

SILICE et SILEX

Minéralogie: les formes de la silice à BT

Comportement de la silice dans l'eau et dans son cycle sédimentaire non détritique.

Origines multiples des silex avec quelques cas

La silice, l'eau et les silex

- Il existe des **relations physicochimiques étroites** entre l'eau et les **minéraux** du groupe de la silice. La **mise en solution et le dépôt** de la silice interviennent dans de très nombreux processus de surface liés aux **altérations des roches**, à la **formation des sols** et à la **sédimentation chimique** et/ou **biochimique**.
- La **nomenclature pétrographique** des roches siliceuses non détritiques **varie beaucoup** selon les prospecteurs, les géologues, les écoles et les pays, leurs régions, les époques..... Le **terme de silex** recouvre ici des **matériaux ou "accidents" siliceux variés*** : **chailles, cherts, silexites, sinters**, opalites, flint, porcelanites, silexoïdes, "silicifications", etc.....
- Pour éviter des confusions liées à cette nomenclature discutable le **terme de "silicification"** sera **exclusivement utilisé ici pour parler des mécanismes** ou **des processus génétiques** (remplacement & précipitation,.....).
- * Les termes usuels seront indiqués **en violet**

LES MINERAUX

PHASES MINERALES SILICEUSES A BASSE TEMPERATURE (25°C)

Rappel : de l'opale au quartz....



1-L'OPALE



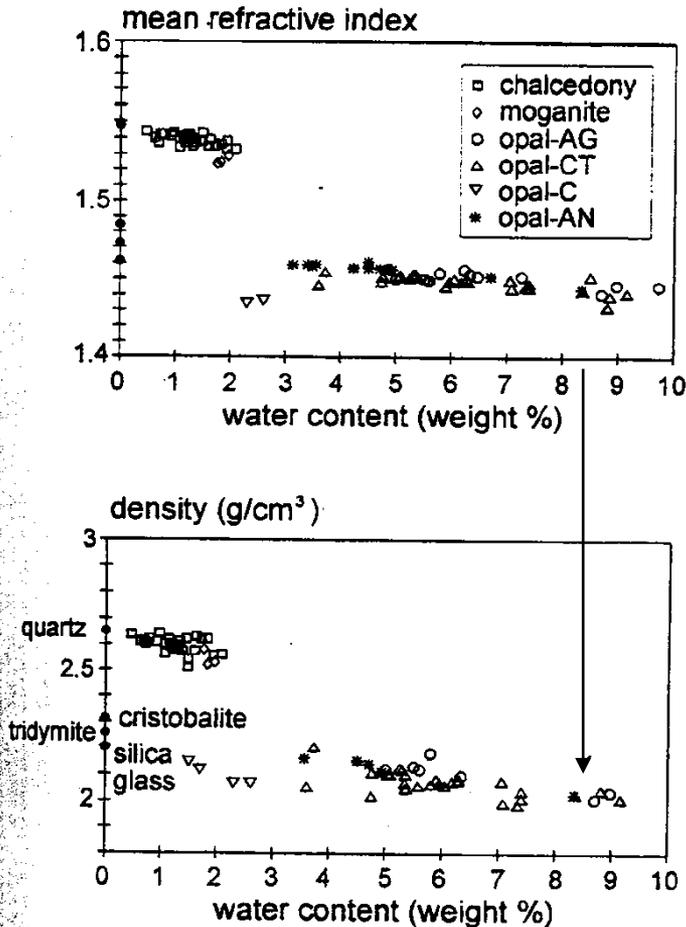
①



②

Opale résinite; silexites des silicrètes* du Bourbonnais

1-L'OPALE: un matériau hydraté

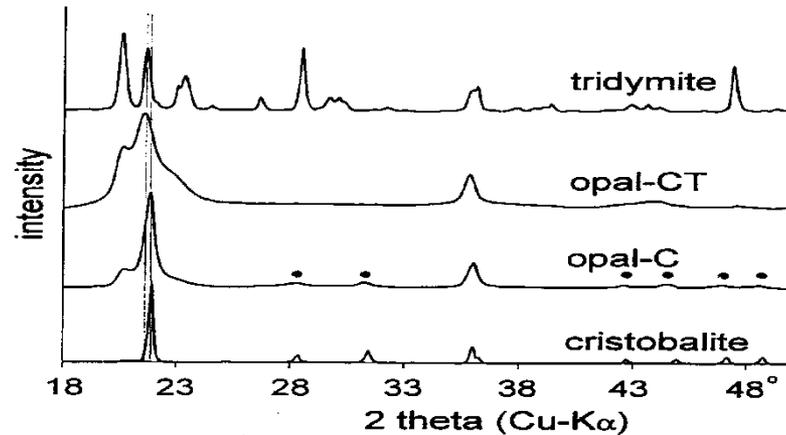
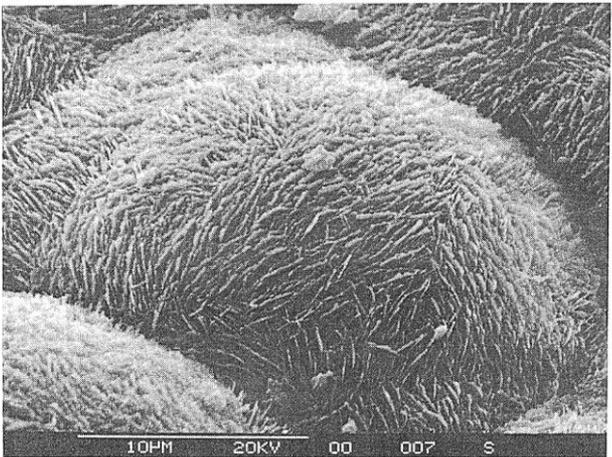
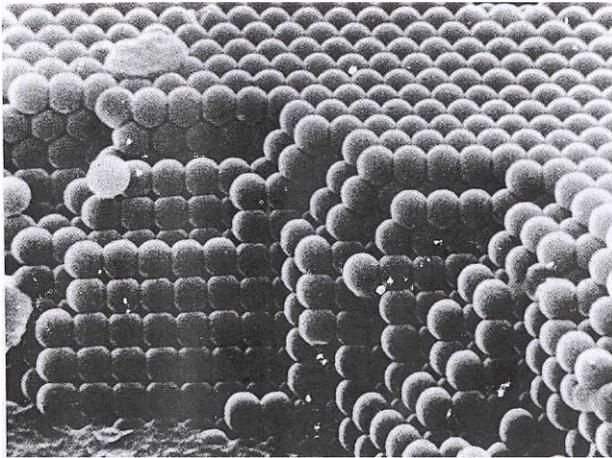


L'opale est une silice **amorphe** ou **cryptocristalline**. Certains échantillons offrent une **isotropie microscopique** marquée; d'autres montrent une **anisotropie légère** en désaccord avec le caractère amorphe qu'on lui accorde.

La composition de l'opale *sl.* comporte une quantité importante d'eau; sa formule **SiO₂.nH₂O** montre que **la teneur en eau est très variable**. Les analyses livrent des teneurs en eau comprises entre **1.5 et 10%**.

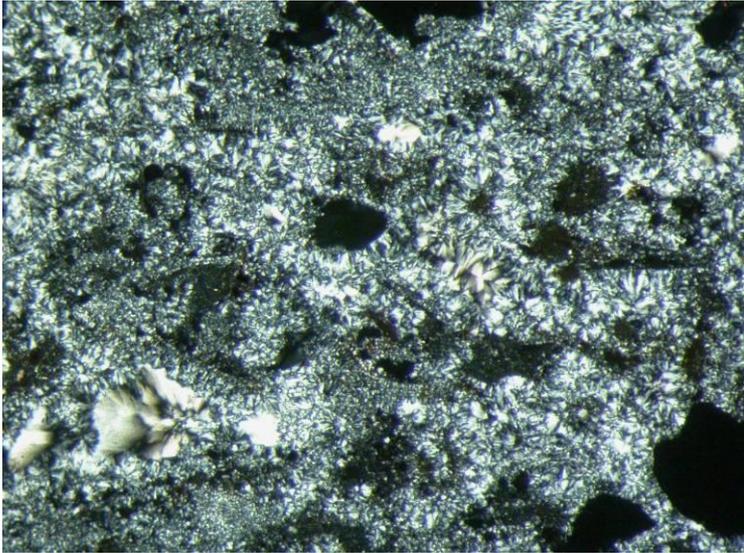
La densité (2.01 à 2.16) et l'indice de réfraction (1.441 à 1.459) dépendent étroitement de la quantité d'eau contenue. (Aucune différence de densité entre les différents types d'opales -AG ou AN, C, CT- ne peut être mise en évidence).

1-Les OPALES et la diffractométrie X



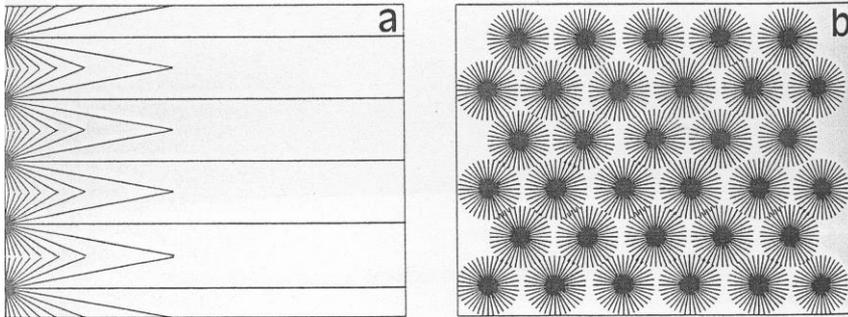
- Au microscope électronique l'opale gemme (AG) montre qu'elle est constituée d'un **empilement régulier de microsphères (lépissphères)** à l'origine des effets interférentiels de cette phase.
- **L'analyse diffractométrique** montre l'existence de plusieurs types d'opales où l'état amorphe (opale AN ou AG) n'est pas systématique. Un état **cristallin structuré** voisin de la **cristobalite** (opale C) et/ou de la **tridymite** (CT) a été relevé dans les opales à **microsphères à microlites**.
- Il existe ainsi plusieurs types d'opales.... **Les opales C et CT correspondent à la lussatite.**

1-LA CALCÉDONITE

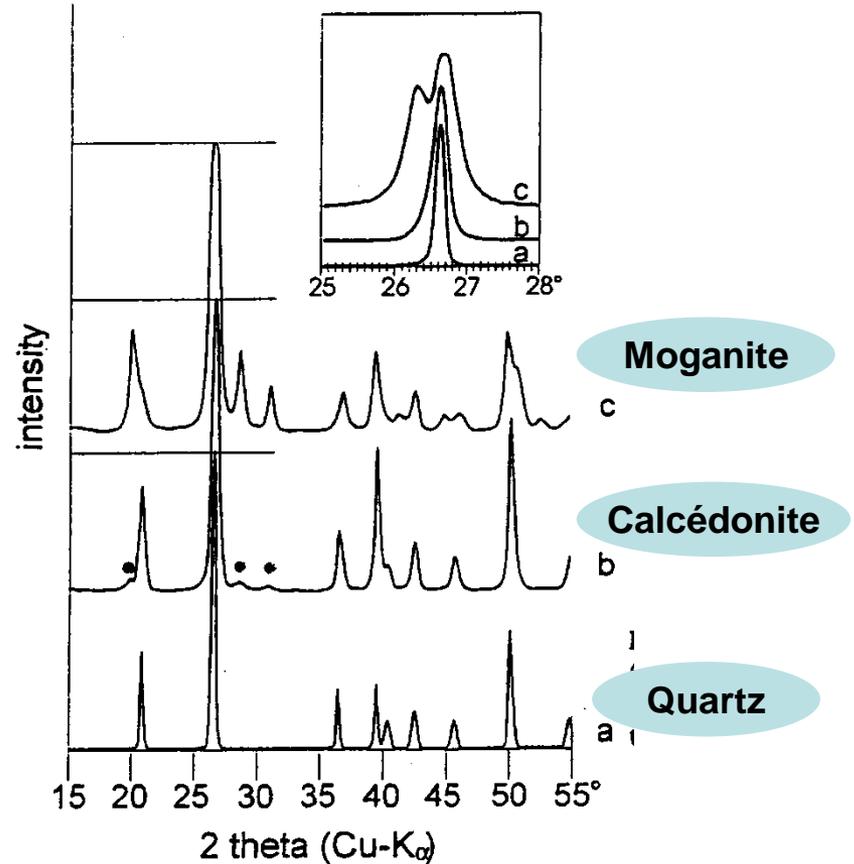


- La calcadonite est une silice fibreuse **proche du quartz** par ses propriétés. Au-delà de son habitus elle en diffère principalement par sa teneur en eau qui est comprise entre 0.5 & 2% et sa structure cristallographique intime (*cf. infra*).
- Elle est fréquente dans les **silex marins ou continentaux (silcrètes)** ainsi que dans ceux soumis à une évolution minéralogique tardive liée à de nouveaux équilibres physico-chimiques. Elle est souvent inféodée aux roches carbonatées.
- Son **habitus fibreux en tapissage** de cavités (textures collomorphes s./.) implique une nucléation sur les parois et une **légère sursaturation en SiO₂** des solutions à l'équilibre par rapport à celles du quartz.

1-LA CALCÉDONITE



- a- **nucléation de parois** et croissance fibreuse.
- b- **habitus sphérolitique** reprenant d'anciennes **lépispères** d'opale et héritant parfois d'une texture antérieure.
- Le **diffractogramme X** montre que la structure de la calcédonite est légèrement différente de celle du quartz par **l'existence de pics supplémentaires mineurs** qui caractérisent la **moganite**.
- La moganite est voisine de la calcédonite. Sa découverte est récente.

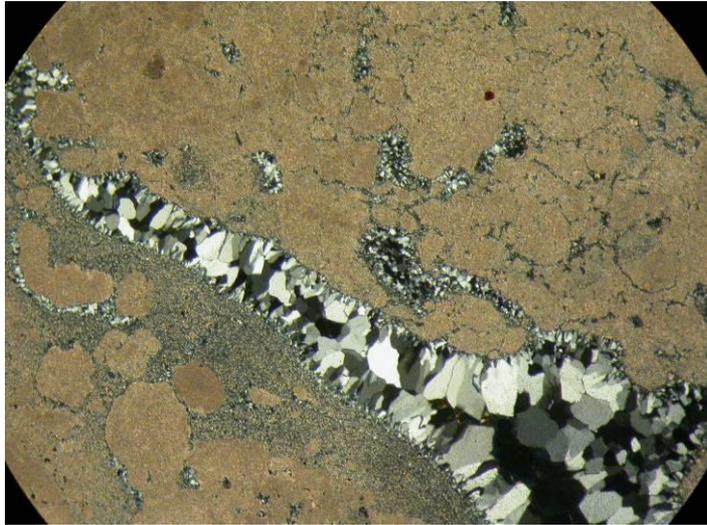


1-LE QUARTZ

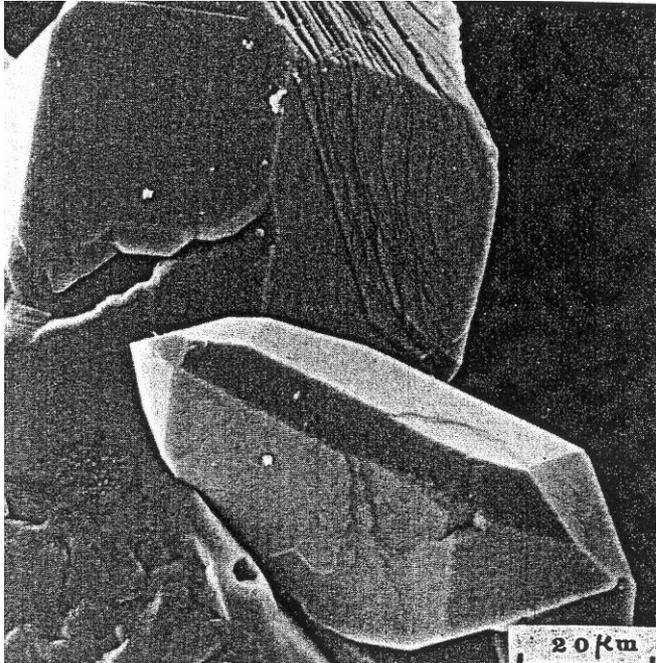


- Le quartz est une phase fréquente dans les silex. Il occupe le fond matriciel de la roche (mosaïque microcristalline à **microquartz**) ; il tapisse (ou colmate) les vides du matériau.
- Dans les cavités son habitus est **automorphe (macroquartz)** ; dans les colmatages d'anciens vides il est en mosaïques polyédriques avec des cristaux de forte taille (**mégaquartz**).
- **L'habitus du quartz est très variable** et dépend de son **site d'implantation lors de la nucléation** (matrice ou parois de vide).

1-LE QUARTZ



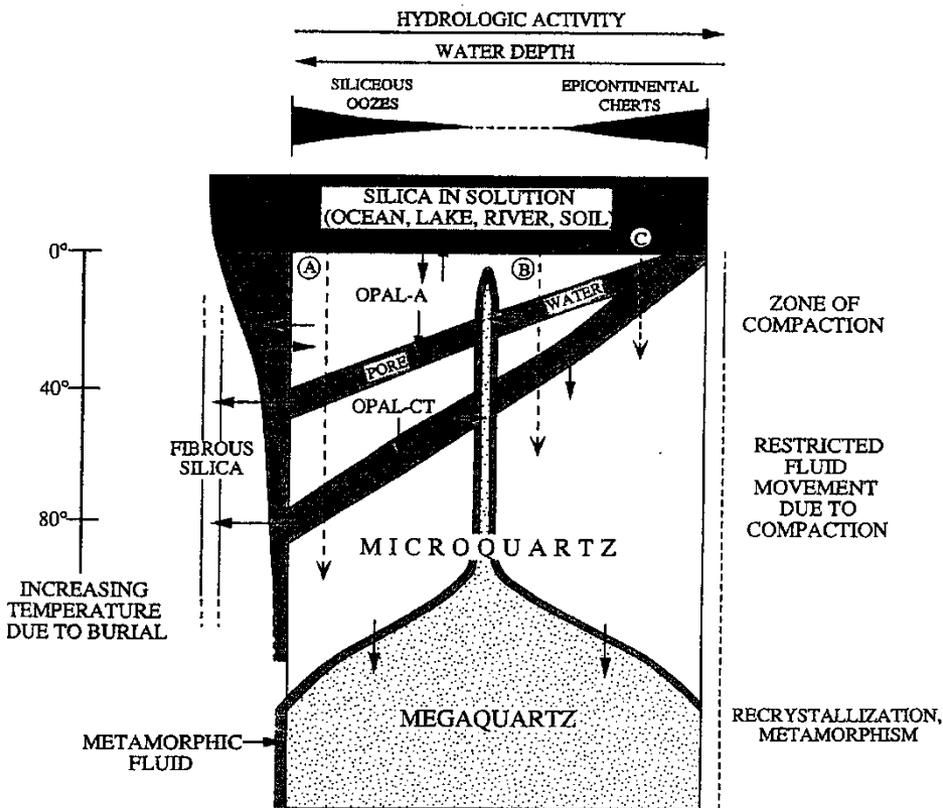
- Pour les tapissages de cavités la **morphologie du quartz est fibreuse** avec des cristaux implantés normalement à la parois (**quartz palissadique**).
- La bordure externe du tapissage peut offrir des **quartz automorphes** (parfaitement cristallisés).



- Ici: il s'agit d'un calcaire lacustre partiellement silicifié où **une solution aqueuse contenant la silice (5 à 10ppm)** a envahi le matériau et déposé le quartz. La silicification se fait à la faveur d'une **décalcification progressive** par un **envahissement intergranulaire des carbonates** et par le **tapissage des vides de dissolution**.

1-Evolution temporelle et séquence minéralogique

- La **séquence** évolutive des phases de la silice impliquant : **opale sl.** →
→ **calcédonite** → **quartz** est générale.



Avec le temps, la **métastabilité** des **phases** de la chaîne, les **imprégnations hydriques** successives, la **recristallisation**,... conduisent à dissoudre et/ou à « **quartzitiser** » les dépôts siliceux (silicifications s.l.).

La durée de cette évolution est cernée (200-250Ma). Toutefois certains silex échappent à cette lente dégradation vers le quartz. On connaît des silex permien comportant encore de l'opale et la calcédonite!

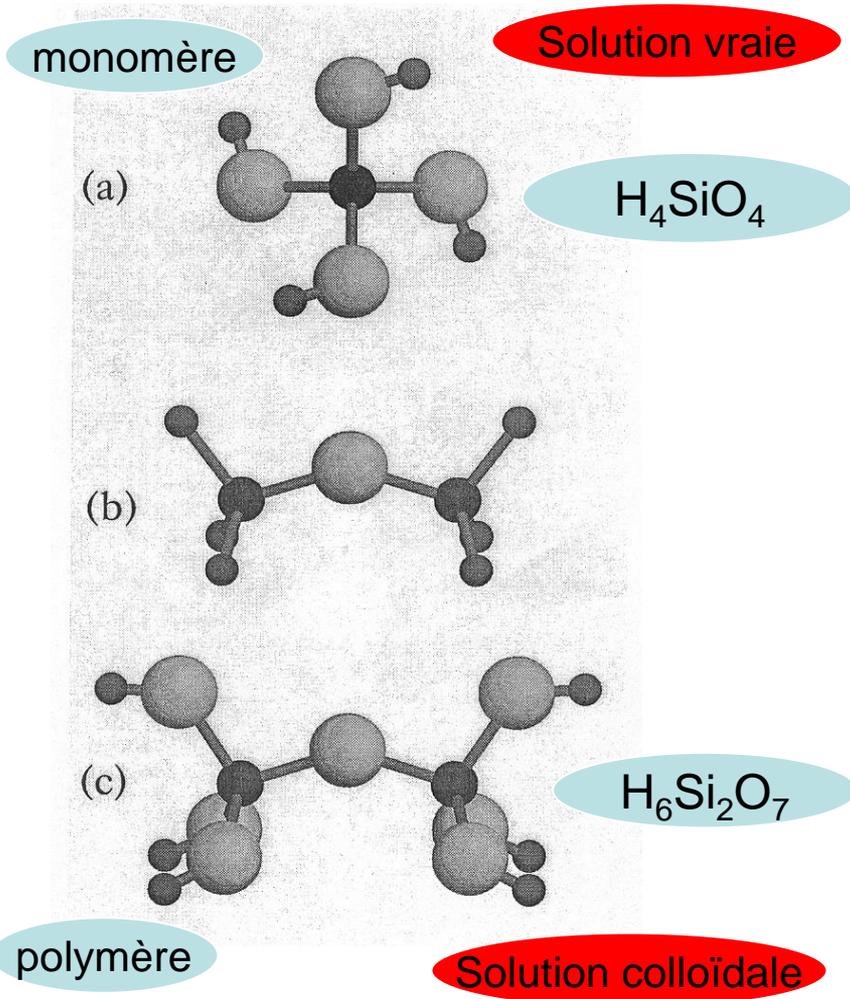
LA SILICE ET L'EAU

La silice en solution....

D'où proviennent t-elle?

Teneurs nécessaires pour la génèse
du quartz

2-La silice et l'eau: H_4SiO_4



- La **principale réaction de dissolution** de la silice dans l'eau est résumée par la réaction suivante:



solide

en solution

La molécule H_4SiO_4 est une silice hydratée simple (monomère). Cette silice est peu soluble.

Une seconde molécule est également présente dans l'eau : $\text{H}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ qui est issue de la réaction de polymérisation suivante:

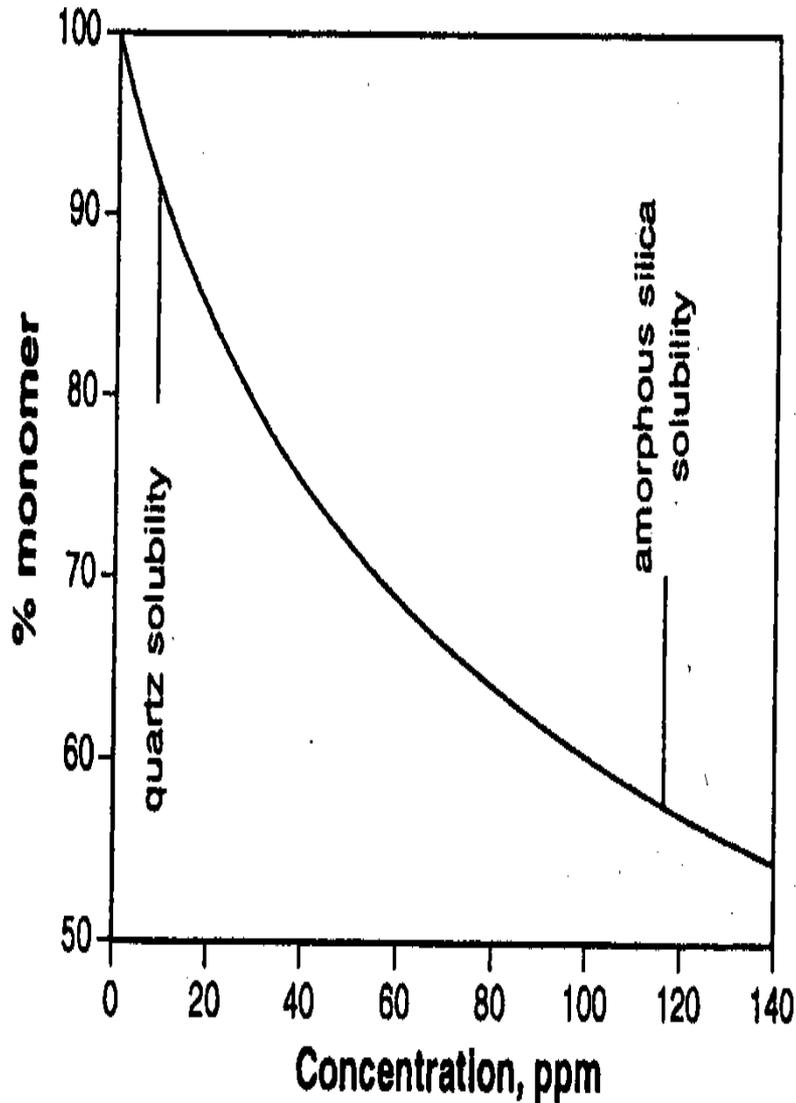


en solution

en solution

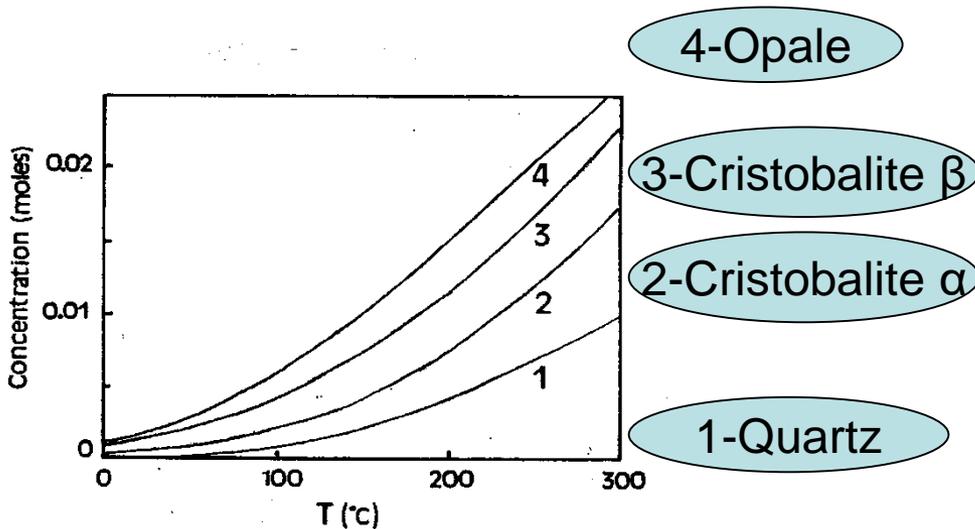
La molécule polynucléaire est une silice hydratée **dimère** (ici à 2 atomes de silicium). Sa formation conduit à éliminer une molécule d'eau. Cette molécule se forme dans l'eau au dessus de 140ppm à 25°C et au dessus de pH 9 (solutions colloïdales).

