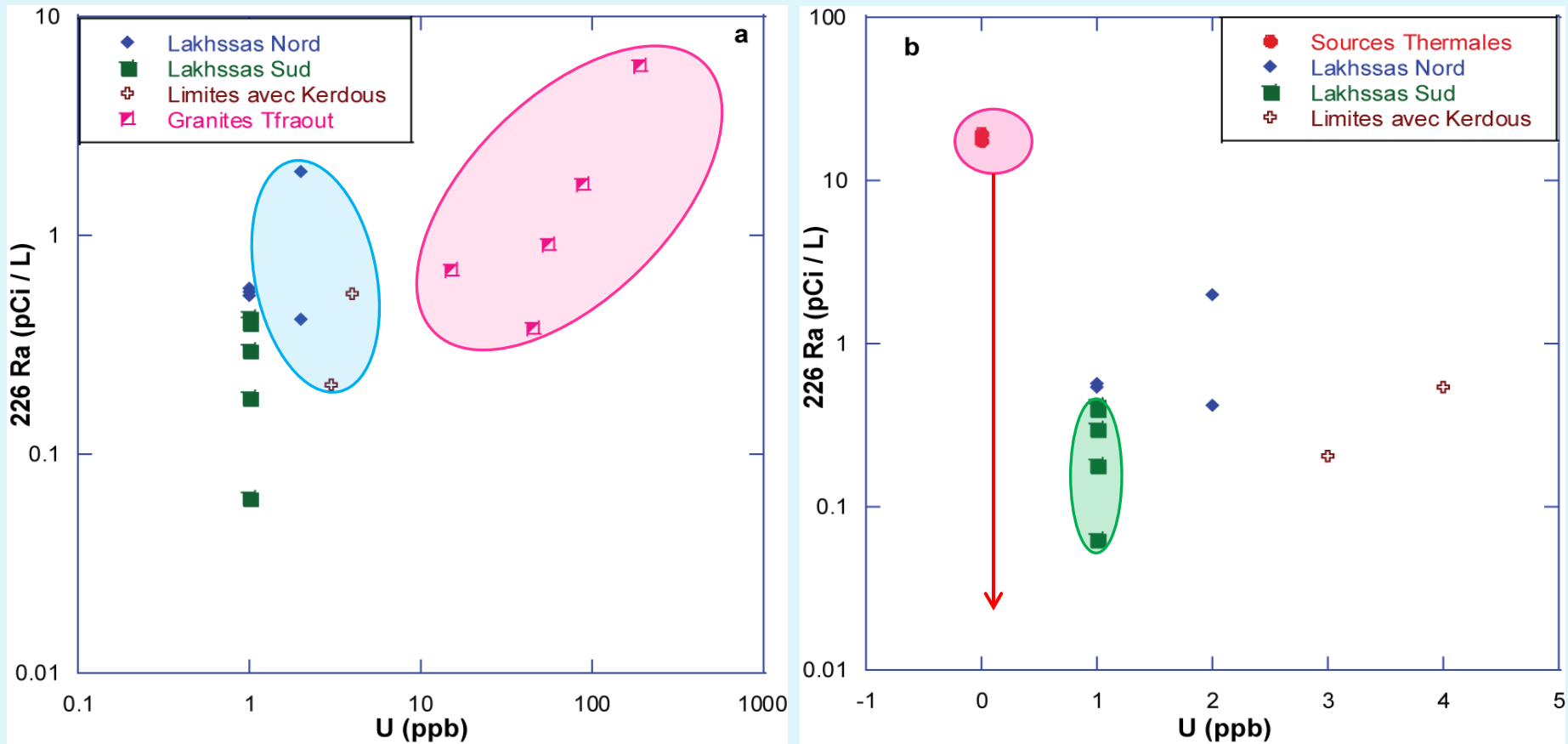
Excès en Ca+Mg comparé au HCO₃

la dissolution des calcaires seuls ne pourrait pas être le responsable de l'excès en Ca et Mg < == > Dissolution d'une autre roche non carbonatée, tel que les roches schisteuses (flanc Nord et bordures Est-Ouest).

pour les eaux souterraines du flanc Sud, cet excès est en équilibre avec la composition des roches carbonatés.