2-La silice et l'eau



- La courbe ci-jointe donne la fréquence en pourcentage de la molécule H_4SiO_4 dans l'eau à l'équilibre avec une phase siliceuse de la famille du quartz.
- On peut admettre qu'une solution titrant 8 à 10 ppm de silice hydratée monomère est à l'équilibre avec le quartz.
- Les opales amorphes à l'équilibre avec une eau fortement siliceuse impliquent des teneurs supérieures à 120ppm. Ces eaux comportent moins de molécules monomères (< 60%) et beaucoup plus de molécules polymérisées (>40%).
- Au dessus de 150-160ppm cette seconde molécule $H_6Si_2O_7$ devient prépondérante dans les eaux siliceuses. Par contre elle est subordonnée (<10%) entre 1 et 10 ppm.

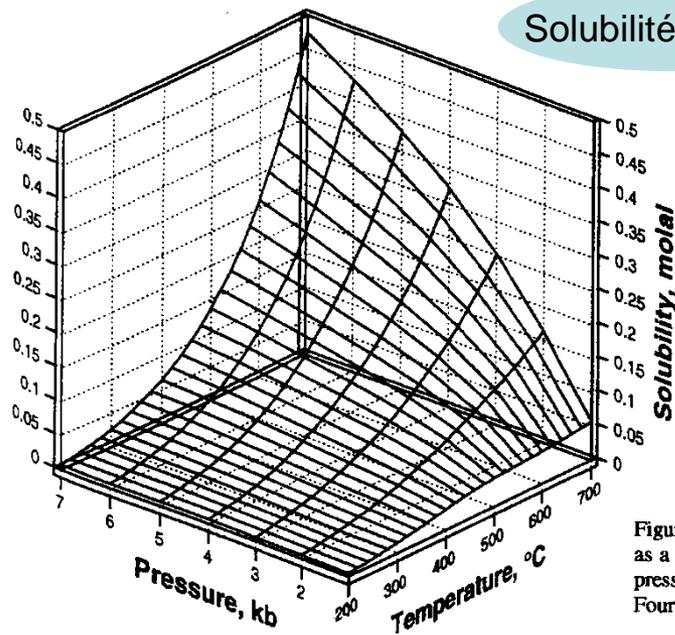
2-La silice et l'eau: rôle de T°C



On admettait, en géologie que le quartz était insoluble dans l'eau.....

- La **solubilité de la silice** dans l'eau varie selon **la nature de ses polymorphes** et augmente avec la température.
- Le **quartz présente une mauvaise solubilité** comparée à celles des autres phases communes de la silice.
- La **solubilité de la silice augmente** du quartz, à la cristobalite α, à la cristobalite β, à l'opale amorphe. (en relation avec les $\Delta G^{\circ f}$).

2-La silice et l'eau: rôle de la pression



Solubilité, f T°C, f P

Fig.1

Figure 4. The solubility of quartz as a function of temperature and pressure based on the equation of Fournier and Potter (1982b).

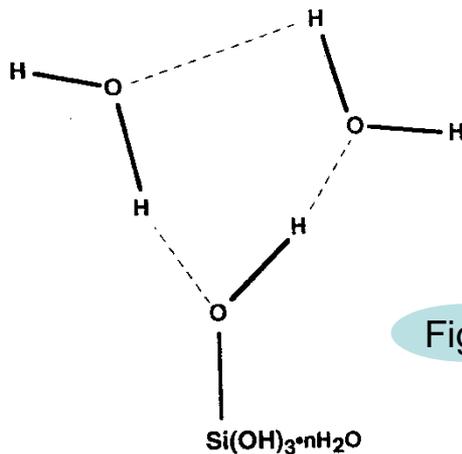


Fig.2

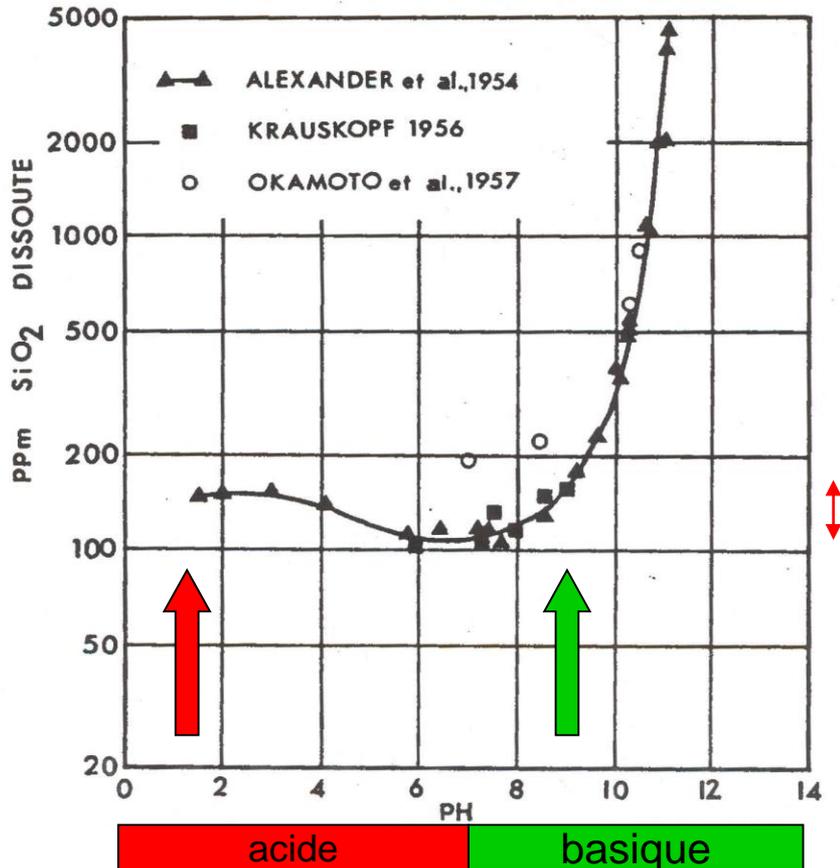
L'élévation de pression augmente également la solubilité du quartz. Cette augmentation de la solubilité est liée avec l'augmentation de la concentration de l'eau autour de H_4SiO_4 . (fig.1).

La configuration géométrique adoptée par les molécules d'eau (fig.2) autour des groupements OH augmente la solubilité de la silice (travaux de Chakoumakos et Gibbs, 1986).

Pour les silicifications l'effet de la pression joue seulement un rôle mineur sauf pour les eaux hydrothermales qui sont à l'origine de certains dépôts hydrothermaux (geysérites*,...)

Au voisinage du point critique de l'eau (374.1°C) la solubilité de la silice s'effondre et passe par un minimum lié à celui de la densité de l'eau dans cette région.

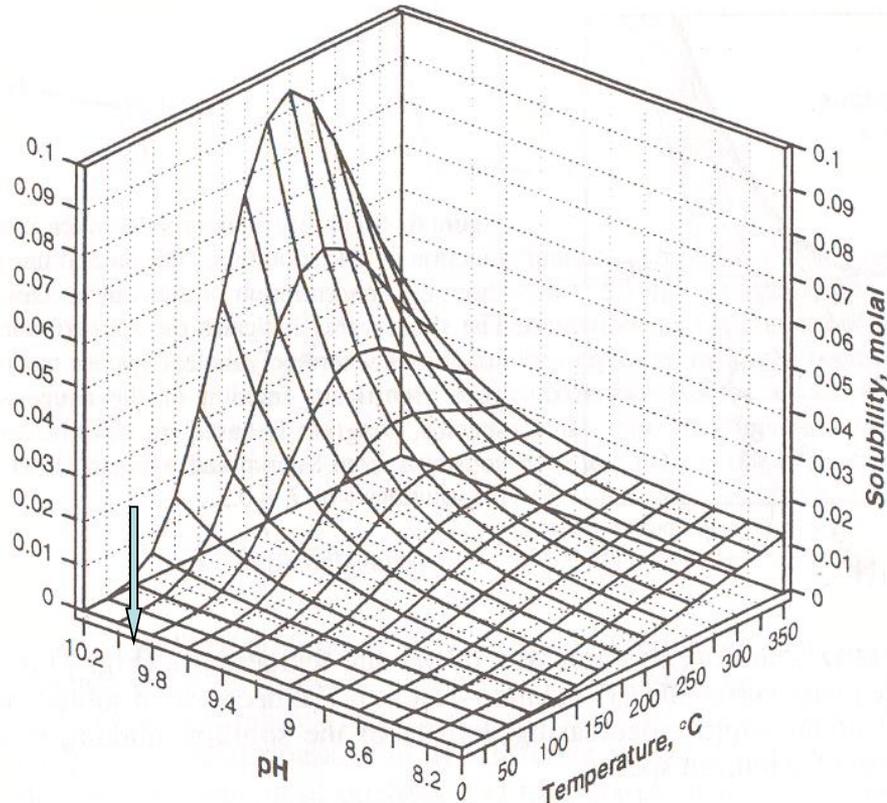
2-La silice et l'eau: rôle du pH



- La solubilité de la silice dans l'eau est considérée comme pratiquement indépendante du pH.
- La figure montre en effet qu'à 25°C de pH 1 à 9 les teneurs en silice de l'eau (à l'équilibre avec l'opale) varient entre 110 et 150 ppm.
- Par contre, en milieu basique au-delà de 9 les teneurs en silice de l'eau augmentent très rapidement.
- Pour les milieux géologiques de telles conditions physico-chimiques sont rarement observées.

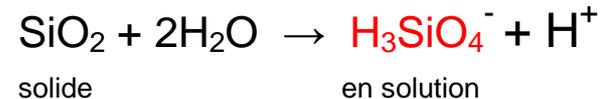
On admettait, en géologie, que la silice était insoluble aux pH < à 4 et de plus en plus soluble aux pH > ; Il n'en est rien.... (G. Millot, 1960)

2-La silice et l'eau: rôle du pH



La plus forte solubilité de la silice sous les pH basiques s'explique par l'apparition d'ions siliciques liés à la dissociation de H_4SiO_4 :

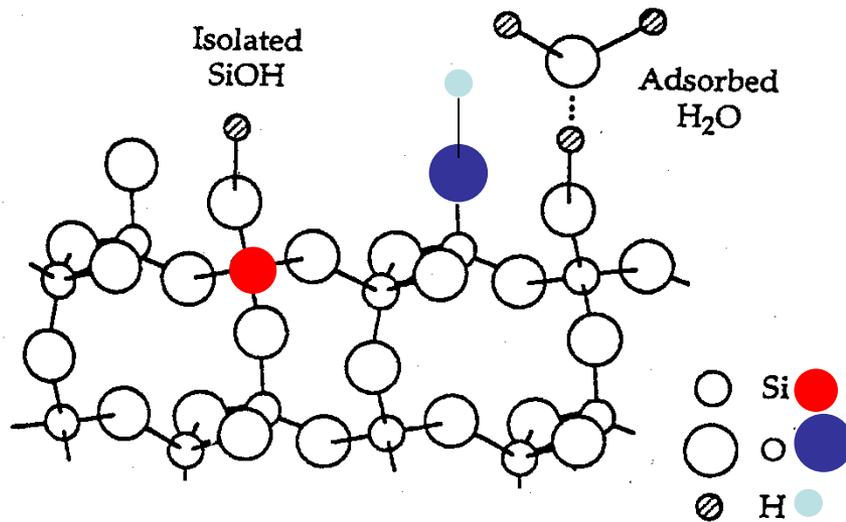
- H_4SiO_4 est un acide faible qui se dissocie facilement lorsqu'il est placé sous un pH de 9. Cette première dissociation donne :
- $\text{H}_4\text{SiO}_4 \rightarrow \text{H}_3\text{SiO}_4^- + \text{H}^+$
- L'ion H_3SiO_4^- peut être également produit sous pH un peu plus élevé par la réaction :



- * Sous pH encore plus haut la dissociation de H_3SiO_4^- par perte d'un hydrogène peut se produire en donnant $\text{H}_2\text{SiO}_4^{--}$.

....., nous avons été enfermés en géologie, par des traditions, difficiles à vaincre, sur la silice et les silicifications. Un des chapitres les plus tenaces, en cette affaire, est la question de la silice colloïdale des eaux naturelles et de sa floculation éventuelle..... (G. Millot-1960)

2-Silice & eau à l'interface du grain

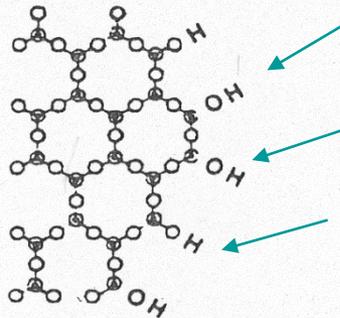
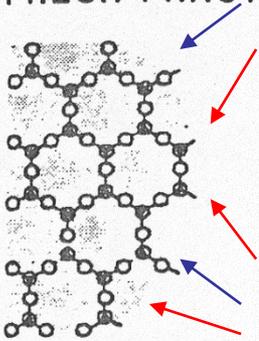


- La compréhension de la mise en solution de la silice dans l'eau passe par la connaissance des mécanismes interactifs à l'interface du grain de quartz et de l'eau.
- La nature même de la surface du solide joue un rôle dans la réactivité de la silice avec H₂O.
- Si une charge du **silicium** est libre un radical OH viendra compenser l'excédent de charge.
- Un **proton** compensera le déficit de charge du site de l'**oxygène** apparié au tétraèdre SiO₄.
- Les **groupes SiOH** (groupe "silanol") sont ionisés. Leur présence induit la réorientation des dipôles H₂O.

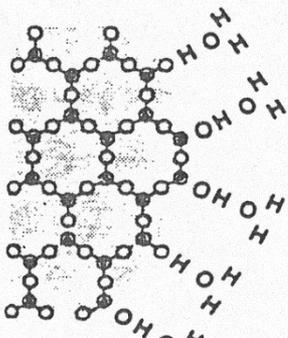
2-Silice & eau à l'interface du grain

Quatre phases d'interactives peuvent être notées au front d'une fracture fraîche de quartz:

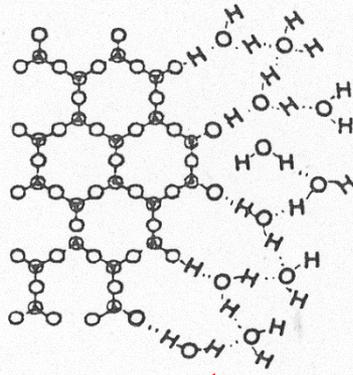
1 I. FRESH FRACTURE 2 II. HYDROXYLATED



3 III. ADSORBED MOLECULAR WATER



4 IV. WET SURFACE



1- Cette surface offre des atomes de **silicium** et d'**oxygène** vacants. Ces sites sont très rapidement occupés soit par des **OH** soit par des **protons**.

2- Ainsi tous les sites libres initialement sont occupés par des groupes silanols **SiOH** (**stade hydroxylé II**).

3- La présence des radicaux OH de surface conduit à **l'adsorption de molécules d'eau** (**stade à eau adsorbée III**) et à la formation d'une enveloppe à 3 couches d'atomes dont un **"mono-lit" H2O**).

4- L'équilibre électrique de l'enveloppe est conditionné par les groupes silanols (ionisés) et par la production de protons mobiles. Une **coque diffuse de molécules d'eau** s'installe autour et conduit à une relative stabilité électrique (**surface hydratée IV**)

2-Equilibre minéral - teneur en silice de l'eau

	Solubilité	
Quartz	6-7 (mesurée)	7-14 (calculée)
« Calcédoines »	17	
Cristobalite, Tridymite	27	
Opales	variable	
Silice amorphe	100-140	

- Si les teneurs en silice des solutions à l'équilibre avec la silice amorphe sont bien connues, par contre pour le cas du quartz les valeurs proposées sont variables:
- **L'expérimentation est extrêmement délicate et difficile** en raison de l'extrême lenteur avec laquelle l'équilibre s'effectue. Entre les **valeurs "mesurées"** à 25°C et celles obtenues par les **calculs thermodynamiques** la solubilité du quartz varie de **7** à **14** ppm.
- Lors des expériences **l'ajout de NaCl** dans l'eau ne modifie pas les teneurs à l'équilibre avec les phases siliceuses.
- Les teneurs données ici entrent dans le domaine des **solutions vraies**. Dans l'hydrosphère terrestre les solutions ne contiennent pas –théoriquement– de silice colloïdale.

LA SILICE ET L'EAU (suite....)

Des continents aux océans....

Cycle de la silice en milieu océanique

3-Teneurs en silice des eaux douces continentales

- **Les teneurs en silice dans les eaux continentales sont très variables.** Elles dépendent de leurs origines géologiques, des milieux qu'elles traversent ou percolent, des sols, des phases silicatées à l'équilibre, des saisons, des climats et latitudes,...
- Pour différents bassins versants les teneurs moyennes* en **H₄SiO₄** des eaux fluviales sont estimées à:
 - - granites: 11.9 ppm
 - - calcaires: 10.1ppm (en présence de cherts*!)
 - - gypse:10.2 ppm
 - - marne: 6.1 ppm
- L'apport annuel en silice **des eaux douces fluviales au milieu marin** est estimé à **200*10⁶ t de SiO₂/an.** (Cette valeur moyenne est peut être sous estimée car Bruyevich (1953) avance **300*10⁶ t à 452*10⁶ t de SiO₂/an....**).

*d'après Hembree et al. (1952) U.S.G. Survey

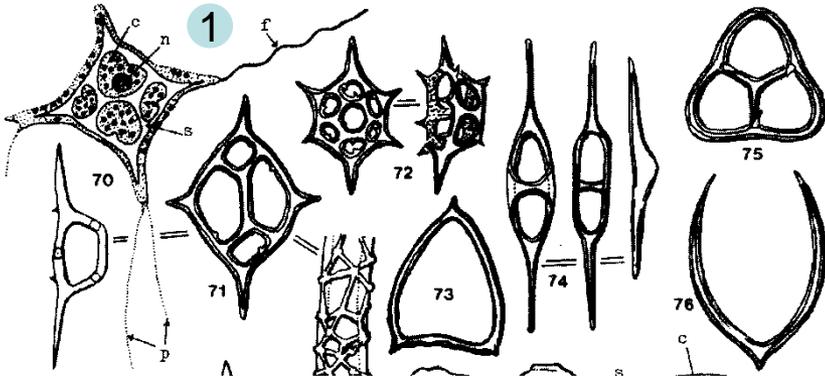
3-Teneurs en silice des eaux marines

Total de	34.479 ppm dissous	
Cl ⁻	18.980	
Na ⁺	10.556	
SO ₄ ²⁻	2.649	
Mg ²⁺	1.272	
Ca ²⁺	400	
K ⁺	380	
CO ₂	140	(HCO ₃ ⁻ & CO ₃ ²⁻)
Br ⁻	65	
B(OH) ₄	26	
Sr ²⁺	8	
F ⁻	1.3	
H ₄ SiO ₄	1	
NO ₃ ⁻	0.5	
Fe ²⁺ , Fe ³⁺	0.01	
Al(OH) ₄ ⁻	0.01	
Unité:ppm	(in Mason et al. 1966)	

- La teneur moyenne des eaux marines de surface en H₄SiO₄ est faible et de l'ordre du ppm (et souvent nettement inférieure).
- D'un point de vue biologique cette teneur est paradoxale car les planctons siliceux (à diatomées & radiolaires) sont constituées d'opale.
- La composition de l'eau de mer (SiO₂ ≤ 1ppm) est telle que les squelettes devraient être solubilisés en raison de cette très forte sous-saturation (2 ordres de magnitude inférieurs à la teneur à l'équilibre avec l'opale : ~140ppm).
- Pour Heath (1974) 96% de l'opale est dissoute avant la sédimentation; 0.1 à 2% de la production siliceuse sont intégrés aux sédiments.

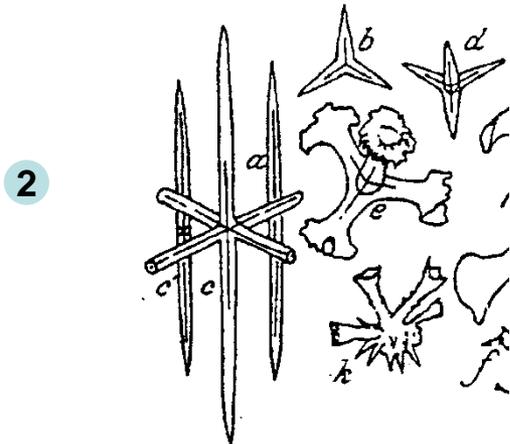
3-La silice particulière biogène dans l'eau de mer

- Dans les milieux marins la silice minérale la plus fréquente est **d'origine organique (opale A)**.



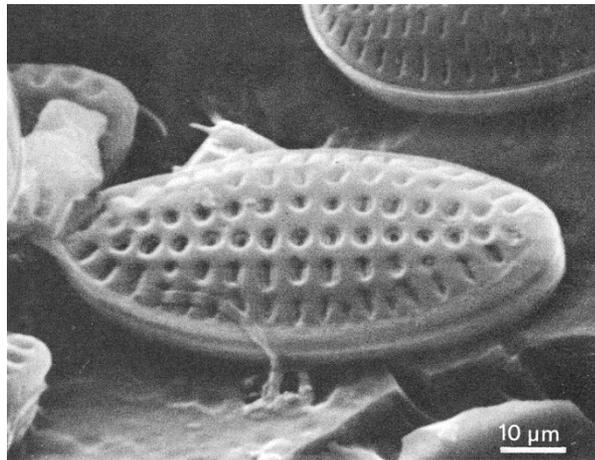
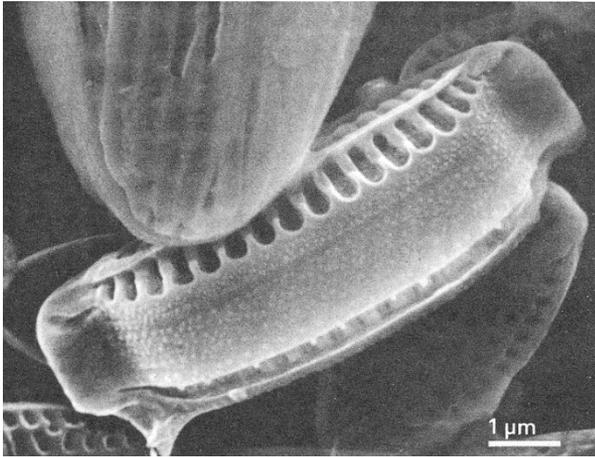
- Elle est métabolisée par les organismes planctoniques algaires (**diatomées**) ou animaux (**radiolaires, silicoflagellés**) (1).

En raison de la taille des organismes planctoniques **la silice en suspension** dans le milieu océanique **est considérée comme particulière**.



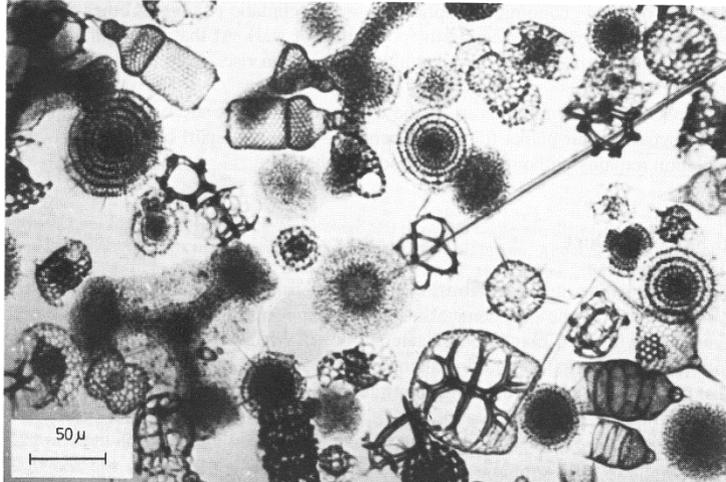
- (Les spicules constituent la trame squelettique des tissus des spongiaires qui vivent sur les fonds marins. Ceux des **éponges siliceuses** (2) constituent une part notable du stock de la silice biologique. **Cette silice peut intervenir dans la genèse des silex marins**).

3-Diatomées



- Les diatomées sont des **algues unicellulaires chlorophylliennes et siliceuses** modernes (crétacé supérieur à quaternaire) qui vivent principalement dans les **eaux froides** (phytoplancton).
- Elles jouent un rôle prépondérant dans le cycle biologique de la silice principalement dans les eaux marines.
- Leur « squelette » (ou **frustule**) est constitué d'opale. La **matière organique vivante protège** l'opale et évite la dissolution par le contact des « squelettes » avec l'eau de mer.
- A la mort de la cellule cette **dissolution** démarre rapidement.
- La dissolution marine est facilitée par **la structure poreuse des frustules** et par leur grande surface d'échange avec l'eau (150m²/g).

3-Les radiolaires



- Les radiolaires sont des **organismes unicellulaires marins**. Contrairement aux diatomées précédentes les radiolaires ne sont pas strictement attachées à la **zone photique** (bathymétrie 0 à 120m ou 200m selon les auteurs).

- Elles vivent principalement dans les **eaux inter-tropicales** où elles constituent **une fraction importante du zooplancton**.

- La structure du squelette est ici moins favorable à la dissolution. Les radiolaires jouent un rôle important dans la formation **de certaines boues bathyales**.

- Par le passé en particulier **au mésozoïque les radiolaires** ont joué un rôle notable dans la formation de certaines roches siliceuses.

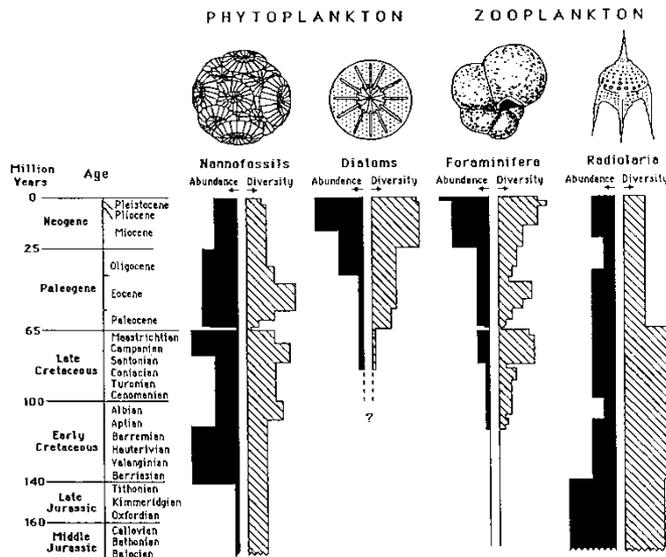


Fig. 8.17. Abundance and diversity patterns of pelagic microfossils. [H. R. Thierstein et al., in G. B. Munsch, ed., 1988. Report of the Second Conference on Scientific Ocean Drilling Cosod II, European Science Foundation, Strasbourg]

3-Fréquences des organismes siliceux océaniques

effectif / m ³ à la surface	Antarctique	%	Tropique	%
Diatomées	6767256	99.44	8625	31.86 à 75.84
Radiolaires	10 à 100	-	qq 100 à 16000	2.64 à 59.10
Silicoflagellés	38100	0.56	2448	9.04 à 21.52

- **Répartition:** Une grande majorité des organismes siliceux vit à proximité de la surface dans la zone lumineuse (en fait jusqu'à 200 mètres). Plus bas ces organismes sont morts à l'exception de quelques radiolaires.
- **Les diatomées sont les organismes les plus fréquents** particulièrement dans les eaux de l'Antarctique où l'on a pu compter de 200 à 1000*10⁶ frustules/m³. On verra que la répartition latitudinale dans les océans est extrêmement variable.
- Les **radiolaires** : leur relative rareté aux comptages pose le problème des sédiments siliceux profonds. La transposition des observations actuelles au passé est délicate.
- Les **silicoflagellés** sont des organismes également subordonnés par rapport aux diatomées. Leur importance est négligeable dans les dépôts marins actuels et leur rôle dans la formation de roches siliceuses bathyales est nul.

3-Répartition du phytoplancton et d'extraction de la silice

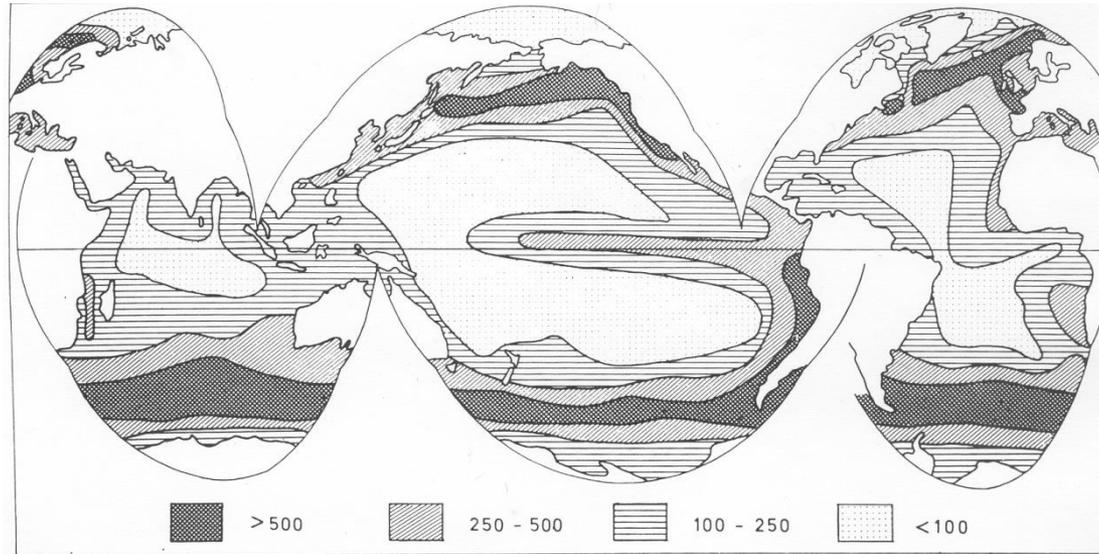
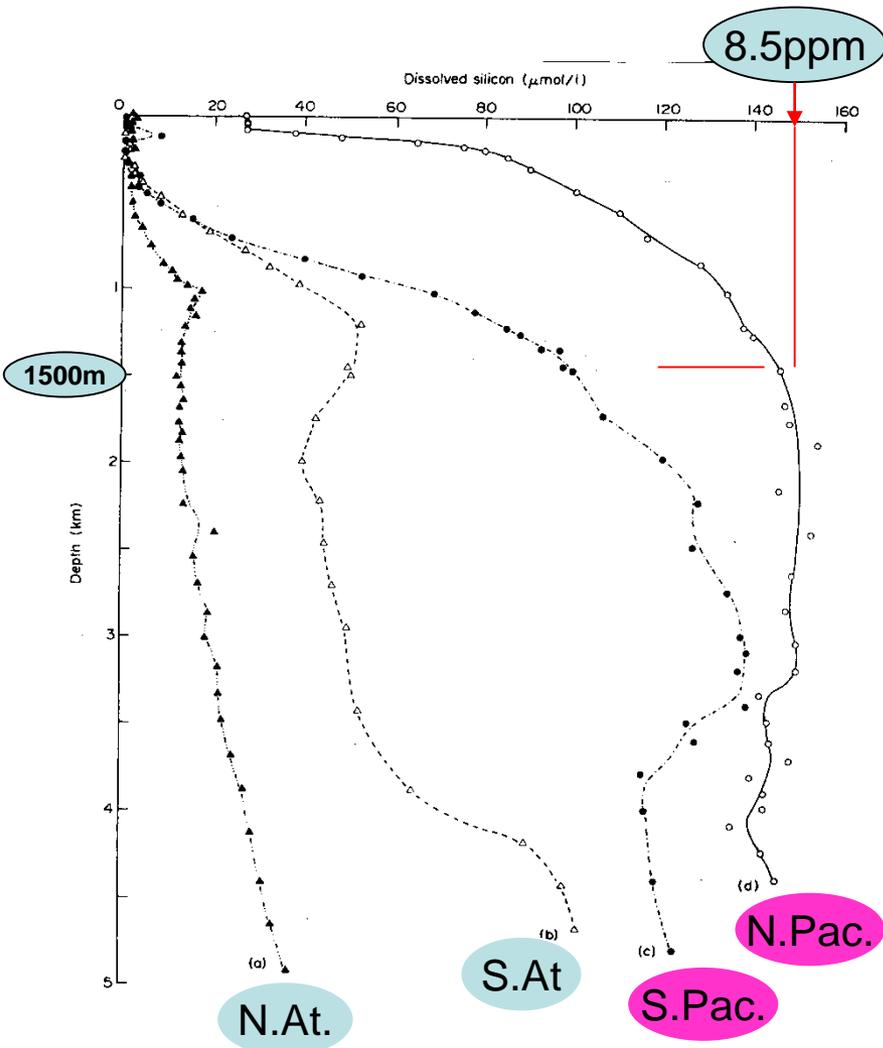


Fig. 2. Regional variation in the rate of extraction of dissolved silicon ($\text{g SiO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$) by phytoplankton in near-surface waters. Modified from Lisitzin *et al.* (1967)

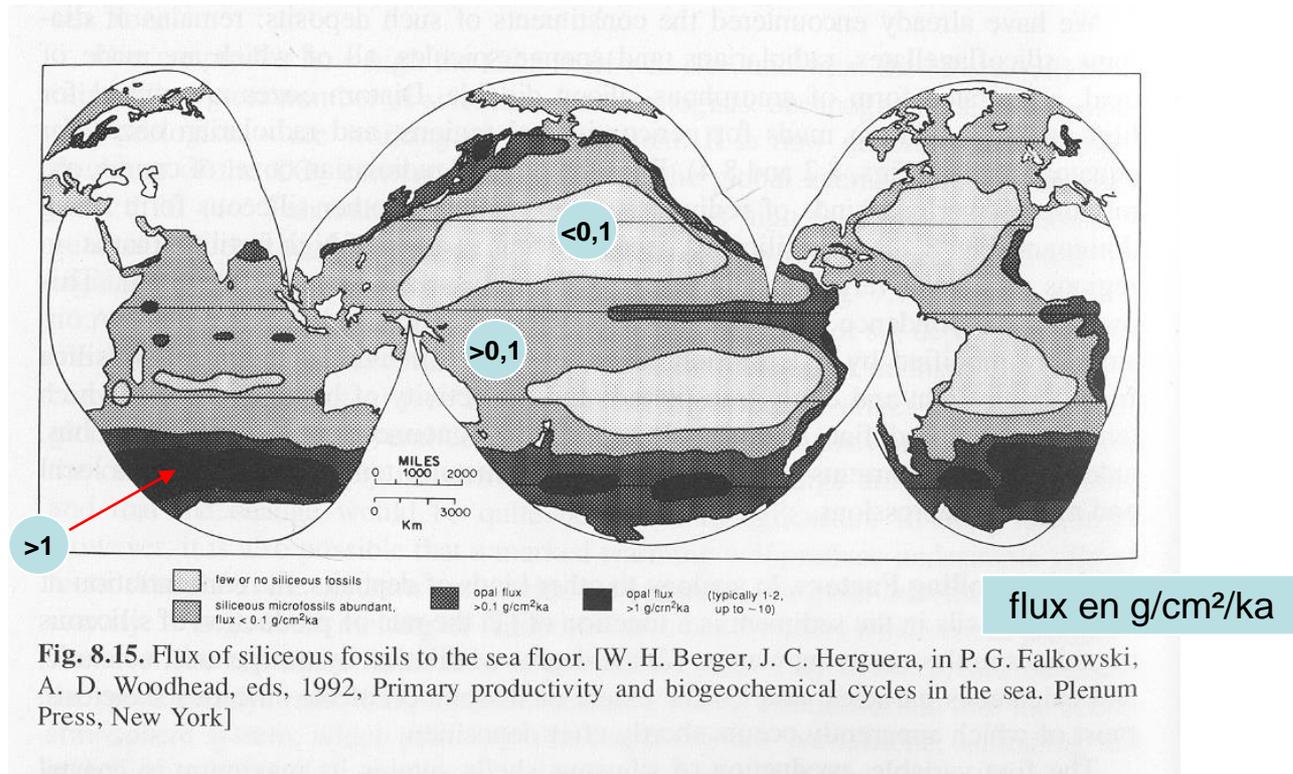
- Les diatomées marines vivent dans les **domaines océaniques froids**, plus dans les **zones bordières des continents** ou dans les zones **d'îles et dans les zones d'upwelling**. Les eaux équatoriales ou tropicales offrent de bas taux d'extraction liés à des effectifs faibles.
- **Le paradoxe de cette répartition** tient au fait que les diatomées vivent principalement dans les eaux pauvres en silice. Les bilans concernant la silice biologique montrent que **leur pullulation est à l'origine de ce déficit en silice à la surface ($\leq 1 \text{ ppm}$)**.

3-Variations bathymétriques de la silice dans les eaux océaniques



- Comme on vient de le voir les teneurs en silice des eaux de surface des océans sont particulièrement basses. Elles sont de quelques $\mu\text{mol/l}$ ($\ll 1\text{ppm}$ à 1ppm).
- Avec la profondeur les teneurs montrent une **augmentation régulière** avec des évolutions propres à chacun des grands domaines océaniques.
- Les teneurs les plus élevées ($\sim 8.5\text{ppm}$) s'observent à partir de 1500m dans le Pacifique Nord (52°N - 154°W).
- La **dissolution progressive post-mortem des organismes siliceux** est à l'origine de l'augmentation des teneurs avec la **profondeur**. Les courants profonds sont à l'origine des irrégularités de la progression.
- L'océan Pacifique paraît plus productif en silice que l'Atlantique.

3-Les dépôts siliceux profonds actuels



- Les **travaux plus récents (1992)** qui font suite aux campagnes ODP précisent la **cartographie des domaines les plus actifs** de la sédimentation siliceuse biogénique. Le taux de dépôt est extrêmement bas : autour de l'Antarctique il est supérieur à **1g/cm²/1000ans** (soit 1kg/m²/siècle).

Un bilan général a pu préciser les modèles antérieurs. **La précipitation directe de la silice biogénique peut-elle expliquer à elle seule les silex marins s/ ?.....**

3-Sédiments océaniques

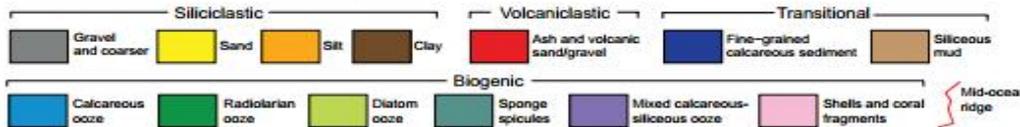
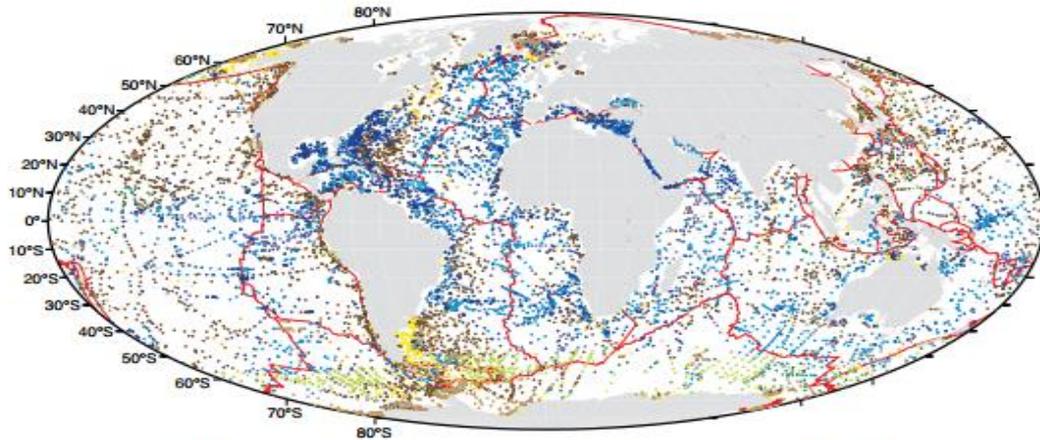


Figure 1. Seafloor sediment sample locations. Lithology-coded sample locations of surface sediments (n = 14,399) used to create the digital map of seafloor sediments in world's ocean basins (Fig. 2). Mollweide projection.

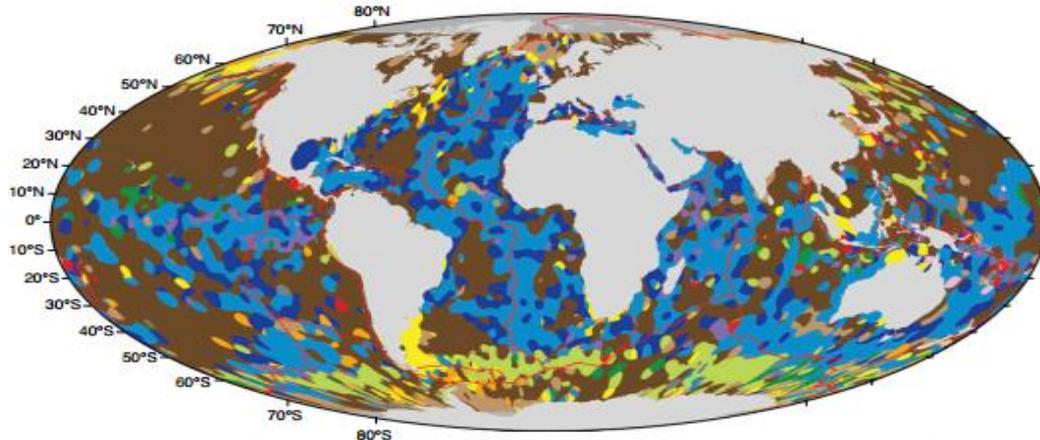


Figure 2. Digital map of major lithologies of seafloor sediments in world's ocean basins. Legend is the same as in Figure 1. More detailed views of major ocean basins and percentage estimates of lithologies are given in Figures DR4B-DR4E and Table DR1 (see footnote 1). Mollweide projection.

Les sédiments mondiaux ont été **réévalués et comparés** aux phytoplanctons de surface par voie satellitaire.

La répartition des sédiments biogéniques est beaucoup plus complexe que prévue....

Dans le détail - en particulier autour de l'Antarctique et de l'Amérique du sud - **la distribution des boues à diatomées observée par la voie satellitaire (zones en vert clair) ne correspond pas à celles des zones de production.**

3-Production des diatomées

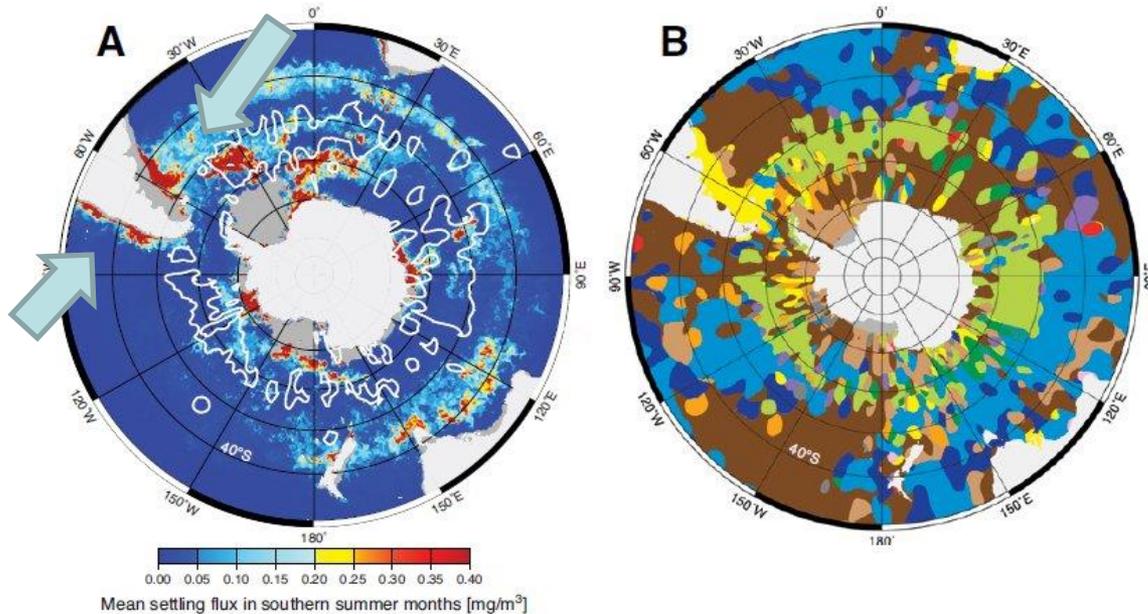
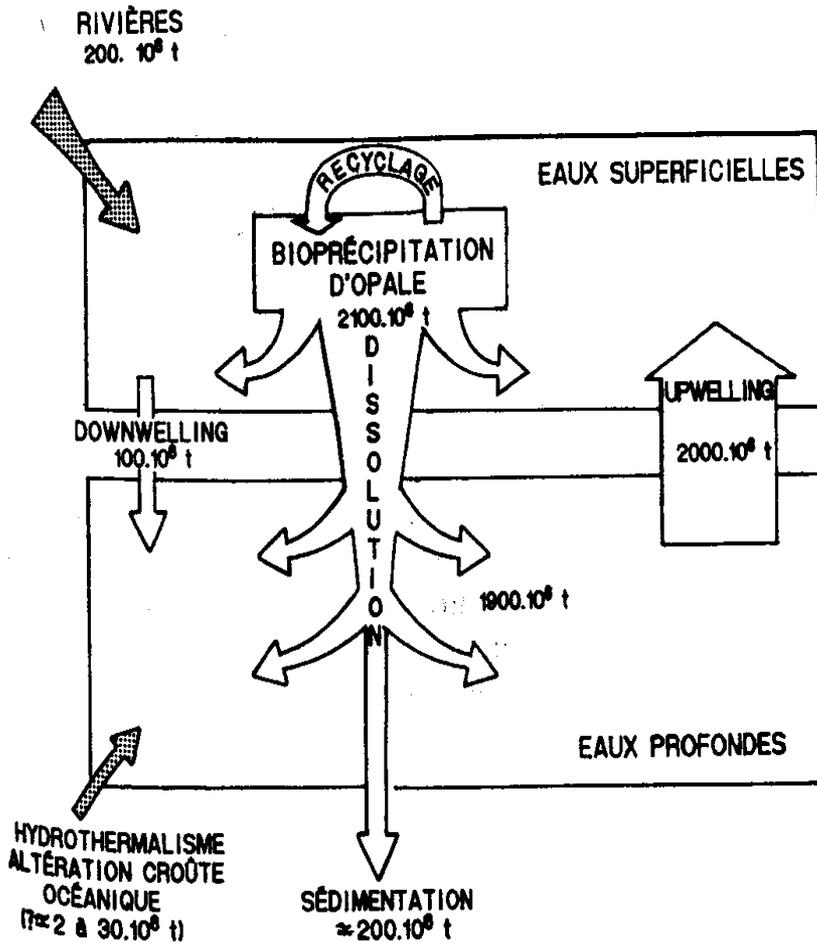


Figure 3. Biosiliceous oozes versus diatom chlorophyll concentration in the Southern Ocean. Stereographic projection. A: Outlines (in white) of regions where we map diatom oozes superimposed on austral summer average of diatom chlorophyll concentrations (mg/m^3) for the period 2003–2013 (Soppa et al., 2014). Color scale highlights subtle variations in diatom chlorophyll concentration; maxima (dark red) reach $\sim 18 \text{ mg}/\text{m}^3$. B: Distribution of lithologies; legend as in Figure 1.

- Les zones de production de silice par les diatomées de 2003 à 2013 (en rouge figure A) ne correspondent pas aux zones de sédimentation des boues à diatomées connues antérieurement.
- Les formations détritiques (en marron figure B) oblitèrent largement les dépôts siliceux.
- Les boues à diatomites fossiles correspondent peu ou pas aux zones de production actuelles.
- **Compétition** entre la sédimentation détritique et la sédimentation biogénique.

3-Bilan général de la silice en milieu océanique

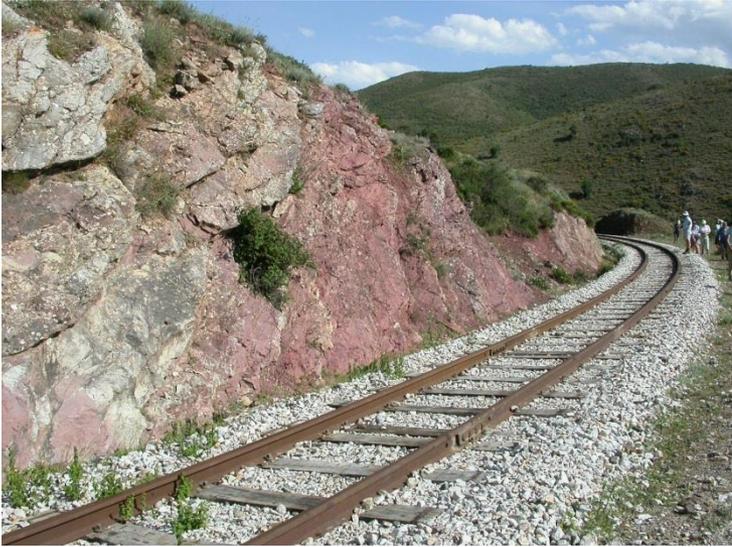


- **Deux réservoirs géochimiques** ont été invoqués :
- - Un **réservoir superficiel ouvert** comprenant le milieu biologique actif qui recycle la silice dissoute et qui est seulement alimenté par un **apport fluviatile (200 M.t/an)** restreint et par un flux de retour par upwelling du réservoir profond.
- - Un **réservoir profond ouvert** est sensiblement équivalent du précédent. Il peut être alimenté par une **production hydrothermale** (encore mal quantifiée) et par la dissolution la plus profonde. La **production sédimentaire** qui échappe à ce réservoir est très faible et estimée à **200 M.t/an**

LES ROCHES SILICEUSES

Radiolarites*, cherts*,... des anciens fonds
océaniques....

4-Radiolarites et sédimentation profonde



- Étroitement associées à leur substratum basaltique les radiolarites constituent des matériaux omniprésents **de la base des couvertures sédimentaires ophiolitiques mésogéennes.**
- Les **restes fossiles de radiolaires sont rares** en raison des multiples événements physico-chimiques, structuraux,.... subis depuis leur sédimentation.
- Le **volcanisme et la libération de silice** libre qui lui serait lié ont longtemps été invoqués pour expliquer la fréquence des radiolarites avec les ophiolites.
- **Les études actuelles sur les rides et les zones des sources hydrothermales montrent qu'il n'existe pas de dépôts équivalents actuels (ou récents).**
- Une **origine totalement biologique et sans rapport direct avec le volcanisme** est le plus souvent envisagée actuellement.

4-Radiolarites et ophiolites téthysiennes



Les hypothèses actuelles pour expliquer l'abondance des radiolarites dans les séries ophiolitiques téthysiennes sont:

- -l'existence d'**upwellings** permettant un foisonnement des radiolaires,
- -et celles de **circulations océaniques favorables** à ces remontées d'eaux froides.
- Remarque :on a vu que les radiolaires sont particulièrement abondantes dans les zones équatoriales actuelles. **L'orientation de l'océan téthysien et son positionnement équatorial** ont peut être été déterminants dans cette prolifération.
- La mise en place de basaltes sur la ride, leur altération et l'existence de sources hydrothermales **sont moins évoqués aujourd'hui.....pour expliquer l'origine des radiolarites....**

4-Formations des « cherts » marins

Les programmes océanographiques DSDP dans les années 70 ont fait avancer la connaissance sur le point des silicifications marines.