Interaction eau-roche et radioactivité



Les activités en ^{226}Ra ne sont pas en accord avec les teneurs en U

Synthèse sur l'origine de la minéralisation

Flanc Sud

Faciès HCO_3 -Ca-Mg
Faibles teneurs en
Cl, SiO_2 et faibles
 $A^{226}\text{Ra}$

Compatible avec les
formations
carbonatées

Flanc Nord

Teneurs élevées en Cl, SiO_2
Na/Cl faibles, moyennes $A^{226}\text{Ra}$
et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ relativement élevés

Salinité relativement élevée par
rapport aux eaux du flanc Sud →
Possibilité de contact avec le
substratum schisteux

Bordures Est et Ouest

Fortes teneurs en Cl, SiO_2
Faibles rapports Na/Cl, Br/Cl
moyennes $A^{226}\text{Ra}$
et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ élevés

Compatible avec **les schistes**
responsables de la salinité des
eaux souterraines du bassin
de Chtouka plus au Nord

Eaux thermales

Faciès sulfato-calcique
Faibles teneurs en HCO_3 fortes
 $A^{226}\text{Ra}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Correspondant à la composition des
gypse et d'anhydrite contenu dans
les carbonates du Cambrien inf.

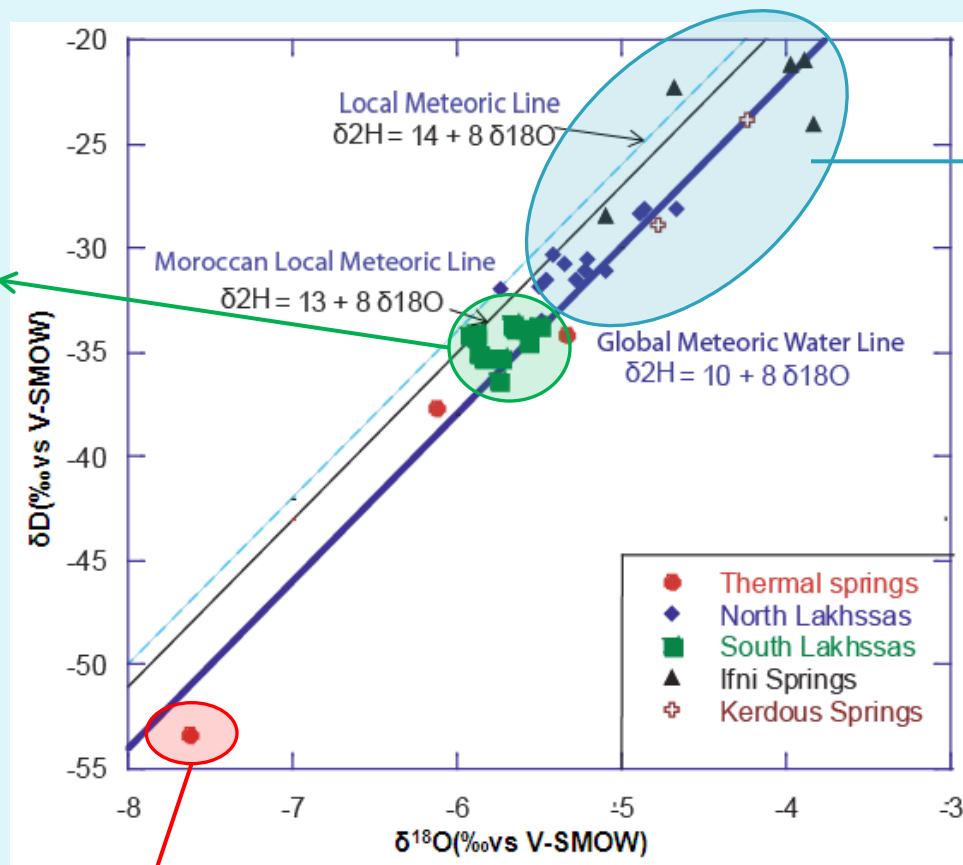
Eaux du réservoir granitique

Fortes teneurs en U et SiO_2
Forts rapports en Na/Cl, et
 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Equilibré avec la composition de
la roche **granitique** de Tafraout

Origine des eaux : renouvellement de la ressource

Flanc Sud →
Carbonates →
grande perméabilité de fissure →
infiltration rapide des eaux → faible évaporation et faible potentiel de fractionnement isotopique.