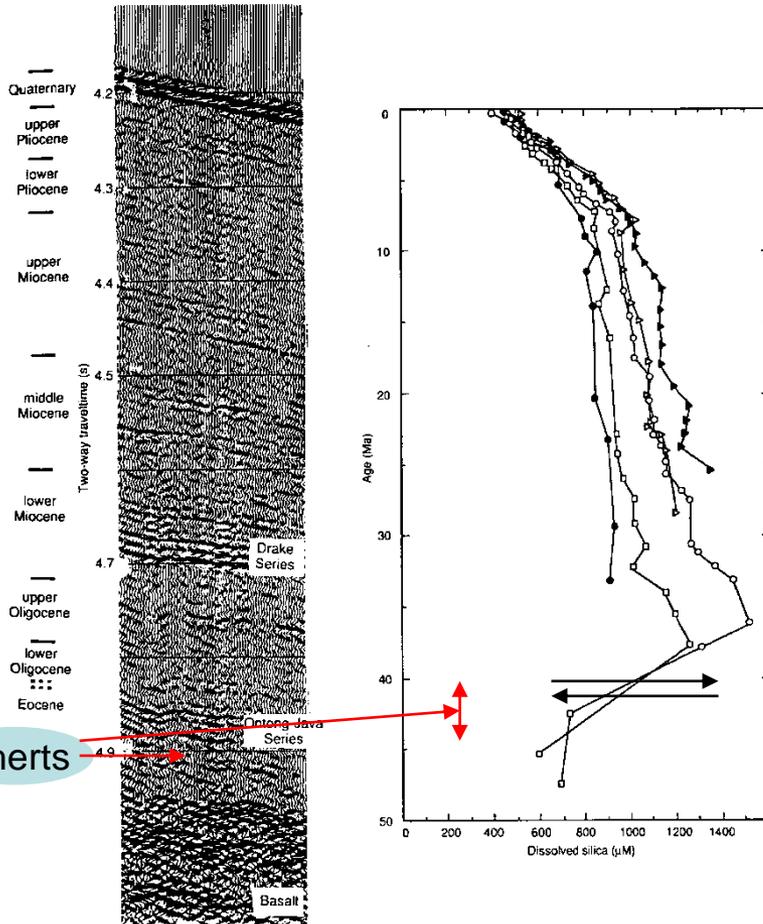
Ces travaux permettent de comprendre en particulier **la formation des porcelanites** et des cherts (termes de la nomenclature américaine) qui sont accidents siliceux stratifiés qui s'apparentent beaucoup aux silex usuels.

Les **études des sondages sous-marins** ont porté sur:

- des **sédiments meubles ou lithifiés** d'épaisseurs variables (100 à 700mètres),
- des formations couvrant tous les étages du quaternaire à l'aptien (110Ma),
- les **eaux prélevées** dans certains sondages et **issues des pores des sédiments** forés au voisinage du fond marin ou sur la totalité des sondages.

Le sondage du **site 805 du Plateau d'Ontong à Java** peut-être pris comme premier exemple.

4- Les cherts éocènes du plateau d'Ontong



Doc.: Proc.O.D.P.Init.Rep., Berger(1991)

Plateau d'Ontong à Java (site 805):
A la base de la série sédimentaire (e=1km) constituée de boues calcaires et de craies apparaissent les premiers cherts lités dans l'éocène (réflecteur acoustique) (~40Ma).

La composition des eaux interstitielles de la pile sédimentaire montrent un accroissement progressif des teneurs en silice dissoute. Ces teneurs s'effondrent au niveau des silicifications litées probablement en réponse à la précipitation de la silice.

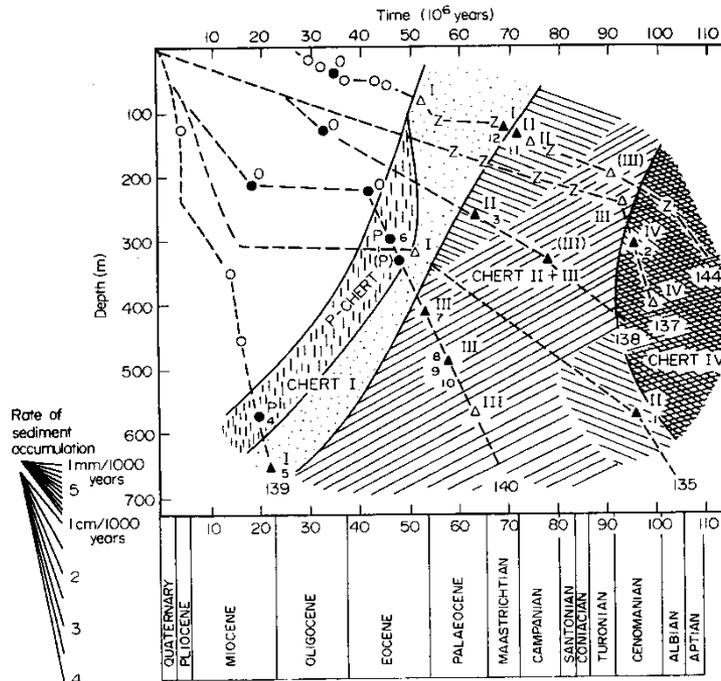
La zone des fluides déprimés sus-jacents s'observe sur une épaisseur équivalente à 10Ma (couvrant l'oligocène).

4- Evolution diagenétique des porcelanites

Cas des porcelanites Atlantiques

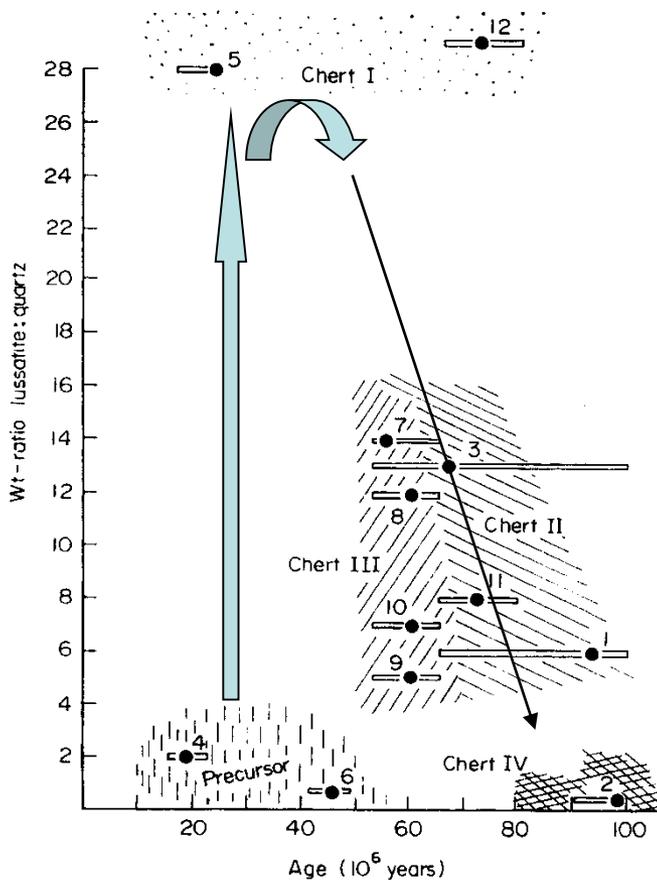
Petrography and diagenesis of Atlantic cherts

335



- Ulrich Von Rad et *al.* (1974) montrent que dans les formations modernes **les cherts et les porcelanites sont totalement absents de 0 à 15 Ma (miocène)**. Les premières roches siliceuses apparaissent pour le site 139 qui présente **une très forte vitesse de sédimentation (de l'ordre de 4cm/1000ans)**
- Dans les autres sondages **elles apparaissent à l'éocène**, voire plus tard à des profondeurs plus faibles. 4 types minéralogiques distincts ont été définis dans le champ P/t.
- Avant la lithification définitive, les sédiments sont à **l'état de boues à fossiles siliceux** intacts (opale A) et zéolites.
- Du miocène inférieur au Crétacé supérieur on assiste à **l'amorce de la lithification** avec des matériaux semi-consolidés (ou semi-boueux) (**stade précurseur du type I**) .
- Silex de Type II et de Type III (à palygorskite)
- Type IV **Silex mature** à fossiles « oblitérés » à **quartz seul (sans lussatite)**.

4- Dualité opale CT-quartz



- Ce diagramme montre l'évolution diagenétique et minéralogique (rapport des 2 phases siliceuses présentes soit: lussatite opale CT/quartz) avec l'âge des sédiments.
- Les sédiments précurseurs sont riches en quartz et en opale A (non prise en compte ici).
- Le début de la lithification est caractérisé par la richesse en lussatite (opale CT) (chert I).
- L'évolution (chert II & III) se fait avec le développement du quartz au détriment de l'opale CT.
- Le stade mature est atteint avec la disparition de l'opale CT au bénéfice du quartz.

4- Evolution minéralogique des porcelanites (~ silex marins?)

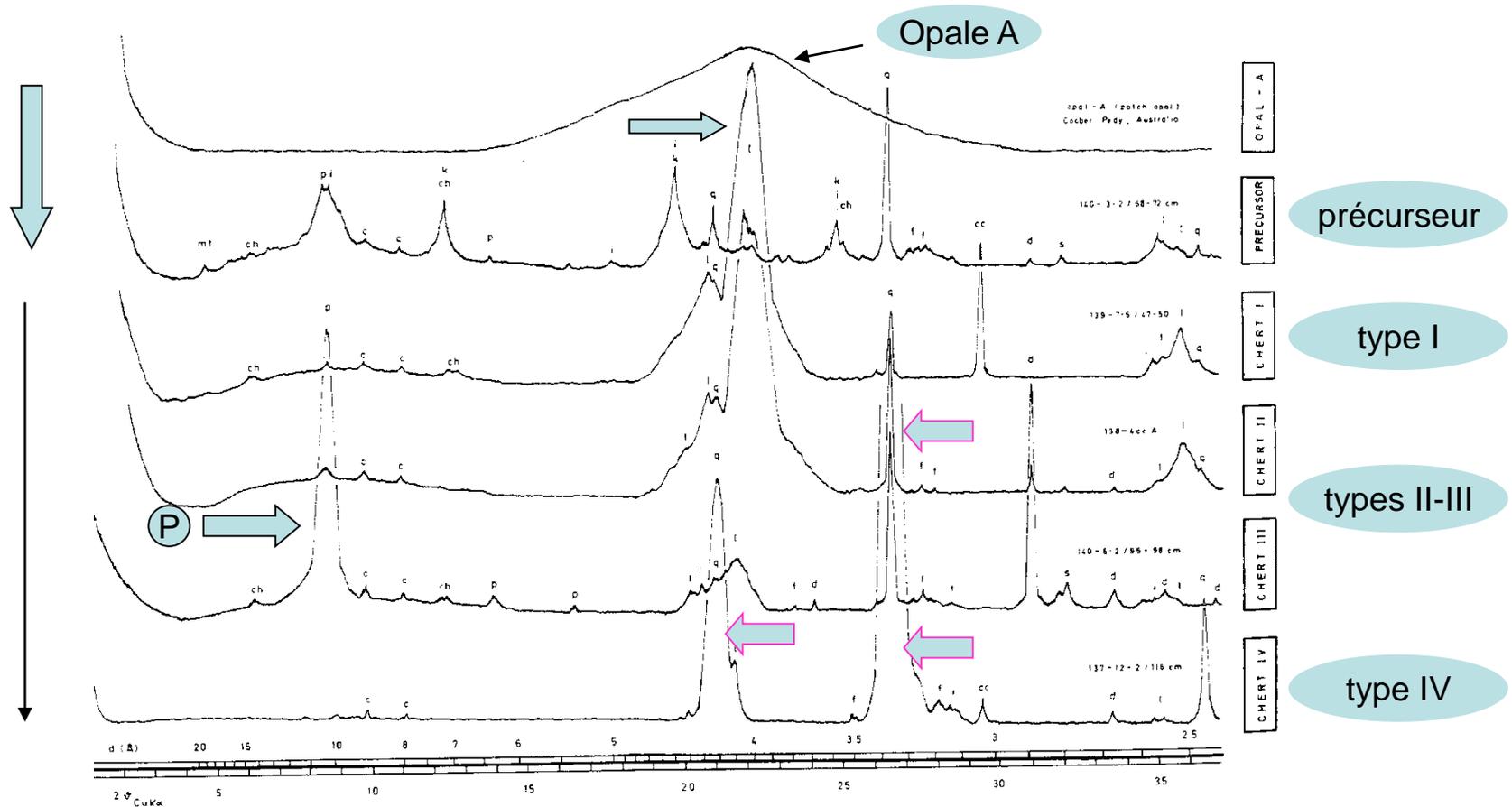


Fig. 5. Diffractometer traces of characteristic samples from the diagenetic series opal-A to chert IV. Pure opal-A (patch opal) by courtesy of Professor Flörke, Bochum. 'Precursor' = precursor stage of porcelanites (see Figs 4, 6). l, Lussatite; q, quartz; p, palygorskite; f, feldspar; d, dolomite; c, clinoptilolite; s, siderite; cc, calcite; mt, montmorillonite; k, kaolinite; ch, chlorite; i, illite (-mica).

P : palygorskite (attapulgitite) : argile magnésienne à eau zéolitique

4- Une origine possible des silex marins? Les données et leurs conséquences....

- Pour la genèse des porcelanites les points précédents sont importants :
- Certains silex que l'on observe à l'affleurement ont pu être issus à la suite d'une **longue évolution diagénétique** dans **un milieu meuble riche en eau**.
- L'évolution minéralogique qui a fait suite à la sédimentation a conduit à **une dégradation de l'opale amorphe héritée des organismes siliceux fossiles**.
- L'évolution minéralogique qui s'amorce ensuite au début de la consolidation des sédiments montre **l'apparition de l'opale CT (lussatite)** puis **son remplacement progressif par le quartz**.
- L'état minéralogique final comporte comme phase siliceuse **le quartz** : ce minéral (et les espèces assimilées à ce minéral) **est le produit ultime de cette « dégénérescence » minérale**.
- Les silex marins que l'on observe à l'affleurement se rapportent pour une grande majorité à ce dernier type dont la **paragénèse est dominée par le quartz**.

Origines variées de la silice des silex :

Cas des:

Jaspéroïdes* hydrothermaux,

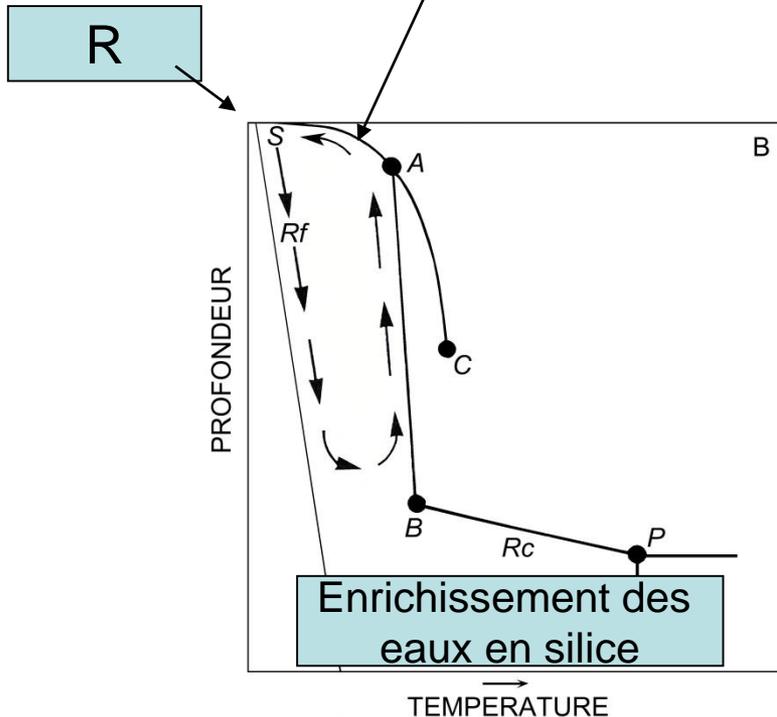
Sinters* siliceux et

Silex* marins

Silex et silcrètes*

5-Hydrothermalisme : rappel

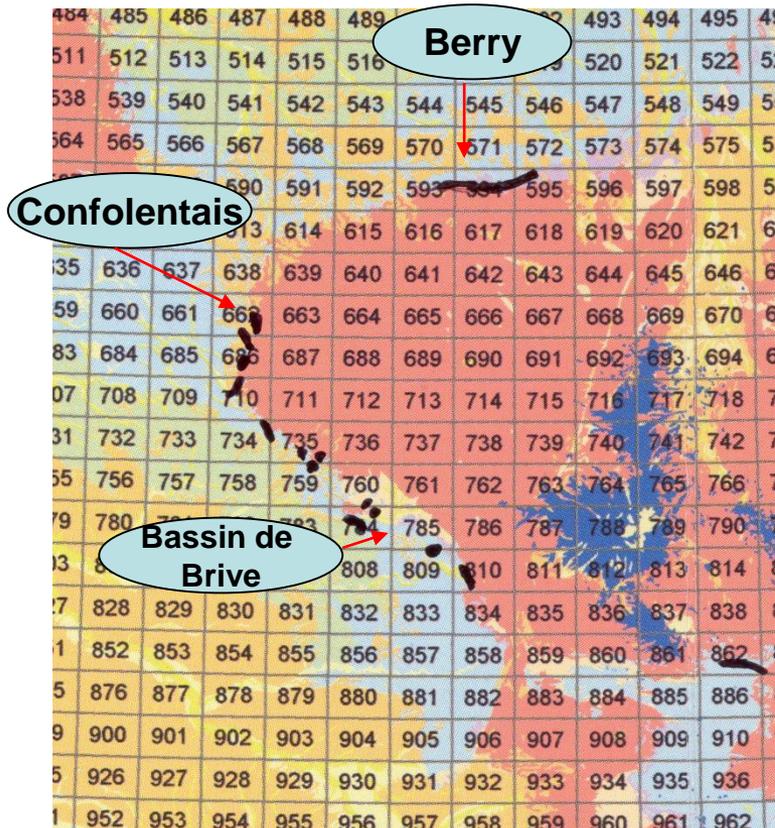
Décharge siliceuse



Définition: L'hydrothermalisme résulte de l'infiltration et de la circulation d'eau dans la croûte terrestre. A la faveur de cette incursion plus ou moins profonde les propriétés physico-chimiques de l'eau changent (état, température, pH, composition,...).

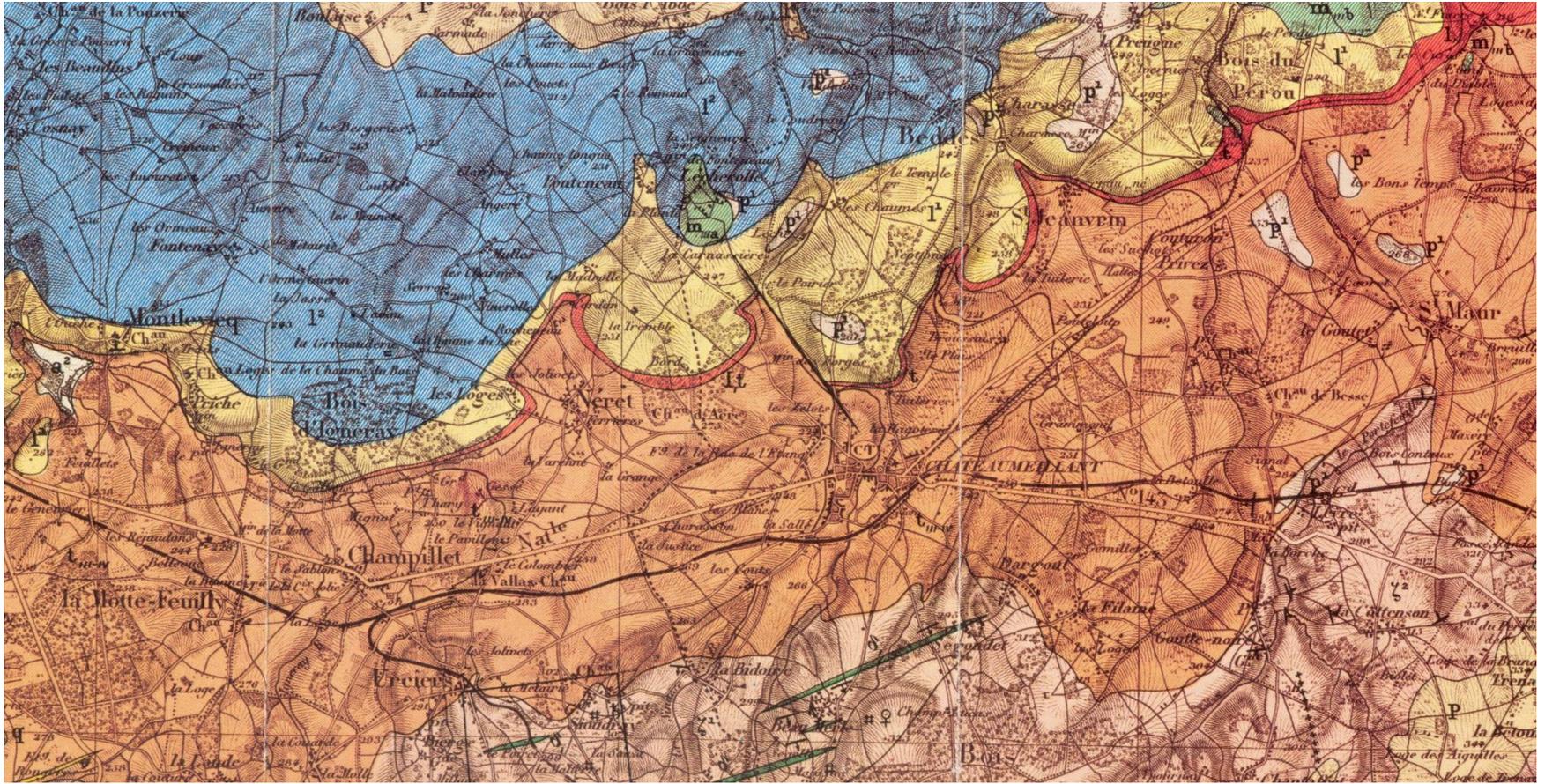
La percolation de roches riches en silice (granites, gneiss, grès,...) contribue à un enrichissement notable en silice des fluides. Cette silice peut précipiter dans des domaines superficiels de la croûte sous la forme de filons de quartz ou participer au remplacement de roches solubles (calcaires,...). Les jaspéroïdes sont issus de processus conjugués de dissolution-précipitation.

5-Silex de l'infralias

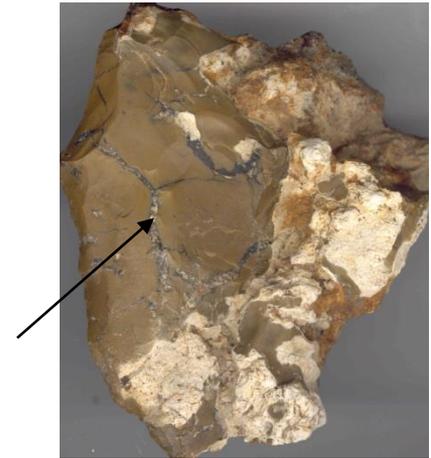


- Les **formations de la base du Lias (Hettangien & Sinémurien)** des bordures du Massif Central offrent de nombreux gisements de silicifications rapportées à des **jaspes ou des jaspéroïdes***.
- Les formations affectées par la silicification sont représentées par **des faciès de transgression** représentés par des grès et des argiles de milieux lagunaires, des dolomies,... et des calcaires bioclastiques de **bordure de plateforme**.
- Les gisements surmontent systématiquement **des formations détritiques** (grès et argilites du trias et/ou du permien). Régionalement le même horizon à silex témoignent d'un hydrothermalisme de bassin (Chaillac).

5-L'infralias du Berry

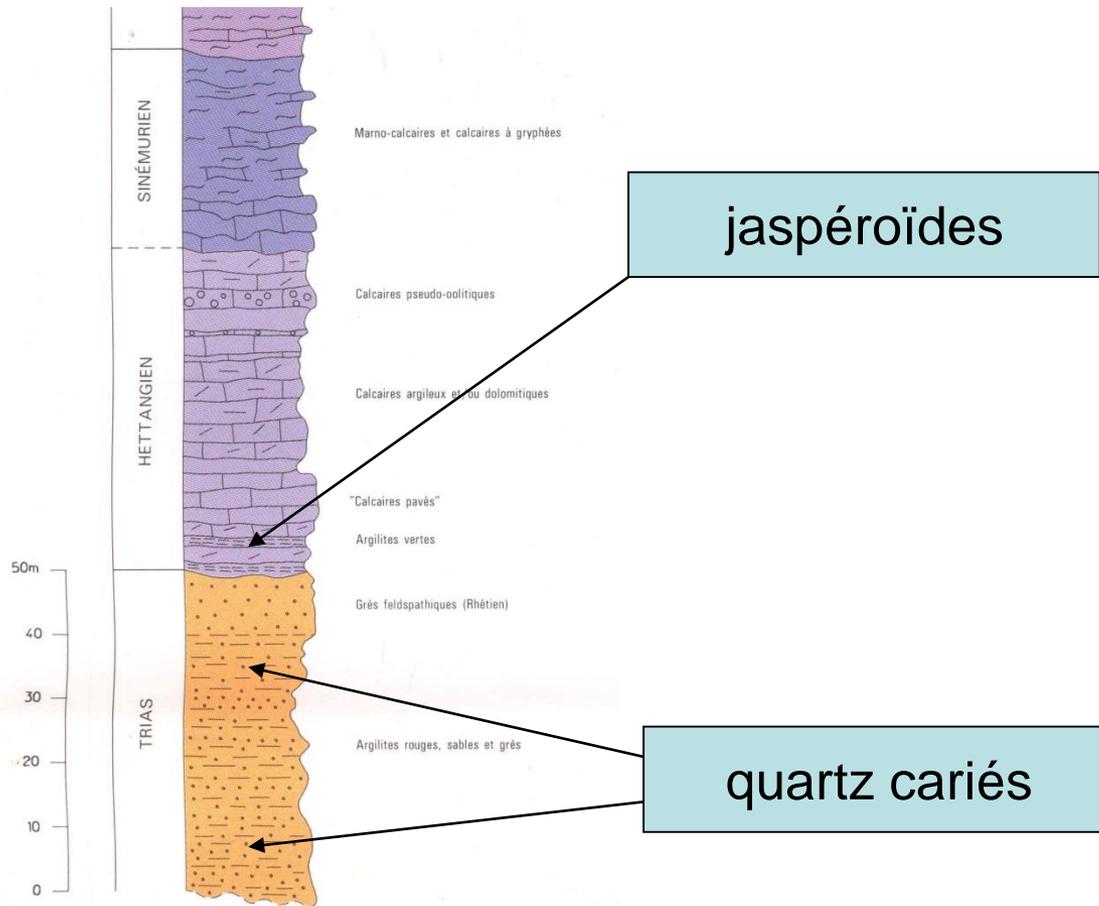


5-Silex de l'Hettangien du BP



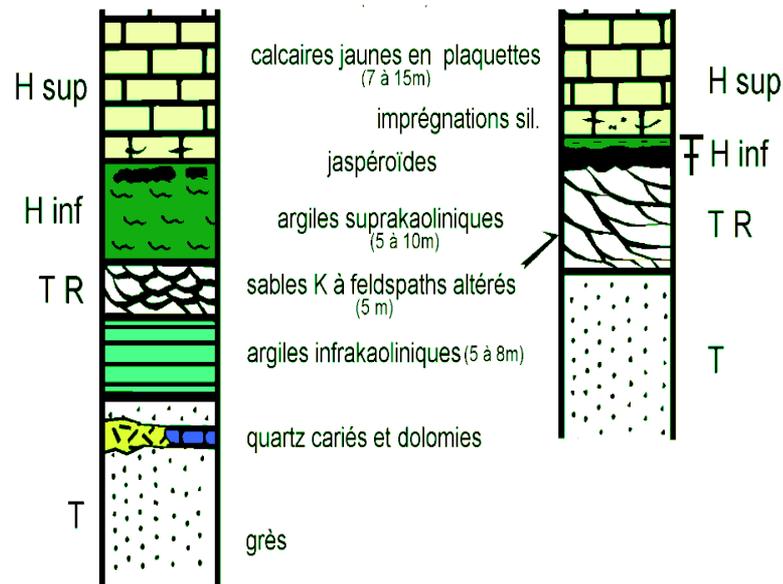
Horizon siliceux hettangien à jaspéroïdes de la région du Chatelet (18)

5-Jaspéroïdes de l'Hettangien



• Les **silex de l'Hettangien (H)** de l'Indre et du Cher s'étendent sur plus de 20km à la base du Lias.