Flanc Nord et des bordures Est et Ouest → altitudes de recharges et/ou l'effet de la proximité de l'océan

Eaux thermales → teneurs appauvries en isotopes stables → recharge à partir des eaux anciennes sous climat plus froid et plus humide par rapport à l'actuel.

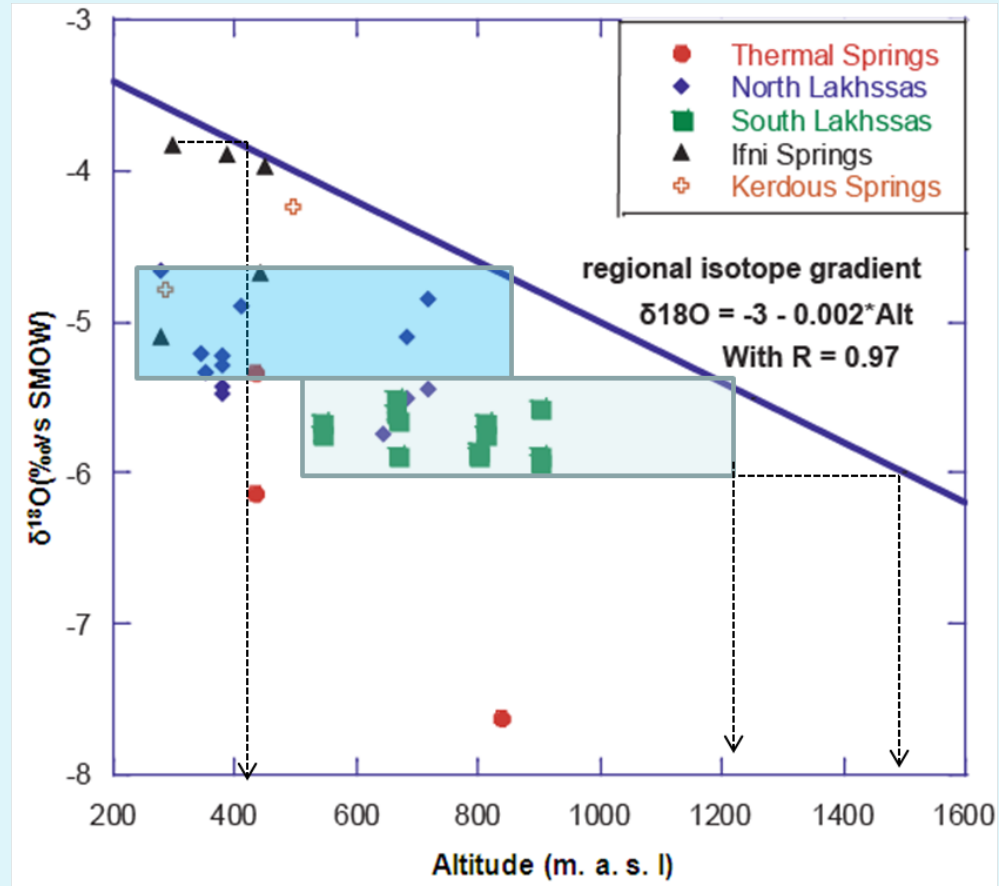
Altitudes de recharge

Altitudes de recharge correspondant à celles de la région étudiée

Flanc Sud → recharge à partir des altitudes relativement élevées par rapport aux points du Nord

Cette variation peut être liée aux impluviums des différents points + la direction d'écoulement des eaux

Sens d'écoulement guidé par la structure du Massif → basculement favorable vers le Sud.



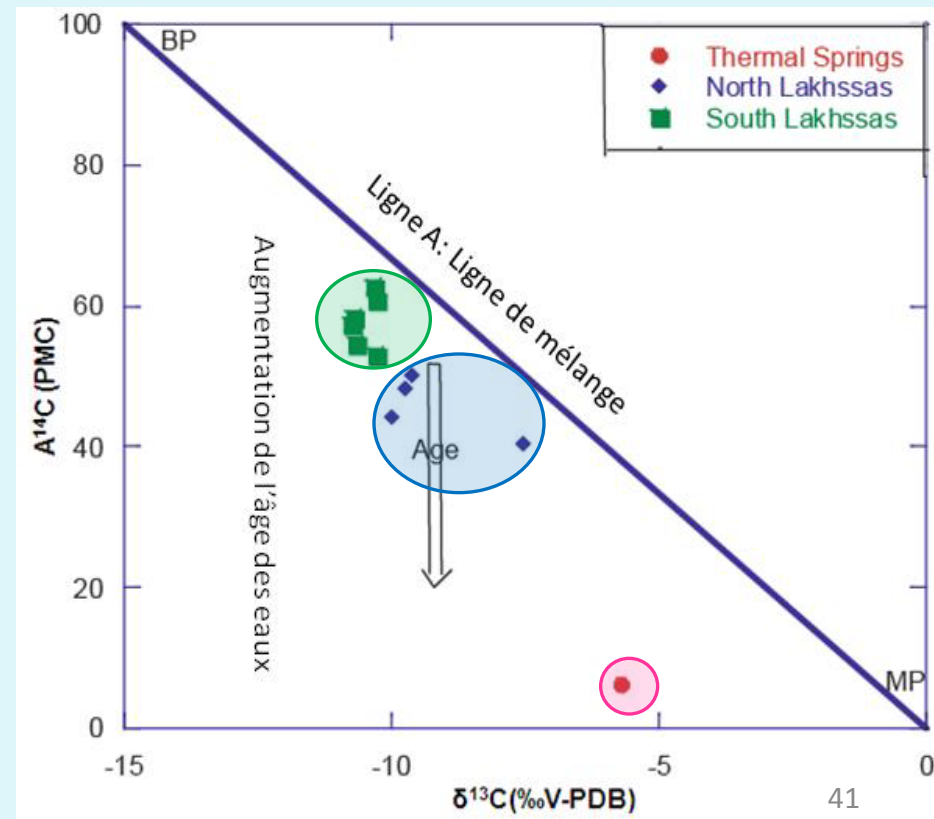
Temps de résidence

● Nous avons modélisés les variations isotopiques de CID entre les deux pôles de mélange:

- 1) PB : $A^{14}C = 100$ pcm et $\delta^{13}C = -15$ ‰ V-PDB ;
- 2) PM : $A^{14}C = 0$ pcm et $\delta^{13}C = 0$ ‰ V-PDB (CID provient de la dissolution du calcaire et dolomie du Cambrien inférieur).

● Les eaux les plus récentes sont les eaux du flanc Sud suivi par les eaux du flanc Nord.

● Les **eaux thermales** sont les plus anciennes



Temps de résidence

Echantillon	Nom	A ¹⁴ C DIC (pmc)	δ ¹³ C DIC (‰ V-PDB)	« Age » Eichinger (a BP)
Sources Thermales				
M9-19	Abeino	6.4	-5.7	15 300
Flanc Sud				
M9-17	Timoulay Izdar	54.6	-10.7	200
M8-04	Timoulay Oufela	53.1	-10.3	0
M9-22	Lahrim	57.5	-10.7	<0
M9-21	Boui-zakarne	58.3	-10.7	<0
M9-23	Assaka	60.8	-10.3	<0
M8-20	Tagant	62.6	-10.3	<0
Flanc Nord				
M9-14	Talaint	48.5	-9.8	1 300
M9-13	Reggada	50.1	-9.6	800
M8-15	Ighrem	44.3	-10	2 000
M8-16	Ifri	40.3	-7.5	1 000