5- Contrôles stratigraphiques & lithologiques



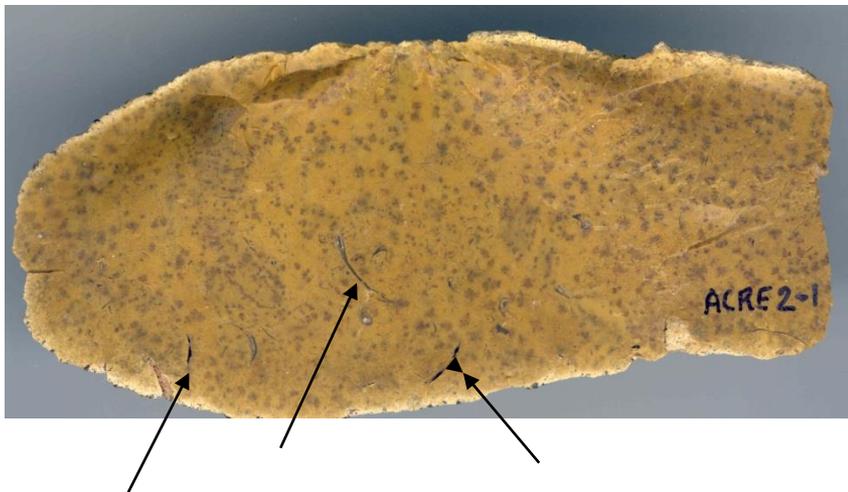
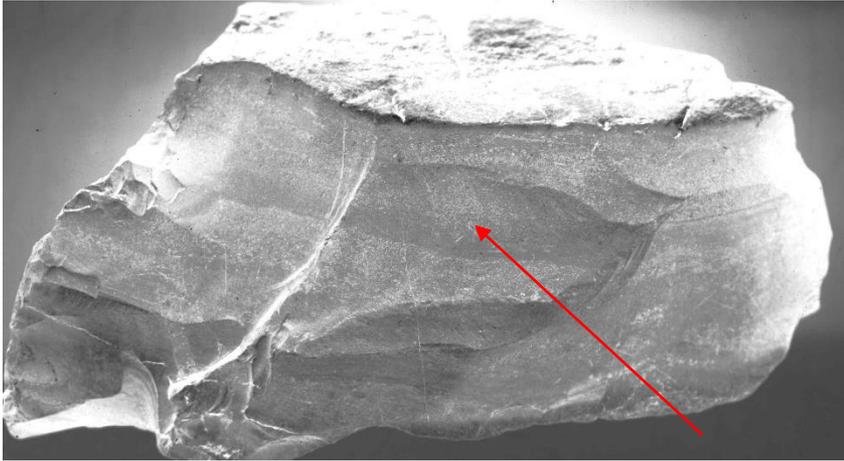
Dans le détail à l'ouest (près de La Châtre), les **jaspéroïdes** s'inscrivent dans formations argileuses où ils remplacent de minces horizons dolomitiques (Courel, thèse).

Les argiles imperméables canalisent les fluides minéralisants lors de la décharge siliceuse

Le dépôt siliceux de l'Hettangien s'accompagne d'une disparition des dolomies. (Il en est de même pour certains Qc du trias qui se développent à partir des dolomies C. Fraisse, C. & J. Lorentz, A. Prost, 1987)

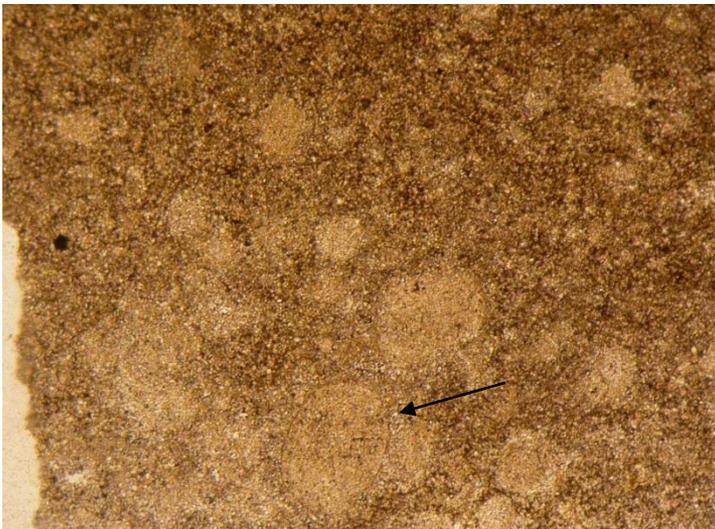
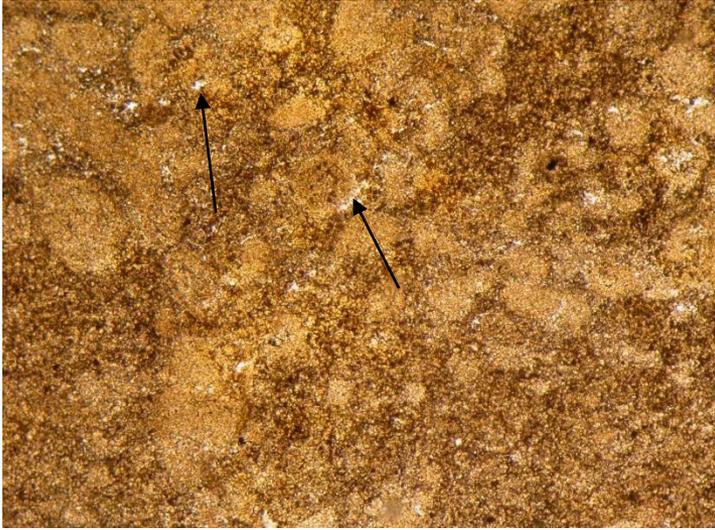
logs: d'après Courel (1970, 1973) & GR

5-Silex de l'Hettangien



- Les silex de l'Hettangien sont de structures, textures et couleurs variées.
- Les **faciès lités** héritent leurs structures des anciens sédiments bioclastiques rubano-lités (silex noir).
- Les **rognons** offrent souvent des **textures très fines** à caractère "micritique".
- Des **fossiles calcitiques** (ici des lamellibranches) sont présents dans certains niveaux où **ils ont échappé à la silicification** de la matrice fine calcaro-dolomitique originelle.
- **Jaspéroïdes** de St Jeanvrin (18) et d'Acre près de Néret (36).

5-Silex épigénétiques de l'Hettangien



- L'analyse micrographique révèle des textures très variées.
- Les plus fréquentes dérivent d'anciens sédiments **bioclastiques, voire oolithiques**. La silice est **cryptocristalline**.
- La matrice des clastes est pigmentée par une **imprégnation ferrugineuse** soutenue. Les **clastes et les oolites** anciennement carbonatés **échappent partiellement à cette pigmentation**. (Il s'agit d'éléments peu favorables à la **diffusion du fer** contrairement à l'ancienne matrice microcristalline plus favorable aux échanges avec les fluides siliceux).
- La matrice montre localement **en bordure des clastes des quartz incolores** qui attestent l'existence d'une **phase de remobilisation tardive** avec **dissolution partielle au niveau du joint intergranulaire et recolmatage des vides** par une nouvelle génération de quartz (non pigmentés).
- **Jaspéroïdes** du Bois du Pérou près de St Jeanvrin (18)

5-Silex de l'Hettangien



Les **zones de décharges hydrothermales** ont été observées au niveau d'anciennes failles. Les silex sont **brèchiques** et riches en cavités. Dans ces zones ils sont **noirs ou bruns et riches** en dépôts à **Fe-Mn** et quartz tardifs.

Une **origine épigénétique** a avancée par Séronie-Vivien et coll. (1987).

Jaspéroïdes: St Jeanvrin(18).

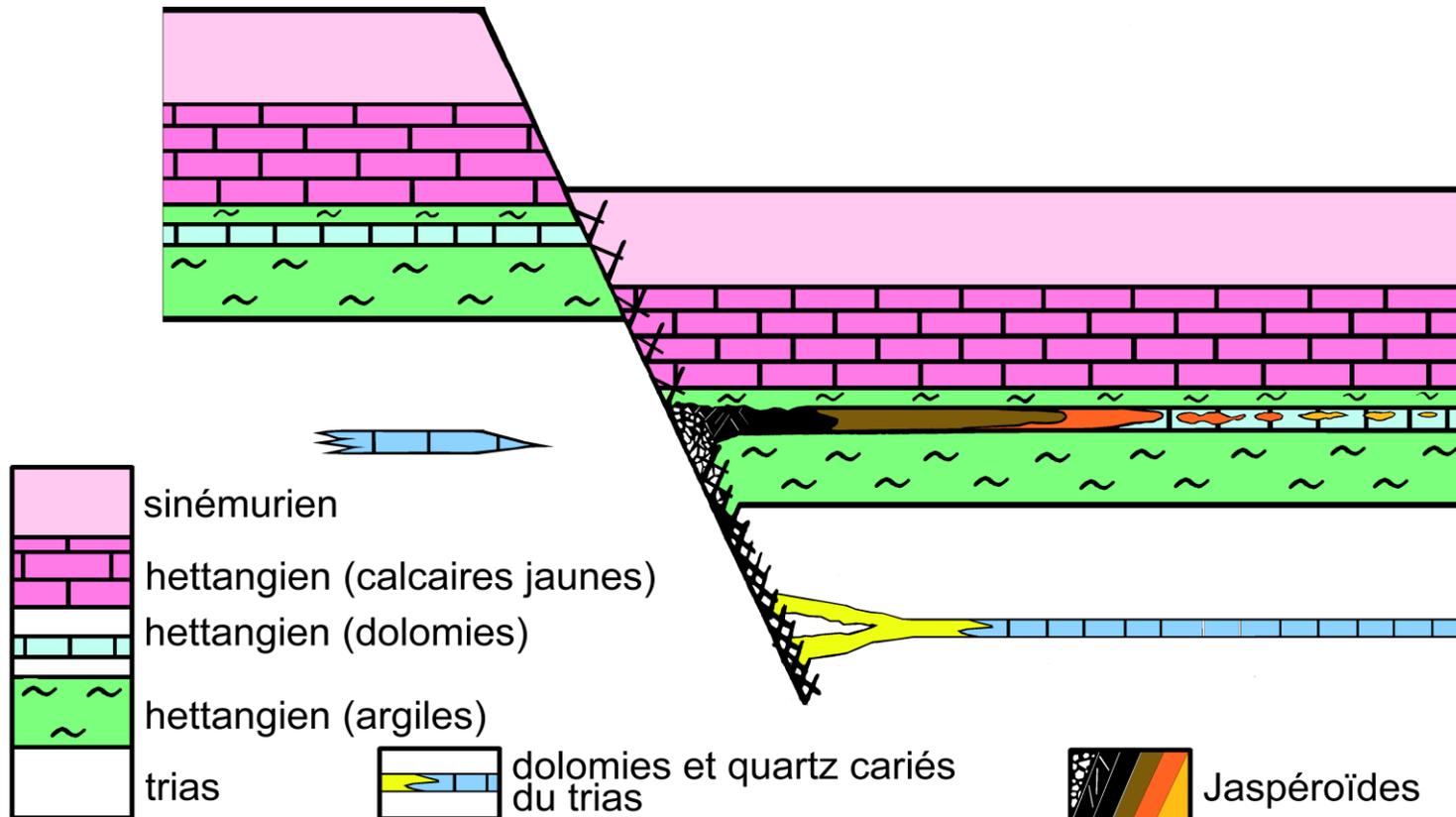
5-Teintes des silex



Les teintes primaires des jaspéroïdes de l'Hettangien varient beaucoup, du noir (*cf. préc.*), au marron sombre, au kaki, à l'orangé et au jaune. Sur le terrain la couleur primaire paraît dépendre de l'éloignement de la zone bréchique (de décharge).
(«*chromatographie*»)

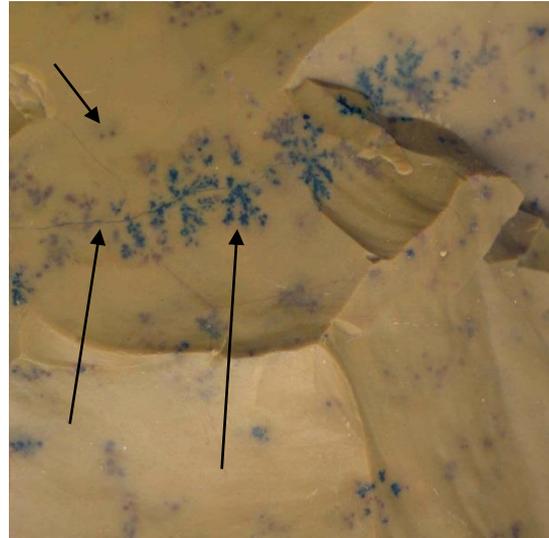
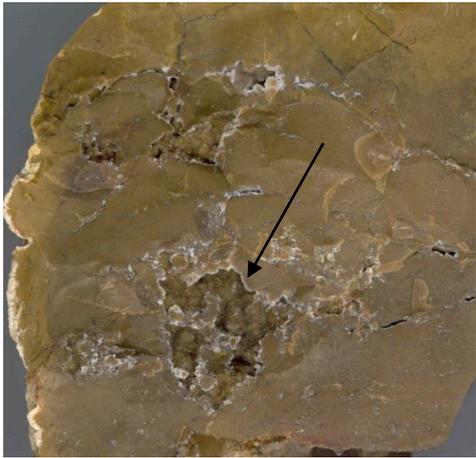
Nucleii du paléolithique supérieur

5-Contrôle tectonique



- Les **jaspéroïdes bréchiques** noirs s'adossent dans le plan des **failles**. Celles-ci sont liées à la tectonique d'extension liasique qui réactivent d'anciennes **fractures du socle** sous jacent (situé dessous à moins de 50m). Le canevas des failles d'alimentation s'accorde avec les **directions varisques locales** (N50 & N160). La décharge des fluides s'accomplit au voisinage du fond marin principalement dans les dolomies. (Les épisodes de silicification des dolomies et des dépôts de base sont peut être contemporains?).

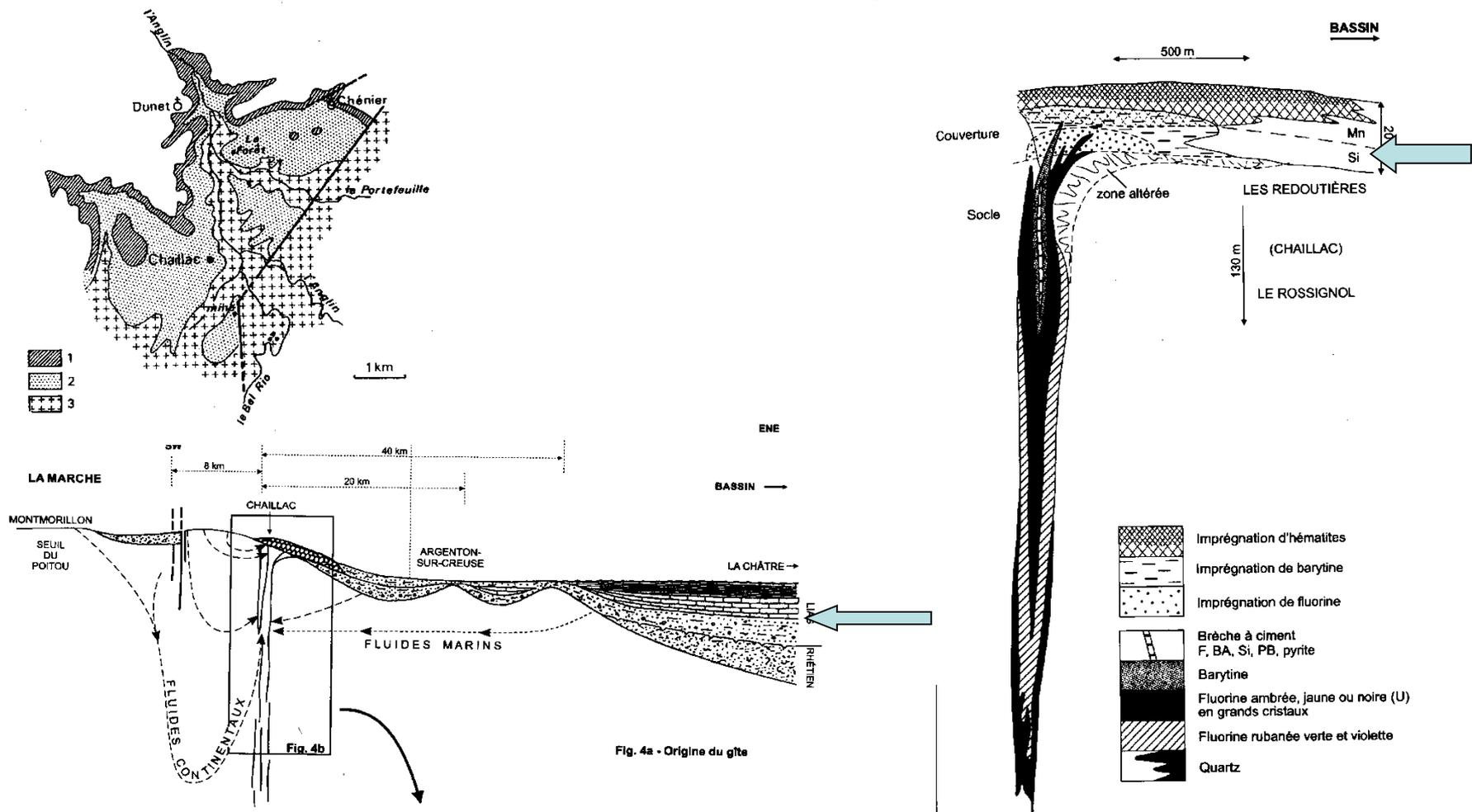
5-Silex épigénétiques



- Loin des zones de décharge des fluides hydrothermaux les silex de l'Hettangien offrent quelques **cavités tapissées** par des mégaquartz (et parfois colmatées par des carbonates).
- De **fines veinules** liées à des mécanismes d'extension témoignent de **processus de silicification tardifs**.
- Etroitement associées aux veinules des **dendrites ferro-manganésifères** et des sphérules de même nature contribuent à une pigmentation tardive des matériaux.
- (Tardivement les ponctuations à Fe-Mn ont été partiellement dissoutes; elles ont perdu leur pigmentation).
- **Jaspéroïdes** de la Région de Néret (36)



5-Jasperoïdes et hydrothermalisme de bordure de bassin : une relation probable



• Le substratum et la série infraliasique sont le siège de fréquentes

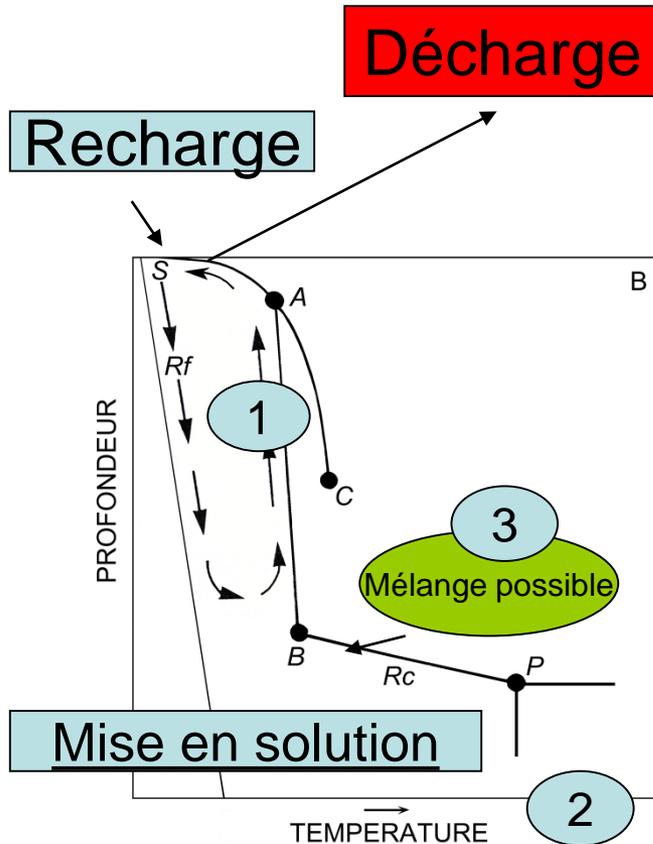
minéralisations hydrothermales BPGC à fluorine, barytine,.. dont celles de Chaillac (36)

6-Origine hydrothermale de certains matériaux siliceux.....autres que les jaspéroïdes

Les **sinters** siliceux actuels de Yellowstone
(EU)

Les **sinters siliceux permians** de Meillers
(03)

6-Hydrothermalisme (suite)



Principe: Certains matériaux siliceux correspondent à des **dépôts de sources**. Ces matériaux – aux dépôts comparables à ceux des travertins- se forment à la surface à la sortie de sources d'eaux chaudes riches en silice (Zone de décharge). Plusieurs origines pour l'eau peuvent être invoquées. Elle peut provenir d'une **recharge superficielle** par la trajectoire Rf, se réchauffer en profondeur à quelques km selon le gradient géothermique normal et remonter **quasi-adiabaticquement** jusqu'en A où le fluide rencontre la courbe d'ébullition CS avant d'arriver à la surface (**cas 1**).

Le fluide peut suivre une seconde trajectoire en partant d'un pluton P (eau magmatique) en suivant un **refroidissement conductif** (Rc) (**cas 2**) et en évoluant à partir de B selon la même trajectoire, **à la suite ou non d'un mélange** avec le fluide précédent (**cas 3**).

Ainsi la **charge siliceuse** de l'eau est acquise grâce à la température par la mise en solution de SiO_2 soit à la faveur d'une incursion profonde, soit directement à partir d'un pluton (?).

6-Définition des sinters siliceux

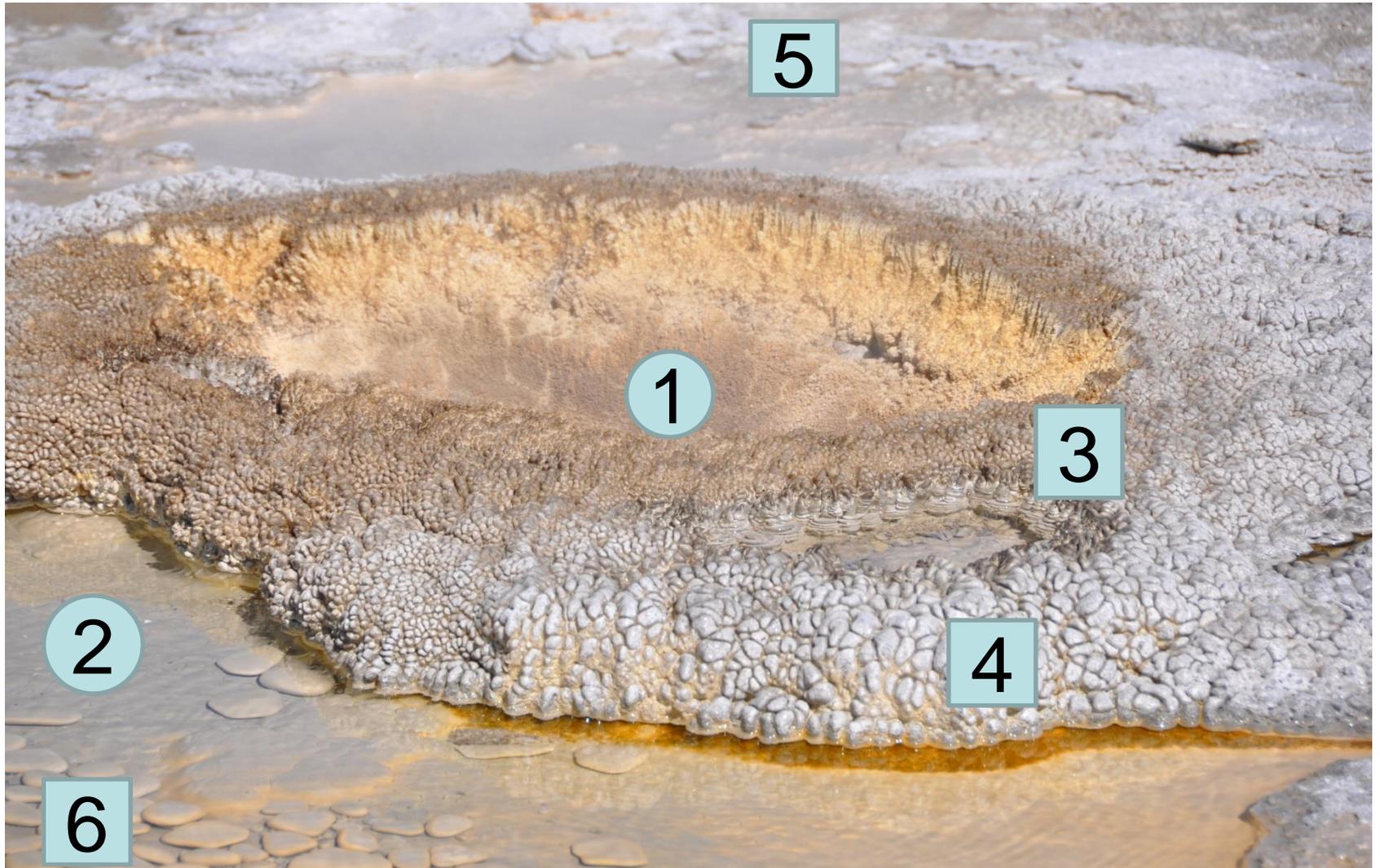
- Ainsi, les **sinters** siliceux sont des matériaux issus de la **précipitation de la silice à la faveur d'une décharge hydrothermale (source) en milieu continental**: soit à la surface, soit en milieu lacustre ou même dans une rivière.
- Ces dépôts sont fréquents dans certaines **zones volcaniques riches en systèmes hydrothermaux** (ex: cas de la zone Taupo en Nouvelle Zélande, **Islande**, **Parc de Yellowstone**,...). Les **geysérites** déposées à partir des eaux chaudes des geysers appartiennent aux **sinters siliceux**.
- Ces matériaux sont **riches en opale** et parfois à carbonates. Ils sont généralement **concrétionnés et poreux**, souvent incrustants. Leur milieu de dépôt est le siège d'une très forte activité biologique déterminant de fines structures filamenteuses algales (mattes et biofilms) épigénisées par l'opale (ex: **cyanobactéries**)

6-Geysers et sinters siliceux



- Les dépôts siliceux hydrothermaux de surface sont liés souvent à des **décharges superficielles intermittentes** ou non (geysers et sources chaudes en **paysage volcanique** et situées le plus souvent en **fond de vallée**).
- Ici un dépôt de sinters liés à des sources chaudes et des geysers
- Yellowstone: Sapphire Pool (post crise sismique de 1969)

6-Dépôts proximaux d'un événement



6-Dépôts des pentes fortes



Les sources chaudes sont plus rarement installées sur flancs de vallées.