Conclusion Générale

Résultats Hydrochimiques et Isotopiques

Flanc Sud

faible salinité
composition chimique équilibrée avec les carbonates du Cambrien inf.
 \downarrow ^{18}O et ^2H
 recharge à partir des altitudes élevées
 $\uparrow \text{A}^{14}\text{C}$ et $\downarrow \delta^{13}\text{C}$ (0-200 a BP)

Flanc Nord et côtés Est et Ouest

large gamme de salinité
l'interaction avec les schistes
 \uparrow ^{18}O et ^2H
 Lié à l'altitude de recharge et l'effet de la proximité de l'océan
 $\uparrow \text{A}^{14}\text{C}$ et $\downarrow \delta^{13}\text{C}$ (800-2000 a BP)

Eaux thermales

faciès $\text{SO}_4\text{-Ca}$
 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
 interaction avec l'anhydrite et le gypse du Cambrien inf.
 \downarrow ^{18}O et ^2H
 $\downarrow \text{A}^{14}\text{C}$ et $\uparrow \delta^{13}\text{C}$
 Recharge ancienne
 climat + humide et + froid par rapport à l'actuel

Aquifère granitique

salinité non négligeable
 $\uparrow \text{U}$, SiO_2 et $\uparrow \text{Na/Cl}$
 \uparrow $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
 reflètent l'interaction avec les granites

Conclusion Générale

Les résultats de cette étude suggèrent que **les eaux des réservoirs étudiés ne proviennent pas seulement d'une recharge moderne.**

Faibles précipitations dans la région → **faible renouvellement** récent et continu de la ressource.



L'exploitation continue de la nappe phréatique dans cette zone semi-aride pourrait encore **augmenter l'épuisement de la ressource** et **augmenter la salinité des eaux.**

Ceci peut influencer davantage l'aspect quantitatif et qualitatif des eaux dans les régions avalées (Bouizakarne-Guélmime, Tiznit).

- Ces résultats peuvent aider les décideurs pour une meilleure planification en vue d'assurer une bonne gestion de la ressource dans ces zones à stress hydrique



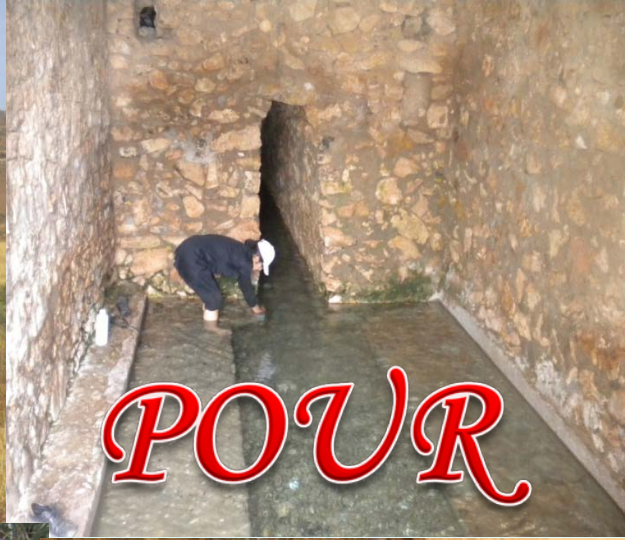
Perspectives

Pour mieux gérer la ressource en eau dans cette région à climat aride

- Un réseau de stations météorologiques s'avère nécessaire pour mieux ajuster la fonction entrée.
- Faire des analyses chimiques et isotopiques de la roche encaissante pour bien évaluer le taux d'interaction roche-eaux.
- Une étude géophysique s'avère aussi nécessaire pour fixer les limites hydrogéologiques de l'ensemble des aquifères de la région.
- Faire des modèles géographiques 3D pour montrer l'évolution dynamique et chimique des eaux souterraines de la région.



MERCI



POUR



VOTRE



ATTENTION