Sur les pentes fortes l'écoulement des eaux se fait selon une succession de petites cascades et de vasques.

Ces vasques s'organisent par paliers en terrasses successives.

Les sinters se déposent au fond des **vasques** et sur leurs bords en formant des murs siliceux.

La **précipitation directe de la silice et l'activité algale et bactérienne** contrôlent les dépôts.

Yellowstone: porte nord: Mammoth

6-Dépôts Siliceux



Les dépôts sont variés selon la distance à la source:

- proximale : on reconnaît les dépôts des événements,
- les stratifications plates alternant avec des interstrates détritiques sont plus lointaines de l'événement
- certains dépôts témoignent de constructions biologiques



6-Sinters Siliceux et organismes thermophiles

- Une très forte activité biologique assiste et permet le dépôt des sinters (biosilicification). Les organismes sont des archaea ($T < 93^{\circ}\text{C}$), des cyanobactéries ($T < 73^{\circ}\text{C}$) et des algues ($T < 60^{\circ}\text{C}$).

Ici en 1: **matte verte** de *Synechococcus* (pH: 7 à 9 et $74 < T^{\circ}\text{C} < 52$) au fond et **biofilm jaune-orangé** de *Phormidium* (pH: 8.6 et $57 < T^{\circ}\text{C} < 36$) des eaux de surface.

Les eaux d'écoulement présentent d'autres espèces.



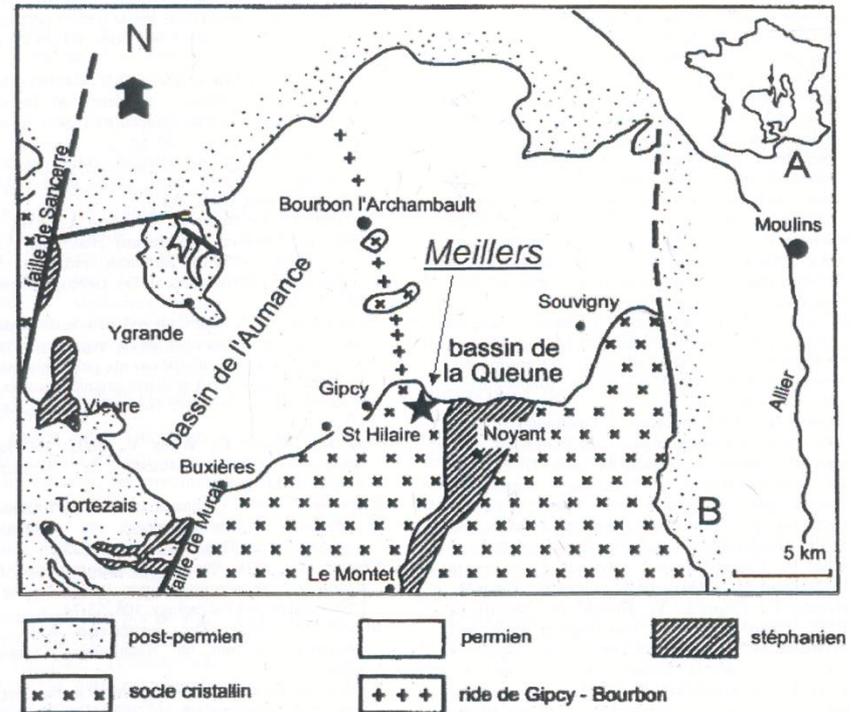
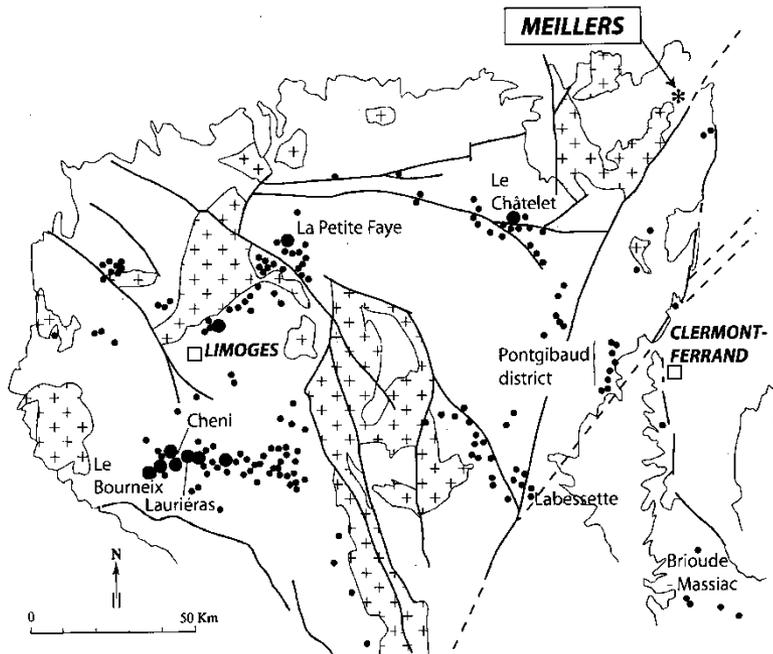
1



2

1-source
chaude
2-chenal
d'écoulement
Site de Norris
Yellowstone

6-Meillers & ses sinters



Meillers est situé au cœur du Bourbonnais à proximité du sillon houiller en bordure du bassin permien de l'Aumance. Ce bassin s'est établi à la **faveur d'une phase de distension majeure liée au fonctionnement tardif stéphanopermien du sillon houiller**. L'Autunien basal a fourni de la houille (une dizaine de Mt) et des schistes bitumineux (1.3Mt) depuis 1850. L'exploitation est arrêtée depuis quelques années.

6-Position stratigraphique

- Les sinters de Meillers sont rapportés à l'**Autunien** (295 à 275(Ma) d'après leur position stratigraphique et les éléments palynologiques qu'elles contiennent. Elles sont rapportées plus précisément à l'**Autunien inférieur** (Autunien gris: puissance:400m). Cette formation comprend surtout des formations gréseuses fluvio-torrentielles à lacustres comportant quelques strates mineures de calcaires dolomitiques (faisceau dolomitique) à sa partie supérieure.
- Les **sinters** (ou **silicites**) de Meillers sont insérées dans les grès de l'Autunien qui, à leur contact, sont très fortement silicifiés. Ces grès reposent en concordance sur l'horizon de sinters brèchiques, Au contact sur 1 à 2 mètres les brèches sont à clastes de silicites blanches litées ou rubanées identiques à la masse principale des sinters.

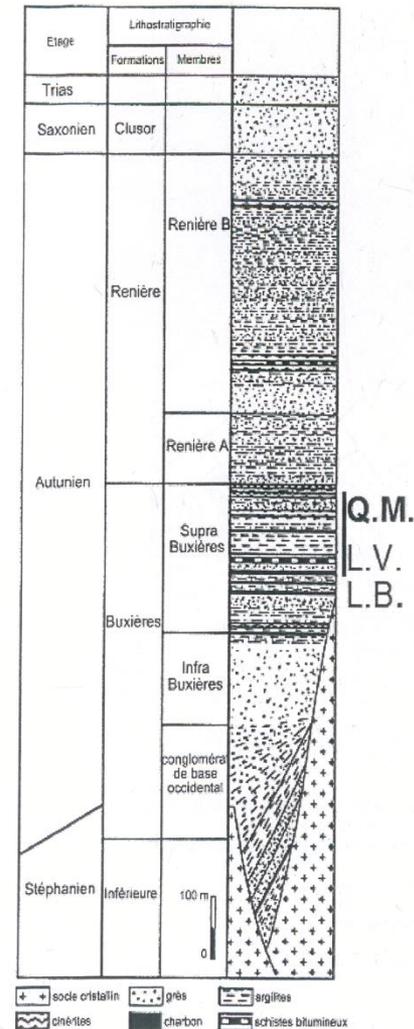


Figure 2. Coupe stratigraphique du bassin de Bourbon-l'Archambault (d'après Debriette, 1992b). LB = cinérite « lien blanc » ; LV = cinérite « lien vert » ; QM = quartzites de Meillers.

6-Carrière et matériaux



sommet

Sinters à
calcédoine
rubanée, laiteuse
en bancs massifs
souvent alvéolés
(10 à 15 m?)



Sinters gris en bancs
massifs, à lamines
d'argilite
blanche, pyrite,...(15
à 25 m?)



base

Les sinters les plus siliceux ($\text{SiO}_2 > 99\%$) sont exploités pour l'électrométallurgie (production de silicocalcium et de ferrosilicium pour Péchiney)

6-Pétrographie

- 1-grès silicifié bordier
- 2 & 3-sinters à **calcédonite**
- 4-grès bréchique supérieur à clastes de sinter

1

4

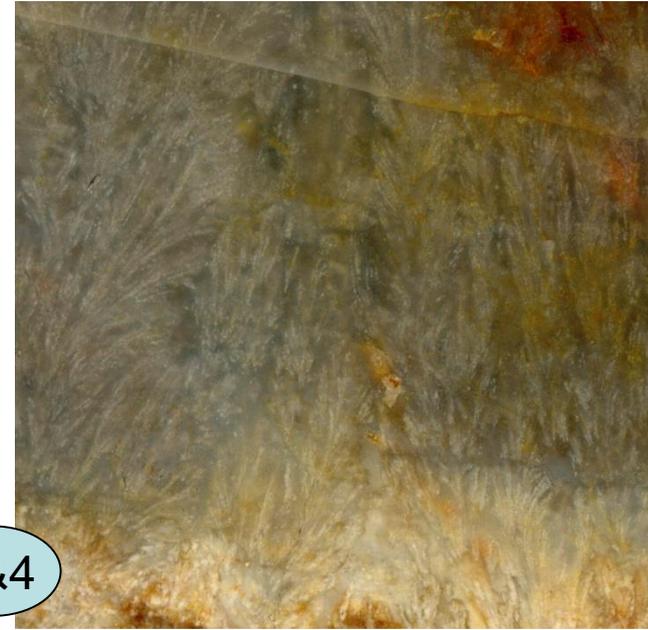
2 & 3





1

6-Héritage hydrothermal



3&4



2

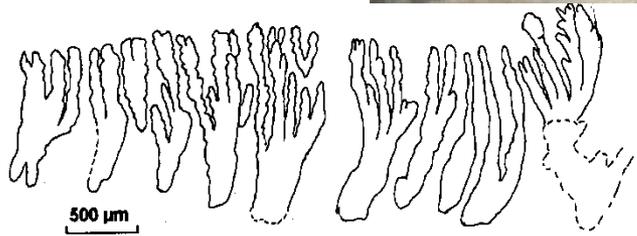
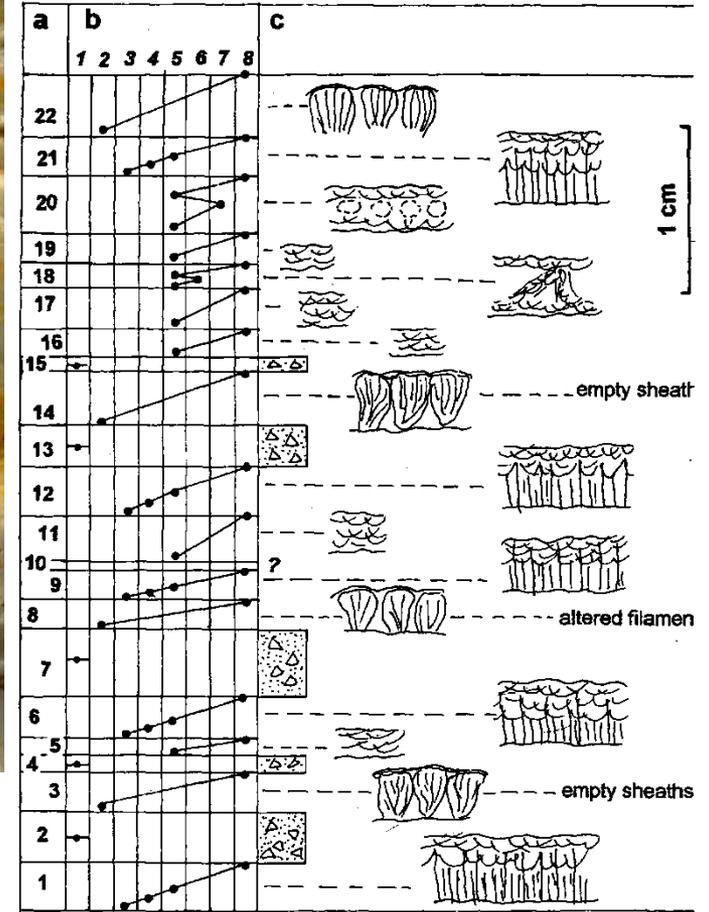
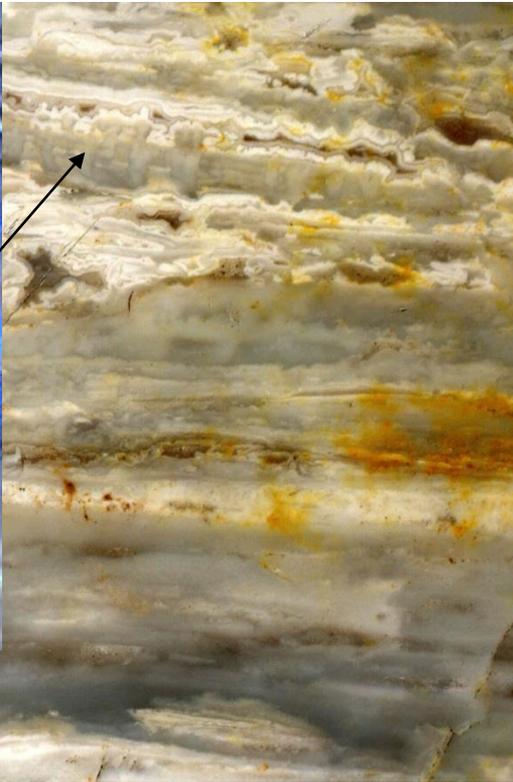
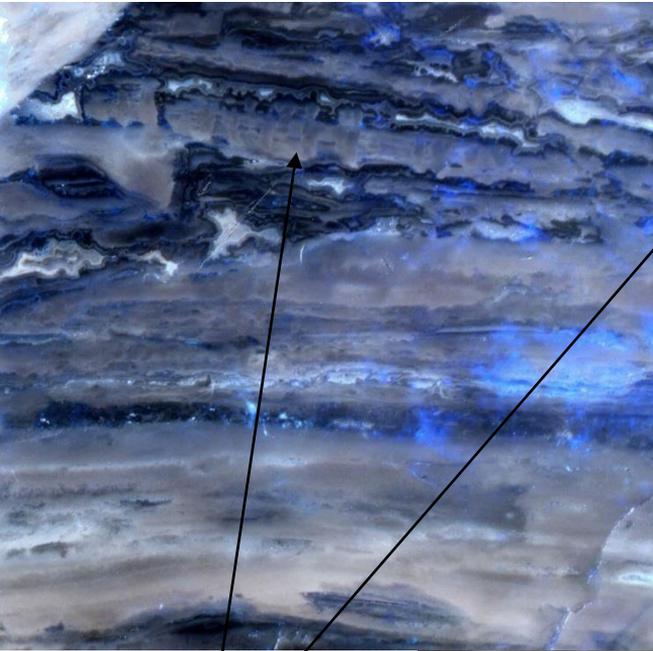
L'origine hydrothermale de la silice des sinters de Meillers est attestée par de fréquents **filons nourriciers** (1), de nombreux **vides** de circulation des fluides aqueux (chauds) (2) et par des **minéraux spécifiques** (sulfures, or, fluorine, barytine,....). Certains sinters offrent des figures de remplacement de la barytine par la silice hydrothermale (**épigénie siliceuse**) (3 & 4)

6-Stromatolites de sources chaudes



- Les sinters de Meillers contiennent quelques **résidus de matière organique** (photo 1) et d'organismes (débris de végétaux, graines, spores,....) et surtout une **abondante flore algale** fossile représentée par **des colonies stromatolitiques** omniprésentes dans les matériaux (photo 2). Ces organismes (**cyano-bactéries**) déterminent les **microlamines** horizontales, les **structures encrustantes** à piliers, les remplissages de drains, les **masses oncolitiques**, les **structures en choux-fleurs**,.....

6-Stromatolites (suite)



L'examen détaillé des lamines des sinters montrent la présence de fines structures construites. Certaines tapissent les cavités. Comme pour la barytine hydrothermale précédente, les stromatolites (ici *Hanskerpella pustulata*) sont totalement épigénisés par l'opale, la calcédonite et le quartz.

Source: Freydet et coll., 2000

Figure 8. *Hanskerpella pustulata*, diverse appearances of filaments. Drawings from thin section photographs (Meillers 12, collection P. Freydet) entirely drawn figure 9.



6-Stromatolites (suite)

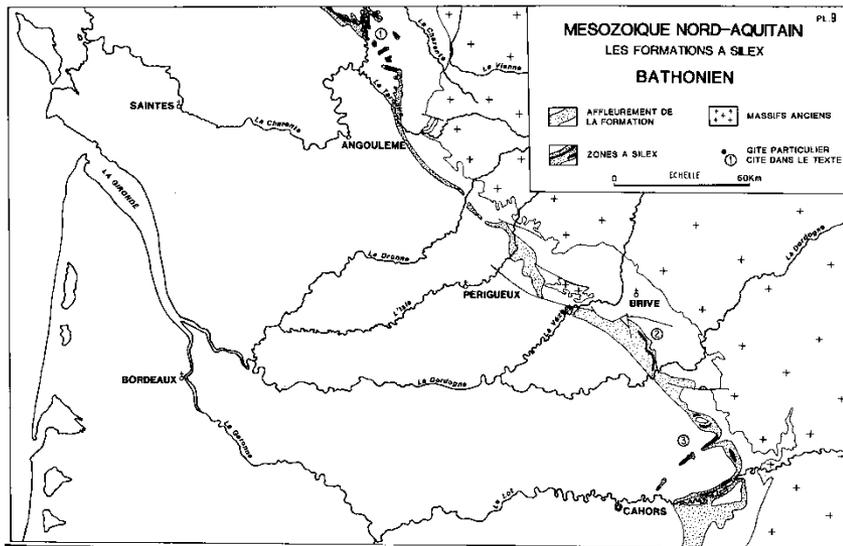


Freytet *et al.* (2000) montrent que les stromatolites de Meillers occupent fréquemment les cavités et les conduits de circulation des eaux chaudes à travers le dépôt siliceux en cours d'accumulation. La cavité offre ici **deux invasions algales séparées par une phase de dissolution partielle des premières constructions** et un dépôt quartzeux final (fluide à 5 à 7 ppm de silice)

Silex des plateformes marines

Cas des silex de l'Aquitaine

7-Répartition des silex du Dogger d'Aquitaine



- Le Jurassique moyen du NE du Bassin d'Aquitaine et de la Charente est marqué par l'installation d'une vaste plateforme carbonatée peu profonde.
- Les silex sont riches en foraminifères benthiques, spicules d'éponges, ... avec des textures micritiques ou à débris non jointifs (wackestone). La présence de clastes témoigne de décharges d'éléments au cours de la sédimentation provenant de milieux de haute énergie (côté externe d'une barrière).
- Ces silex sont généralement à calcédoine fibreuse ou à quartzine. La matrice est souvent recristallisée en quartz.

7-Répartition des silex du Dogger d'Aquitaine

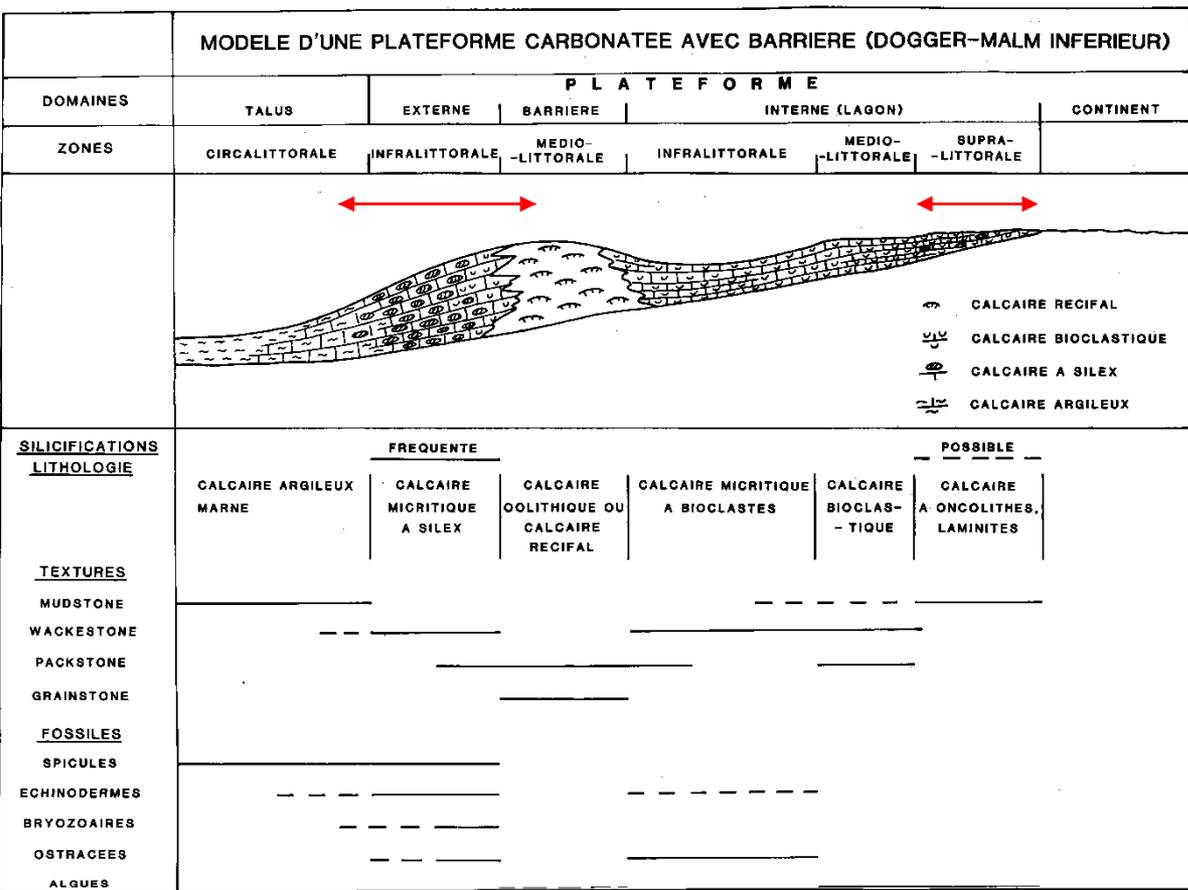
Au sein d'un bassin frangé d'une barrière -ici la bordure du NW de l'Aquitaine- la répartition des silex est limitée:

- au domaine infralittoral,
- au pied externe de la barrière récifale,
- à la bordure plateforme- talus.

Ce "modèle" de répartition selon la bathymétrie est transposable à de nombreux secteurs autour du Massif Central, au Jura,....

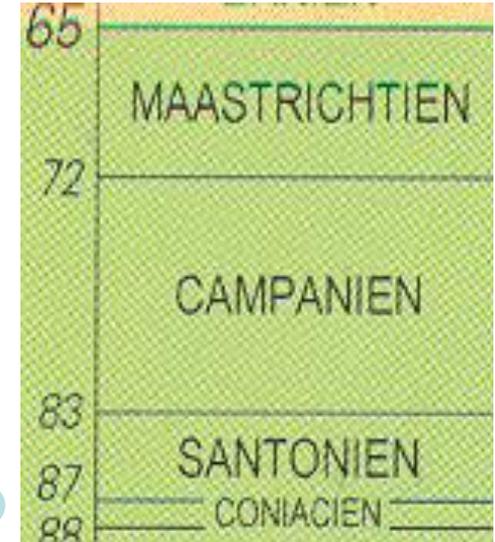
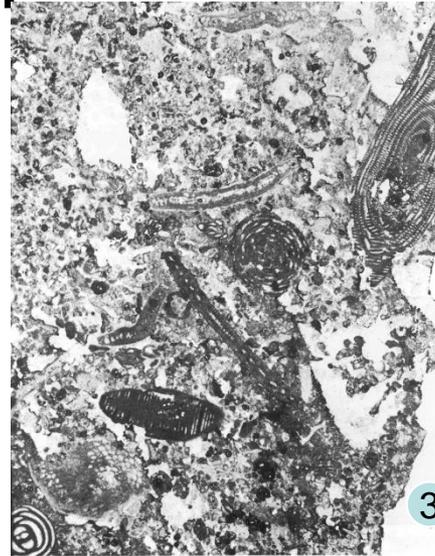
Les silex se rencontrent de l'Aalénien au Callovien dans les calcaires fins, dans les calcaires bioclastiques associés aux pieds des récifs et dans les formations oolithiques.

Notons une présence possible supralittorale de quelques silex.



Doc: M. & M.R. Seronie-Vivien (1987).

7-Répartition des silex du Sénonien d'Aquitaine



1

3

4



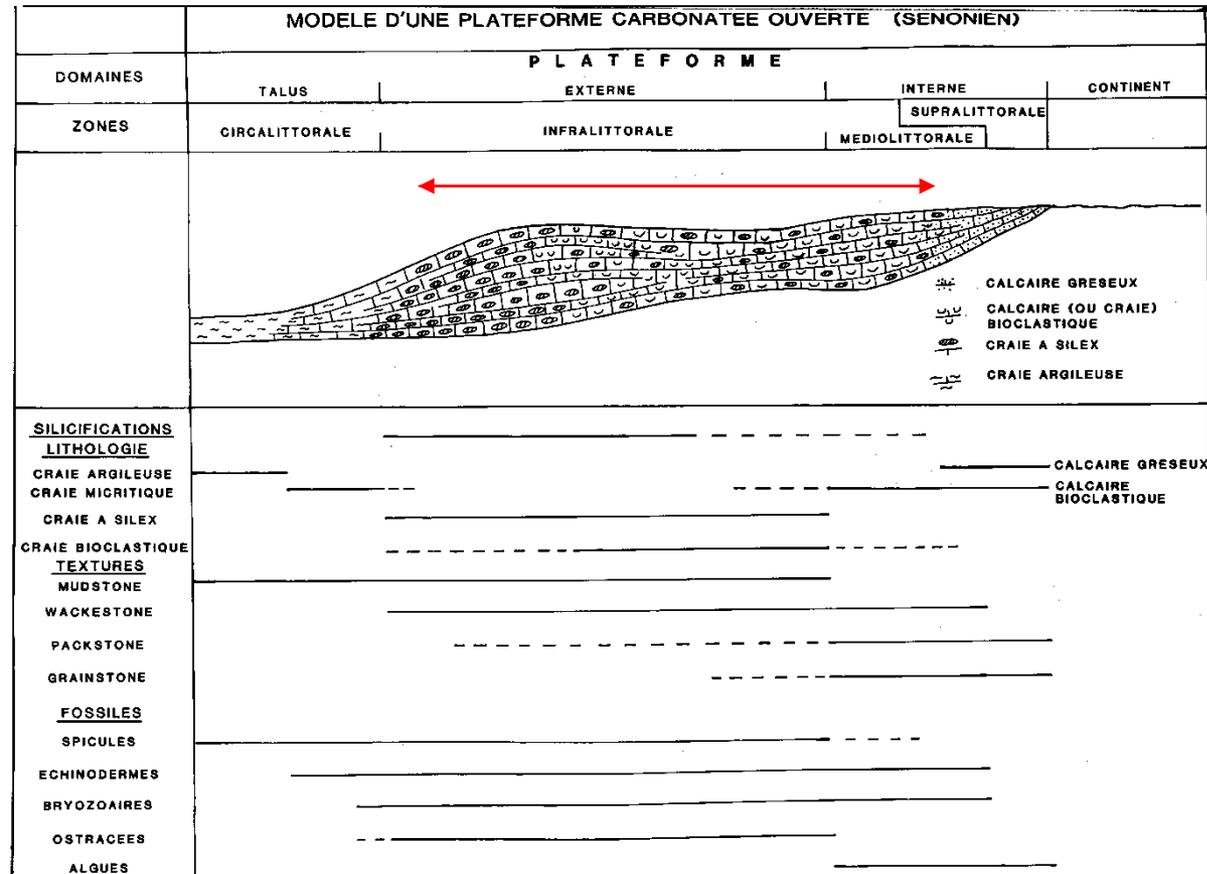
2

Bergeracois

Les **silex du sénonien** du Bassin d'Aquitaine et des Charentes se sont formés à partir de sédiments marins crayeux. Dans le **Bergeracois** ils se rencontrent sous la forme de gros rognons dans des formations résiduelles (craie et argiles de décalcification) sous les formations des sables éocènes.

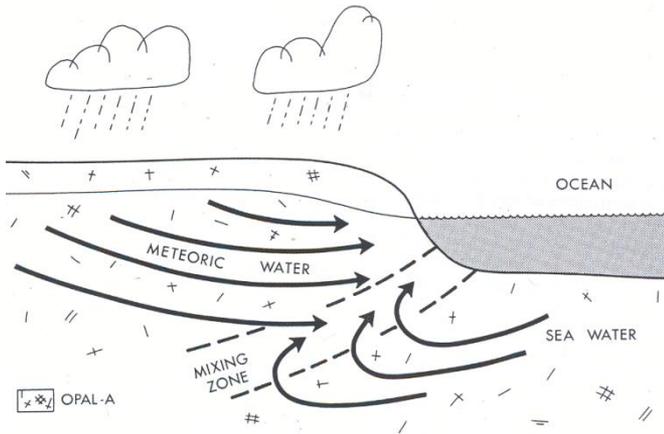
Pour tout le Sénonien le **milieu de sédimentation** correspond à une **plateforme ouverte peu profonde**.

7-Répartition des silex du Sénonien d'Aquitaine



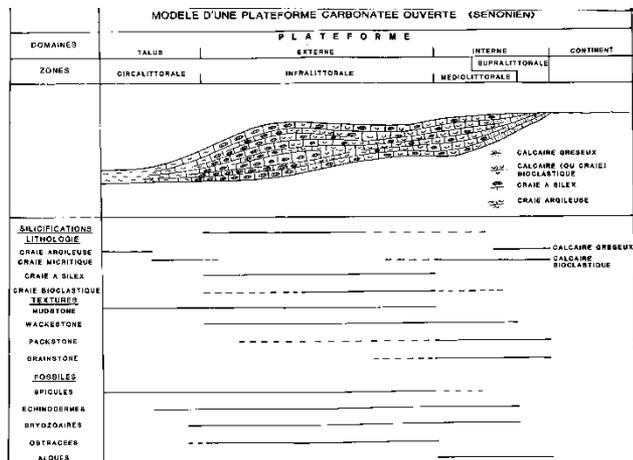
- Pour la plateforme carbonatée ouverte de la **bordure NW du Bassin d' Aquitaine au créacé supérieur** la répartition des silex est limitée :
- À la **zone infralittorale et à la zone médiolittorale**.
- Leur **abondance** dans la craie s'accorde avec la **grande fréquence des spongiaires** (spicules).
- Ils **se raréfient vers le continent** dans la zone médiolittorale et disparaissent dans le domaine des calcaires gréseux.
- Ils sont **absents** dans les anciennes **boues argilo-calcaires circalittorales** du même âge.

7-Silicifications et mélanges d'eaux



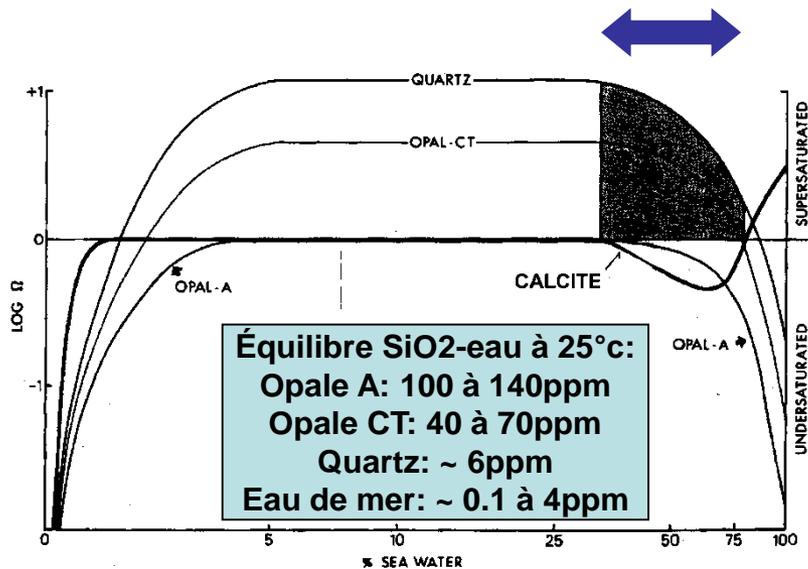
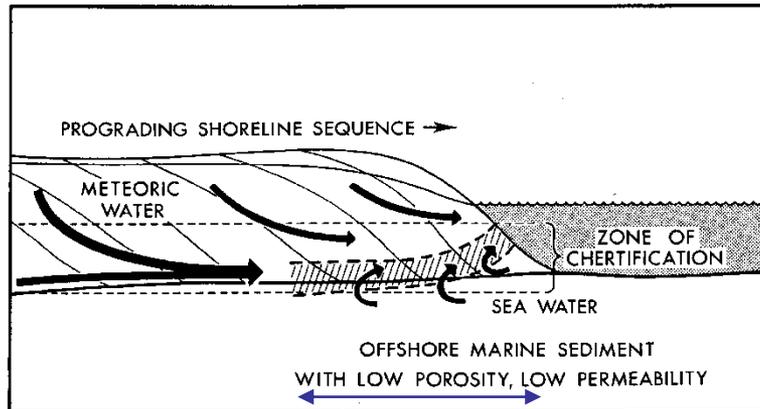
- On sait que sur plusieurs plages des îles du Pacifique où ont lieu des débarquements lors de la fin de la seconde guerre mondiale des bouteilles de soda ont été retrouvées (30ans après) emballées dans des grès totalement lithifiés. **Les mécanismes de cimentation (ici à dominante carbonatée) peuvent être très rapides dans les contextes de mélanges d'eaux.**

- Dans le cas d'une **plateforme carbonatée ouverte** il est possible d'observer des roches silicifiées dans les domaines côtiers (medio voir même supralittoraux).



- Knauth (1979) propose un modèle génétique pour expliquer la présence de **tels silex côtiers**.
- Le modèle implique une formation littorale **poreuse et un peu perméable**. Sa nature est **carbonatée** et elle contient une **fraction siliceuse biogénique** (comparable à celle des sédiments marins). Elle est soumise à **l'infiltration des eaux météoritiques**. A sa base elle présente **un aquifère marin**.

7-Silicifications et mélanges d'eaux

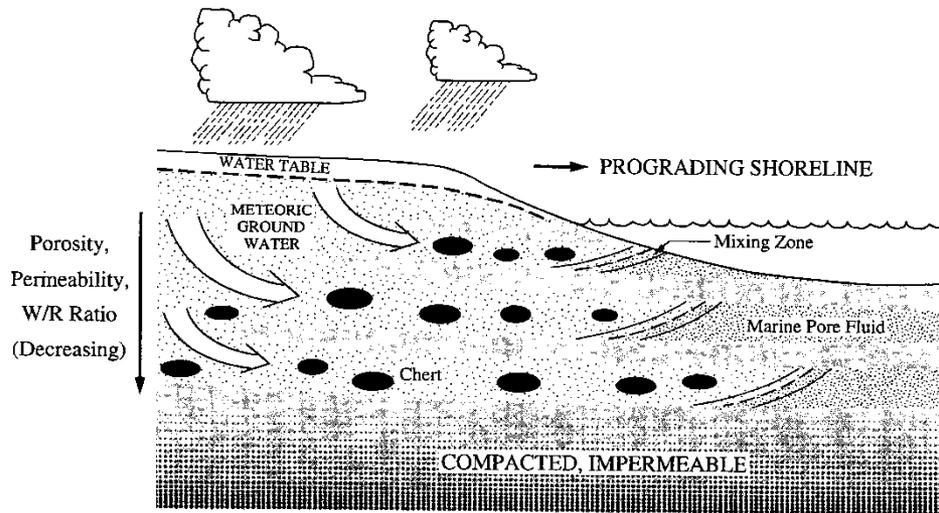


- Le modèle de Hnauth (1979) implique un **mélange des eaux d'infiltration météorique avec l'eau de mer**. Ces eaux **sont saturées en silice** à la suite de la dissolution de l'opale organique. Le milieu est dépourvu de CO₂ (milieu clos).
- Il décrit **les relations de solubilité ou de dépôt du quartz et de la calcite** en fonction des proportions de mélanges.
- Il note la présence d'une **zone de mélange** où la **calcite du sédiment est solubilisée** et où le **quartz précipite** en raison de la forte sursaturation en silice des eaux.
- Ce domaine de mélange où dissolution et précipitation se compensent est favorable à la formation de dépôts siliceux et des silex.
- Ce modèle est transposable à certains cas d'épigénies siliceuses en milieu carbonaté.
- (Ω = rapport de l'activité de l'ion produit à la constante d'équilibre du minéral).

7-Silicifications et mélanges d'eaux

- Depuis son premier travail Knauth a amélioré le modèle génétique des roches silicifiées côtières.

- La présence d'un **substratum argileux compact (particulièrement imperméable)** facilite le contrôle géométrique de **l'aquifère marin**. La profondeur de ce substratum par rapport au niveau marin contrôle également son volume et la zone de mélange.



Les silicifications (cherts) remplacent les débris carbonatés par dissolution en réponse à un mélange de fluides dans une zone sursaturée.

- **L'aquifère d'eau douce** est dépendant de la morphologie du prisme côtier, de sa structure lithologique sédimentaire, de sa superficie,.... **La porosité, la perméabilité et le facteur de lixiviation W/R** (volume d'eau percolant/volume de roche affecté) sont autant de paramètres qui contrôlent le mélange des eaux et le développement des roches silicifiées et des silex.

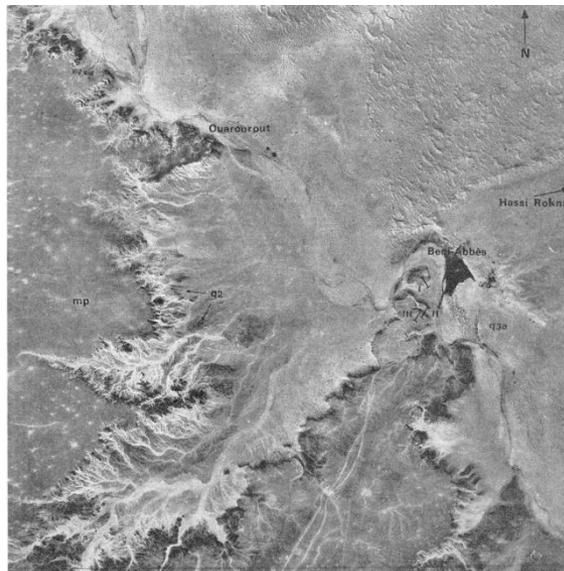
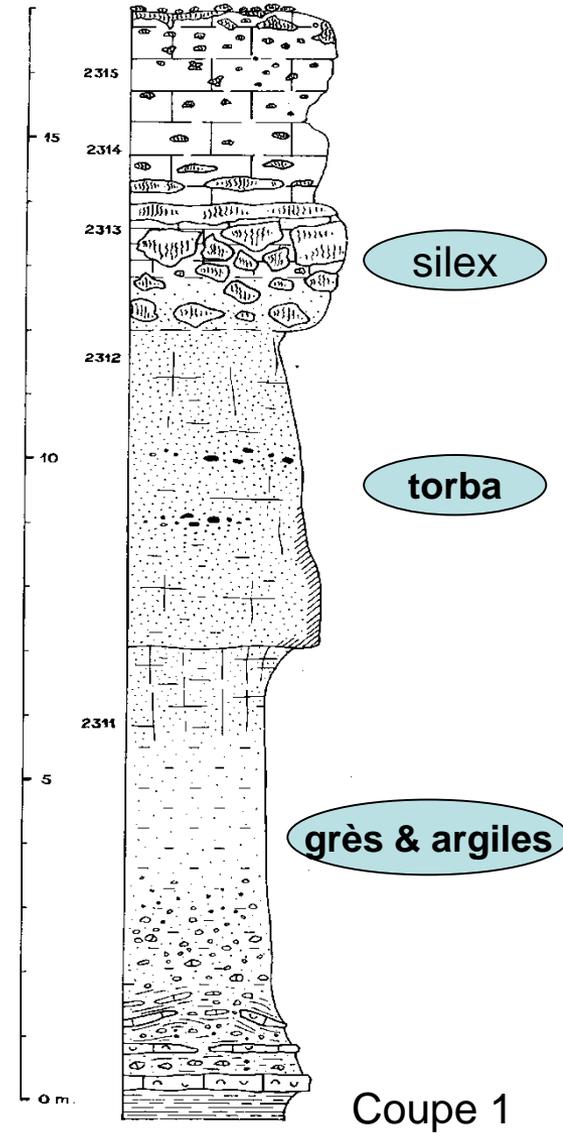
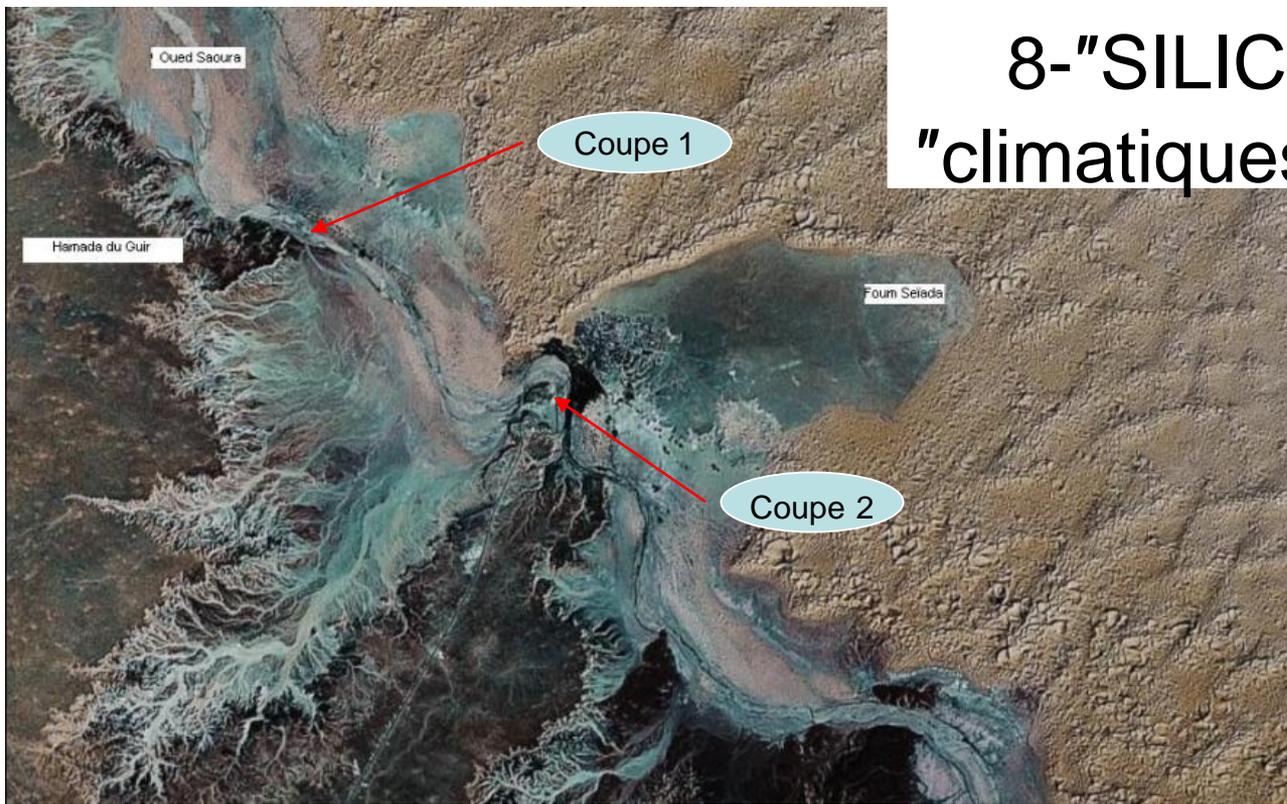
ROCHES SILICEUSES CONTINENTALES

Silcrètes phréatiques

&

Silcrètes pédogenétiques

8-"SILICIFICATIONS" "climatiques" & phréatiques

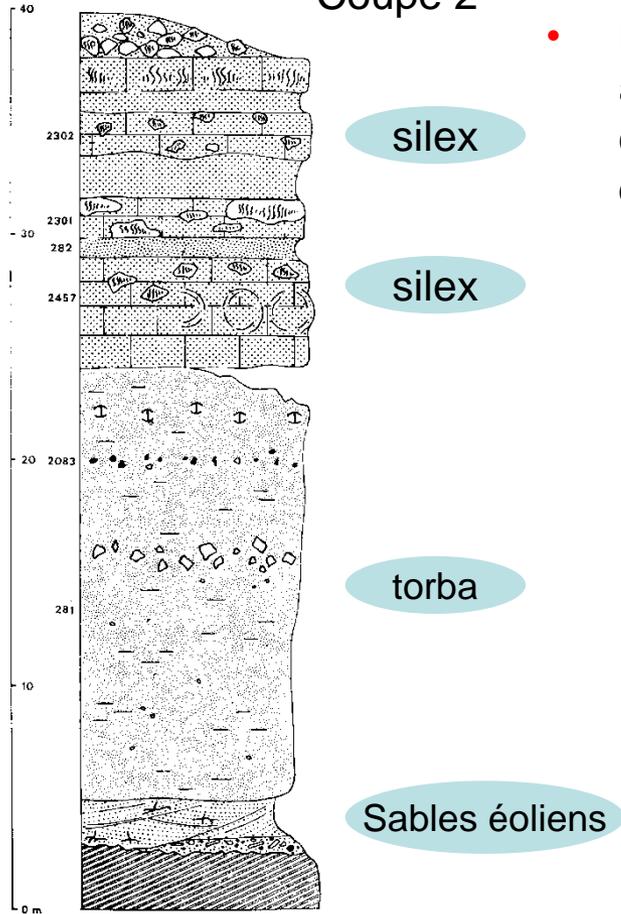


Les travaux de G.Conrad (1969) sont parmi les premiers - avec ceux des Australiens - à porter sur les silicifications continentales en domaine désertique. Il a étudié les "silicifications climatiques" de la Hamada du Guir à proximité de Beni-Abbès (Algérie).

Doc. Google-Earth , G.Conrad (1969)

8-Les "silicifications climatiques" et les silcrètes d'origine phréatique

Coupe 2



- Les silicifications "climatiques" (G. Conrad, 1969) sont localisées à la bordure orientale d'un vaste plateau mio-pliocène continental (Hamada du Guir) dont la stratigraphie comprend de la base au sommet:

- une unité grés-argileuse ou sableuse,
- une unité lacustre argilo-carbonatée (torba)
- une unité carbonatée (ou grés-carbonatée) incluant des silex en nodules ou en bancs à aspect jaspé jaune ou brunâtre.

Les silicifications des deux coupes se manifestent seulement au niveau des zones d'émergence de l'ancienne nappe plio-quadernaire sur le bord de la hamada.

Ces silicifications (ou silcrètes) se rapportent à des faciès à calcédoine et quartz et sont associées à des faciès argilo-calcaires à attapulгите et dolomite.

8-Epigénie siliceuse et roches siliceuses

1

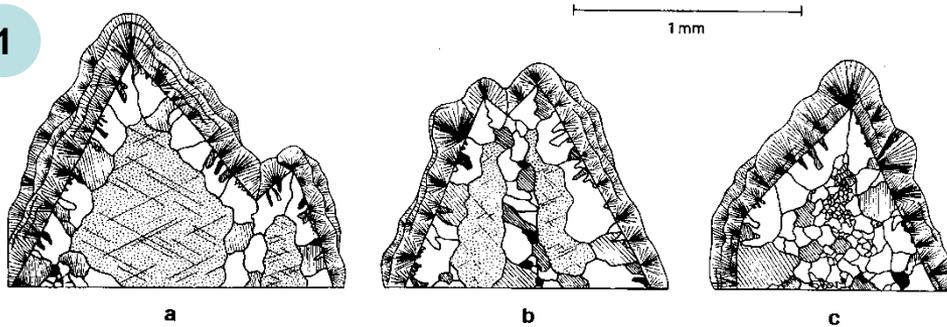


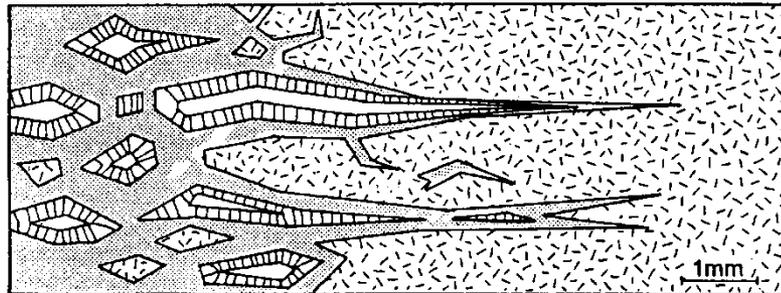
Fig. 45. — Les différents stades de l'épigénie de la calcite par la silice.

a. Deux scalénoédres de calcite présentant un début d'épigénie par la silice ; la partie extérieure des cristaux est remplacée par une couche de quartz granoblastique, doublée à l'extérieur d'une couche de calcédoine fibreuse.

b. Un stade intermédiaire : le quartz d'épigénie est plus abondant et une plage de calcite résiduelle subsiste au centre.

c. Stade final : l'ancien cristal de calcite est entièrement envahi de quartz.

2



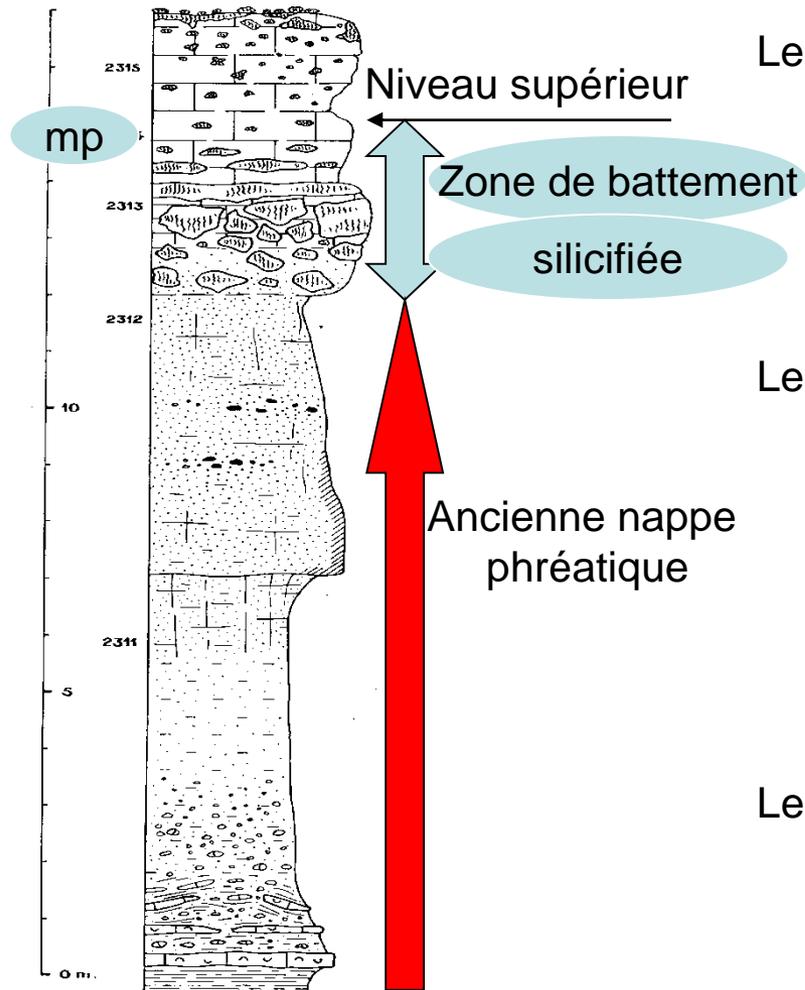
limestone matrix

quartz epigenesis of the matrix

quartz deposits in voids

- Les silex montrent de **fréquents remplacements d'objets** (cristaux, fossiles, clastes,...) initialement carbonatés par une phase siliceuse.
- Ce mécanisme de remplacement (**épigénie**) implique à la fois une **dissolution** et une substitution parfaite des formes originelles.
- Dans les coupes précédentes ce mécanisme est noté dans les zones de vides où alternent des phases de dissolution et de remplacement,....
- Dans les silcrètes du Guir les épigénies sont usuelles. La silice remplace la calcite, la dolomite, le gypse.... Pour ces phases originelles particulièrement solubles les effets du mécanisme sont assez évidents (1). **Par contre le mécanisme est plus difficile à expliquer lorsque les roches remplacées sont cryptocristallines argileuses.**

8-Décharge siliceuse d'origine phréatique



Le processus de silicification postdiagénétique est très fréquent au Sahara au plio-quaternaire où il affecte les calcaires mp. Pour la hamada du Guir il se manifeste seulement à sa bordure **au niveau des émergences de nappes**.

Les **mécanismes de dissolution** s'effectuent au toit de la nappe particulièrement dans sa **zone de battement**. L'abaissement du niveau piézométrique au voisinage des sources et la dessiccation favorisent les dépôts soit des carbonates, du gypse,... soit de la calcédonite et du quartz (selon la saturation de l'eau pour les éléments qui les concernent).

Le **processus est récurrent** et lié aux multiples variations de la nappe phréatique (qui dépend du climat, des saisons et de sa recharge périodique). La durée d'installation de l'horizon siliceux est de l'ordre du Ma.

8-Dépôts continentaux d'origine phréatique

- Les dépôts siliceux liés à un aquifère sont fréquents.

- On les note particulièrement au Sahara et dans les zones arides où, par le passé un climat (plus humide que le climat actuel) a conditionné l'existence de nappes phréatiques actives saturées en silice et permis de tels dépôts.

- Plus près de nous M. Thiry a expliqué la genèse des grès des sables de Fontainebleau par des processus tardifs comparables liés aux variations successives de la nappe phréatique locale. La consolidation siliceuse des sables s'effectue par la précipitation de la silice qui contribue à la cimentation des grains....

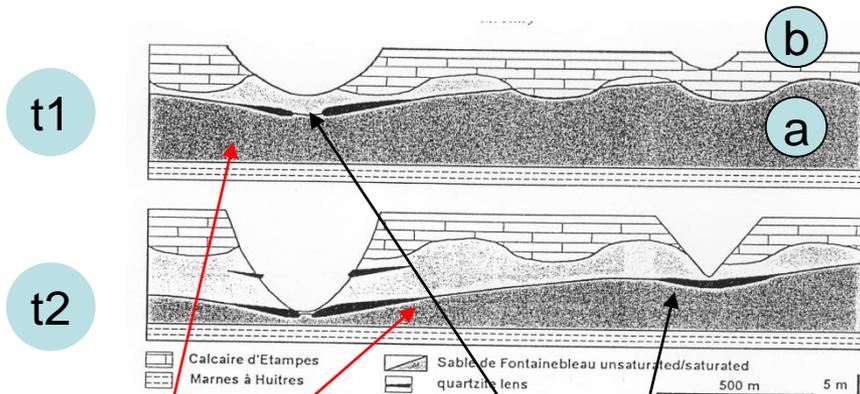


Fig. 21. Schematic model of successive stages of groundwater silcrete formation in the Fontainebleau Sand. Quartzite lenses develop at the water table behind springs near the valley floor. Downcutting of the drainage with accompanying lowering of the water table leads to deeper quartzite levels. Note that quartzite lenses occurring at a certain level in the sand in different valleys are not related to the same episode of silicification.

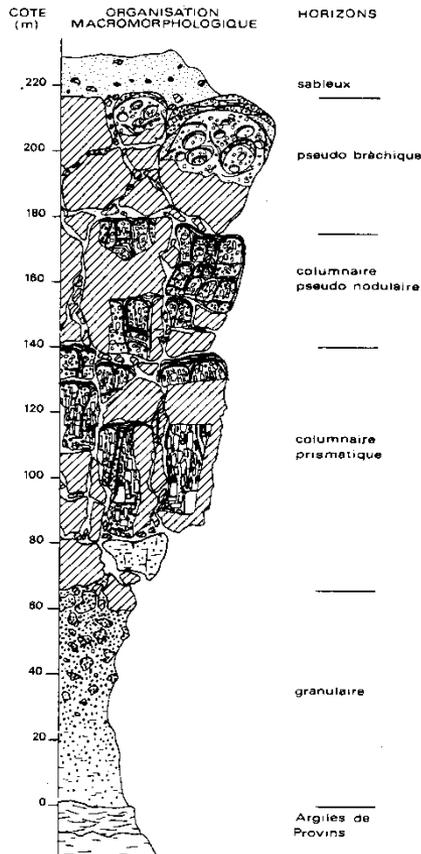
nappe phréatique

grès

b Calcaires d'Etampes

a Sables de Fontainebleau

9-Silcrètes et "silicifications" pédogénétiques



Sable de recouvrement tardif de la dalle siliceuse, **Niveau pseudo-bréchique massif** avec des éléments de taille, de forme et d'organisation variées. Ces éléments sont **coiffés** d'un matériel siliceux.

Zone columnaire à débit **en colonne** avec de larges fentes au sommet qui diminuent vers la base. Les **éléments pseudonodulaires** quartziteux sont arrondis au sommet emballés dans une matrice hétérogène. Plus bas la structure devient **prismatique** avec des éléments à structure pseudonodulaire. Les éléments sont **coiffés**.

Argiles à granules siliceux qui deviennent coalescents vers le haut

Coupe de Montigny-Lencoup (77) Thèse M.Thiry

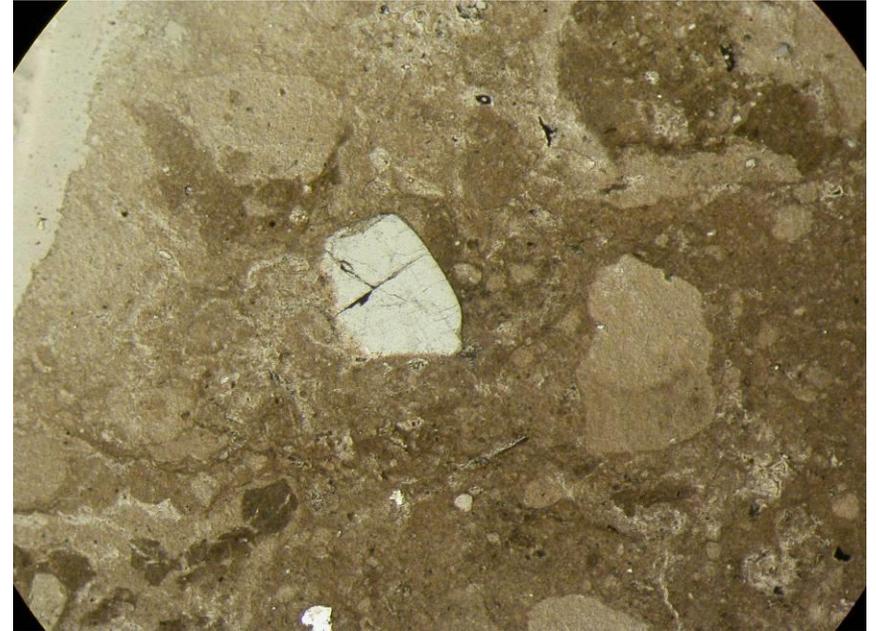
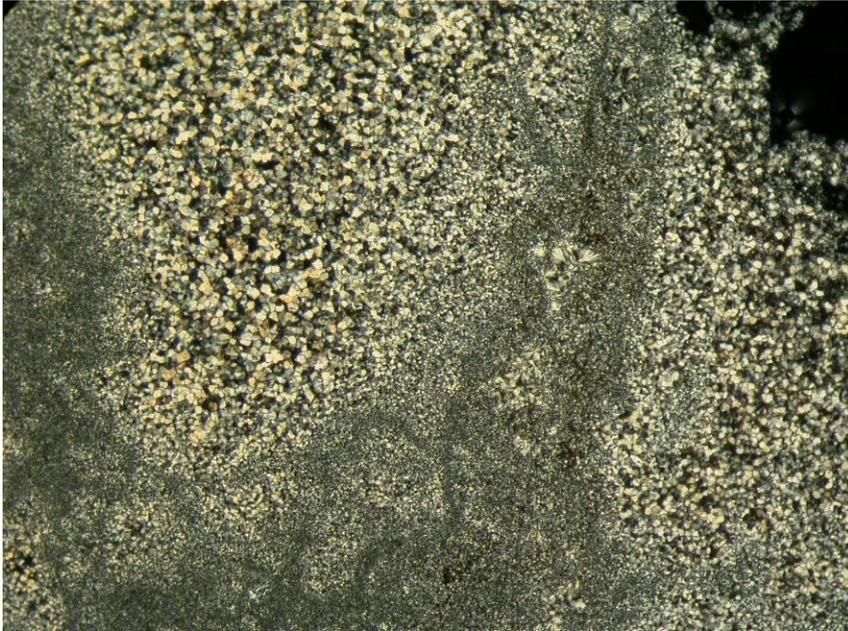
9-Silcrètes d'origine pédologique



La **dalle siliceuse** des silcrètes à son sommet présente des éléments massifs **parfois zonés** (comme certains silex marins) et recouverts d'une **coiffe siliceuse** fine constituée de plusieurs couches. L'ensemble est emballé ou envahi dans une **pseudo-brèche hétérogène**. La bréchification est consécutive d'une **intense fracturation liée à des dessiccations périodiques**.

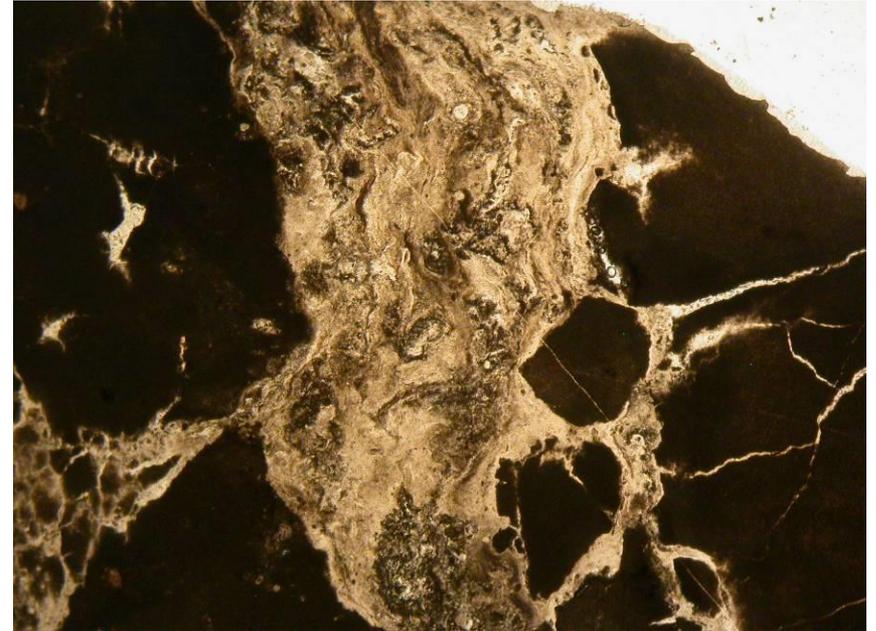
(Eocène tardif, **silexites ou meulieres**, Le Mas, 03)

9-Silcrètes et silicifications pédologiques



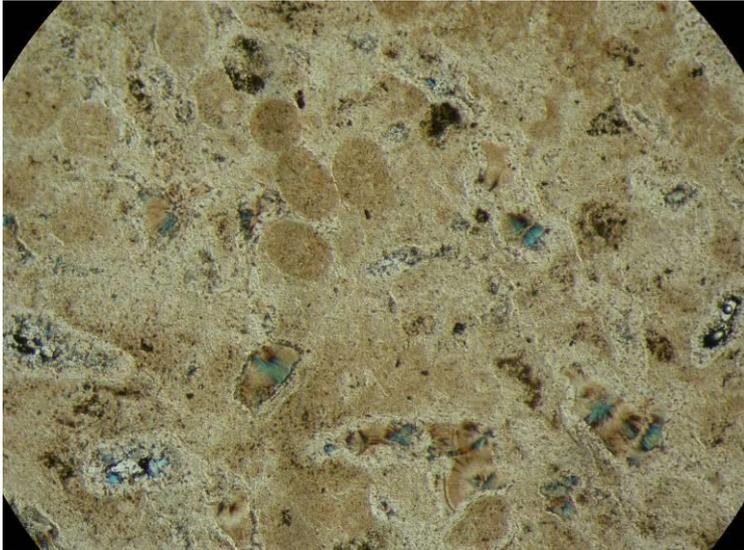
La structure grumeleuse (à toutes les échelles) avec grains-plasma et vides, une texture **grenue à quartz et microquartz**, les grains de quartz détritiques hérités, les **tapissages fins (silanes)** des anciennes fractures,.... constituent les éléments fondamentaux de l'organisation d'un **paléosol siliceux**.

9-Silcrètes et silicifications pédologiques

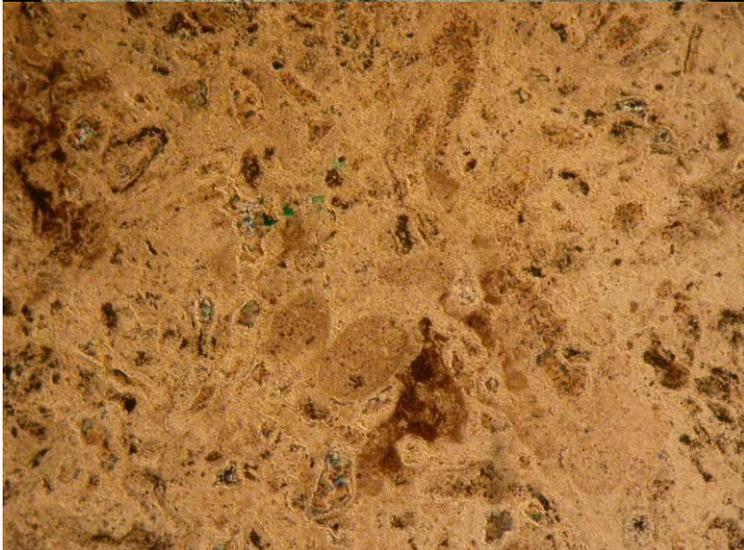


Les silcrètes sont souvent traversés par un **réseau de fractures anastomosées non hiérarchisées**, ou au contraire, dépendantes de couloirs d'infiltration ou **d'illuviation**. Ces fractures secondaires contribuent souvent à la **bréchification du matériau** au cours de sa silicification progressive. La **circulation de l'eau** entraîne le dépôt d'éléments dissous ou particulaires (**silanes**) sur les lèvres des fractures ou au fond des vides. Les **fractures** sont attribuées à des **figures de tassement et/ou de dessiccation** liées à des **alternances de saisons sèches ou humides**.

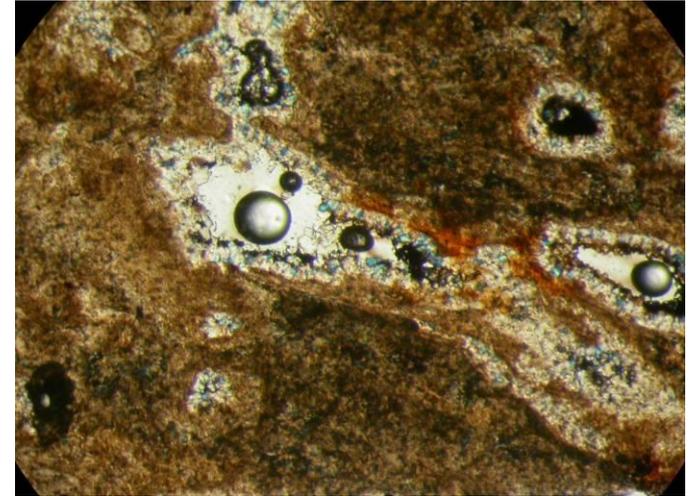
9-Silcrètes et silicifications pédologiques



1



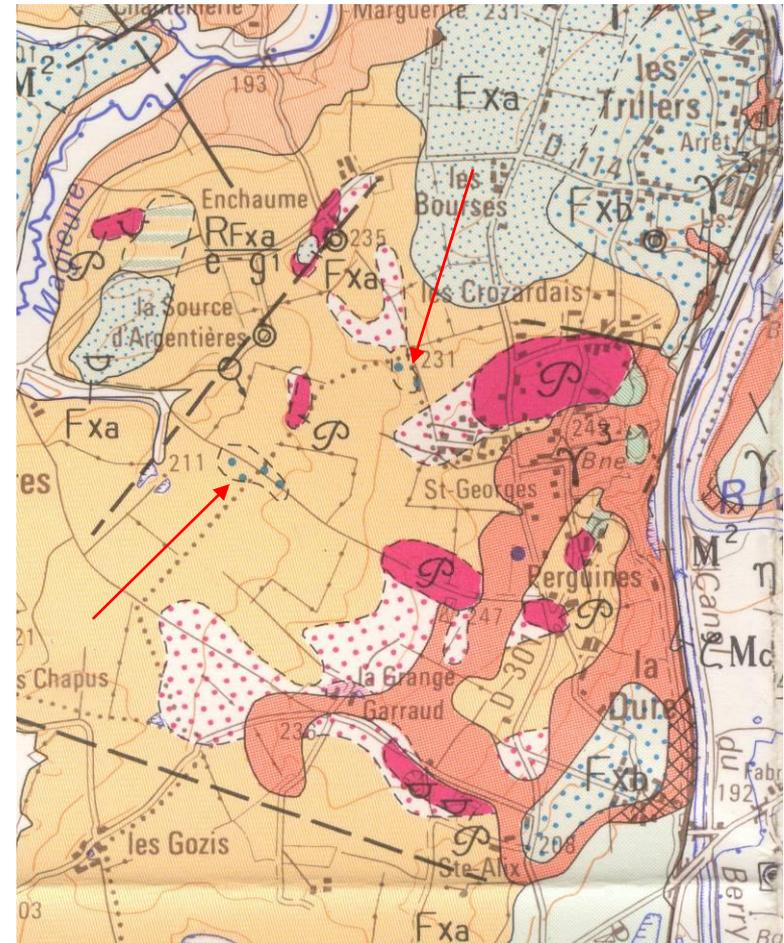
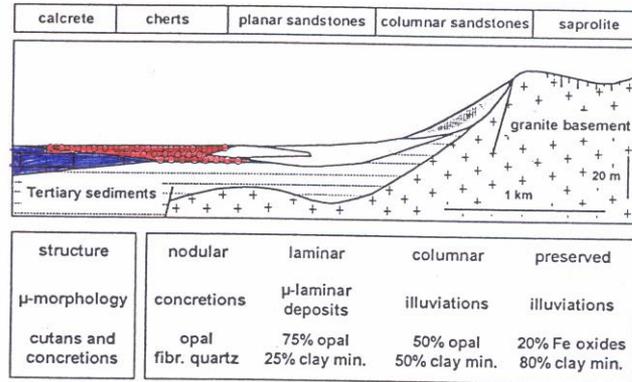
2



3

- Les restes d'une **activité biologique ancienne** sont parfois présents dans les silcrètes avec :
 - - pour les animaux des terriers d'insectes, **de vers**, des **microcoprolites (1&2)**,....
 - - pour les végétaux des **restes de racines** (tubes racinaires fréquents dans les zones d'écoulement)(3).

9-Silcrètes et silicifications pédologiques



- Au N du Massif Central M.Thiry a montré que les **silcrètes éocènes se localisent autour d'anciens reliefs granitiques (γ^3) recouverts de paléosols rubéfiés (P)** du même âge et cernés de formations argileuses lacustres (e-g1).
- Pour cet auteur **l'altération du socle et la dégradation des sols** est à l'origine de la mise en solution de la silice.
- **Son transfert** (par ruissellement?) conduit à son dépôt à 1 ou 2km en contrebas dans de **petits lacs temporaires**.

9-Silcrètes et paléotopographie

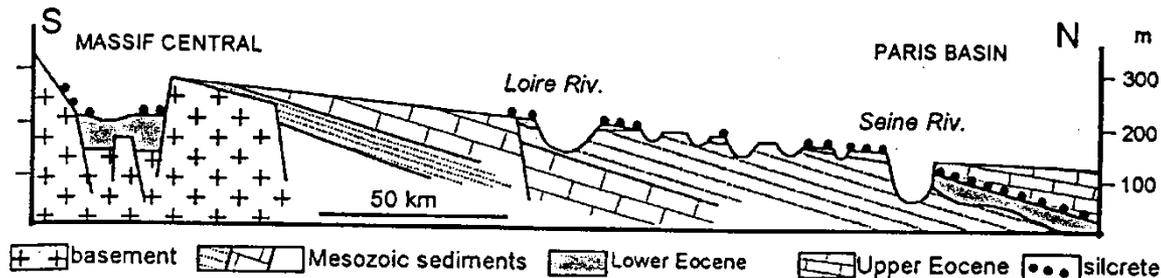


Fig. 15. Geological section of the southern border of the Paris Basin showing the position of the pedogenic silcretes along an even palaeosurface, the Eocene palaeosurface shaped by the siderolithic clastic discharge during early Eocene times. On the edge of the subsiding basin the silcrete armour is interbedded within the Eocene series, which allows the silicification to be dated.

- Cette coupe méridienne de la **bordure méridionale du bassin Parisien** à son centre montre **la position structurale des silcrètes pédogénétiques** de l'éocène moyen.
- L'ancienne topographie éocène est jalonnée par **une suite de buttes** dont **les sommets sont armés par des silcrètes résiduels**.
- Cette **paléosurface crétacé supérieure ou éocène** est particulièrement bien préservée en raison des recouvrements postérieurs de l'éocène supérieur et de l'oligocène.

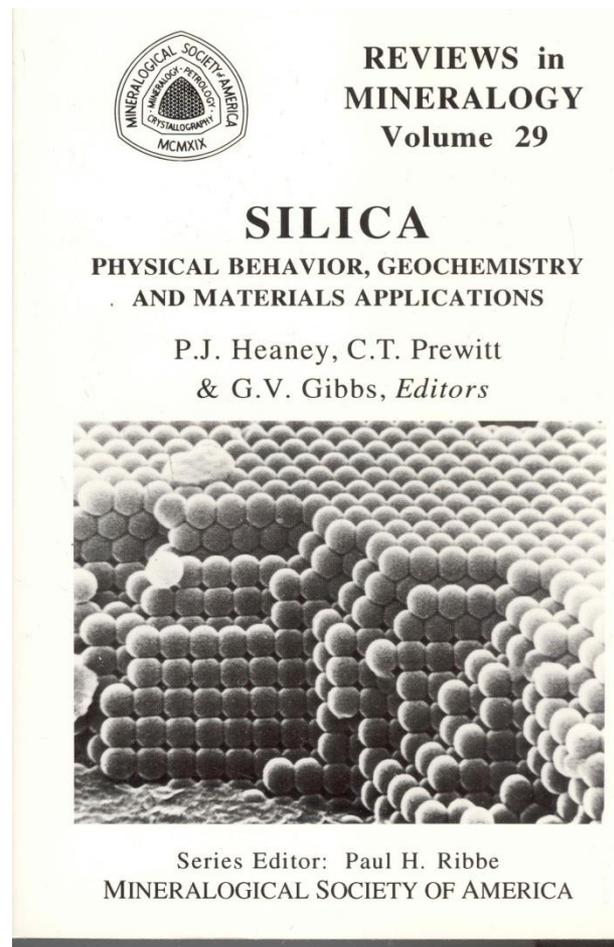
9-Silcrètes et silicifications continentales

- Microfaciès à **opale et silice fibreuse et quartz**,...
- **L'opale** généralement recristallise en calcédonite, microquartz et quartz durant la **diagenèse siliceuse**.
- **Histoire longue et polyphasée** qui s'effectue souvent pour les **silcrètes pédogénétiques** sous des climats chauds et secs (cachet évaporitique), ou **plus humides** avec altérations hydrolysantes des roches. Pour les **silcrètes phréatiques** le scénario est voisin avec des variations des niveaux des **aquifères** qui assurent localement une décharge siliceuse.
- Le contexte **tectonique et érosif : particulièrement calme** en raison de la **lenteur de la formation des silcrètes** pédogénétiques (de 100ka à 10Ma?).(Une eau à 10ppm transforme un sol en 100000 ans avec 100 000 000tonnes d'eau.....). Pour les silcrètes liées aux nappes les durées de formation évaluées sont du même ordre.
- Les **dalles siliceuses** jouent un rôle notable dans **l'érosion des bassins et leur évolution géomorphologique**.

Silex

- Des **origines multiples**.
- Dans tous les **cas le rôle de l'eau paraît être l'acteur prépondérant** à l'origine du dépôt siliceux. Sa circulation, sa teneur en silice et ses propriétés physico-chimiques permettent d'expliquer ces matériaux d'origine secondaire.
- Le **stock siliceux** déplacé et déposé est d'origine biologique ou minérale.
- Des **mécanismes de dissolution-remplacement (épigénie)** expliquent en partie la silicification.
- **Certaines conditions géologiques** (pétrographiques, structurales,....) et **climatiques** paraissent également favoriser le développement des silex.

Ouvrage sur la silice



Ouvrage sur l'hydrothermalisme

