Thèse présentée à l'Université des Antilles et de la Guyane
pour l'obtention du **doctorat en chimie**

ÉTUDE PHYSICO-CHIMIQUE DES FLUIDES PRODUITS PAR LA CENTRALE GÉOTHERMIQUE DE BOUILLANTE (GUADELOUPE) ET DES DÉPÔTS SUSCEPTIBLES DE SE FORMER AU COURS DE LEUR REFROIDISSEMENT



Christelle DIXIT

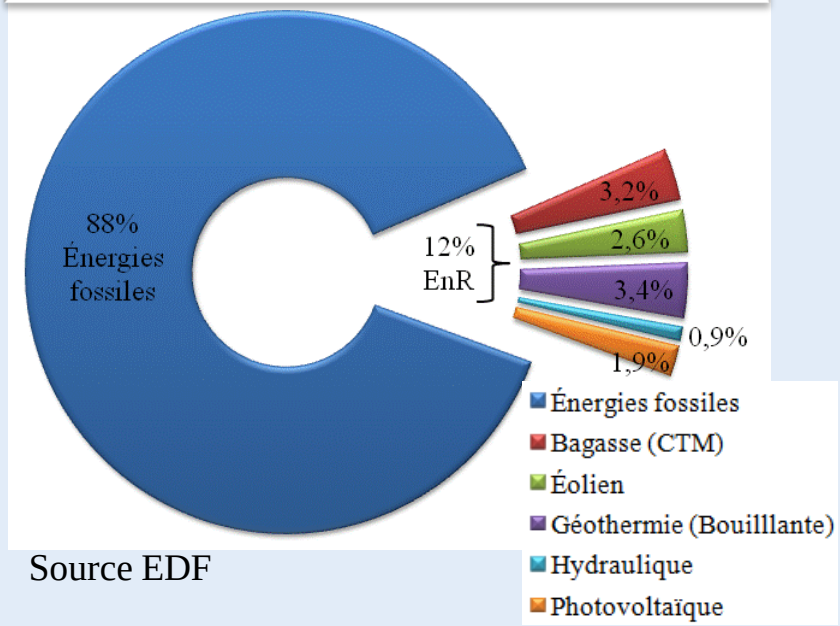
Laboratoire de Recherche en Géosciences et Énergies
(EA 4098, UAG)

Encadrants : Sarra Gaspard (directrice de thèse),
Marie -Lise Bernard (UAG), Bernard Sanjuan (BRGM)

Thèse préparée au LaRGE et à Géothermie Bouillante

LES ENJEUX ÉNERGÉTIQUES DU XXIÈME SIÈCLE

Production d'électricité en Guadeloupe en 2011



Source EDF

Objectifs du Grenelle de l'environnement dans les DOM

Autonomie énergétique

⇩

Développement des énergies renouvelables

Hydraulique | Biomasse | ⇩ | Éolien | Solaire

GÉOTHERMIE

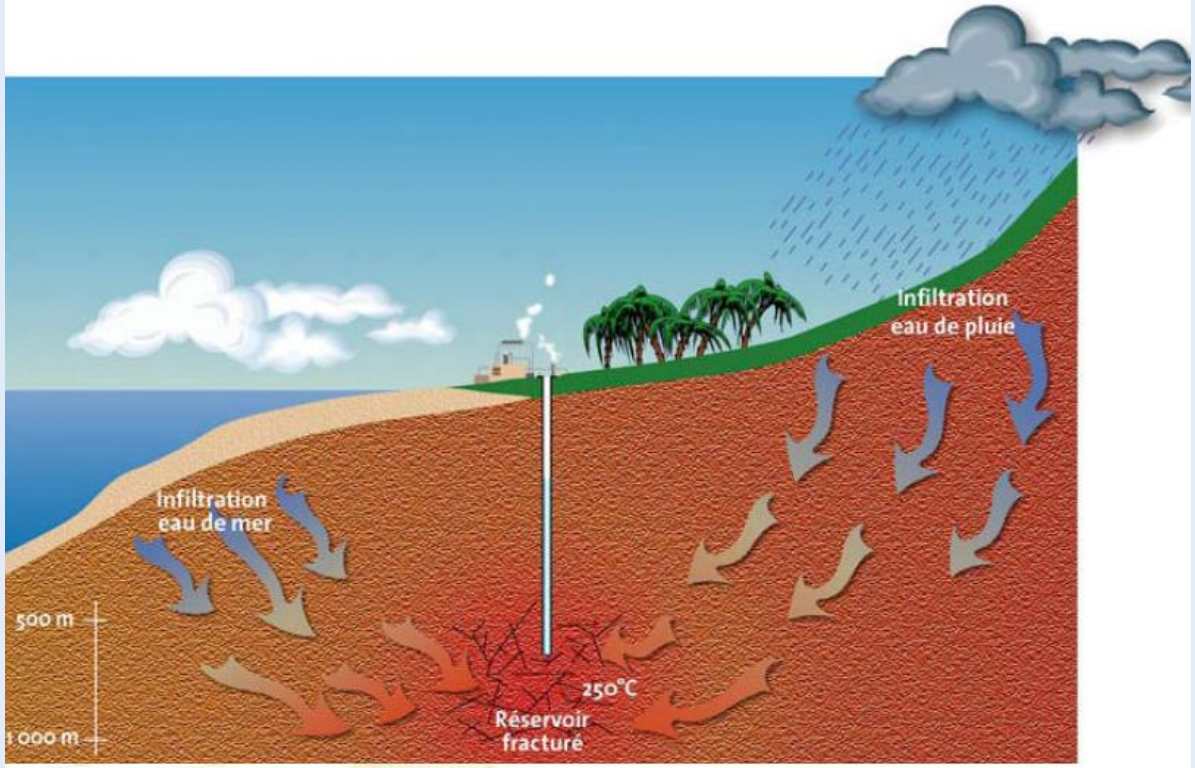
Dépendance aux énergies fossiles
Augmentation des besoins en énergie

- ❖ Polluantes ➔ Réchauffement climatique
- ❖ Limitées ➔ Augmentation des prix

- ❖ Indépendante des conditions météorologiques
- ❖ Peu polluante ➔ 55g/kWh de CO_2
- ❖ Économique ➔ Coût d'exploitation faible

En 2050 ➔ 20% des besoins de l'île

ORIGINE D'UNE RESSOURCE GÉOTHERMIQUE



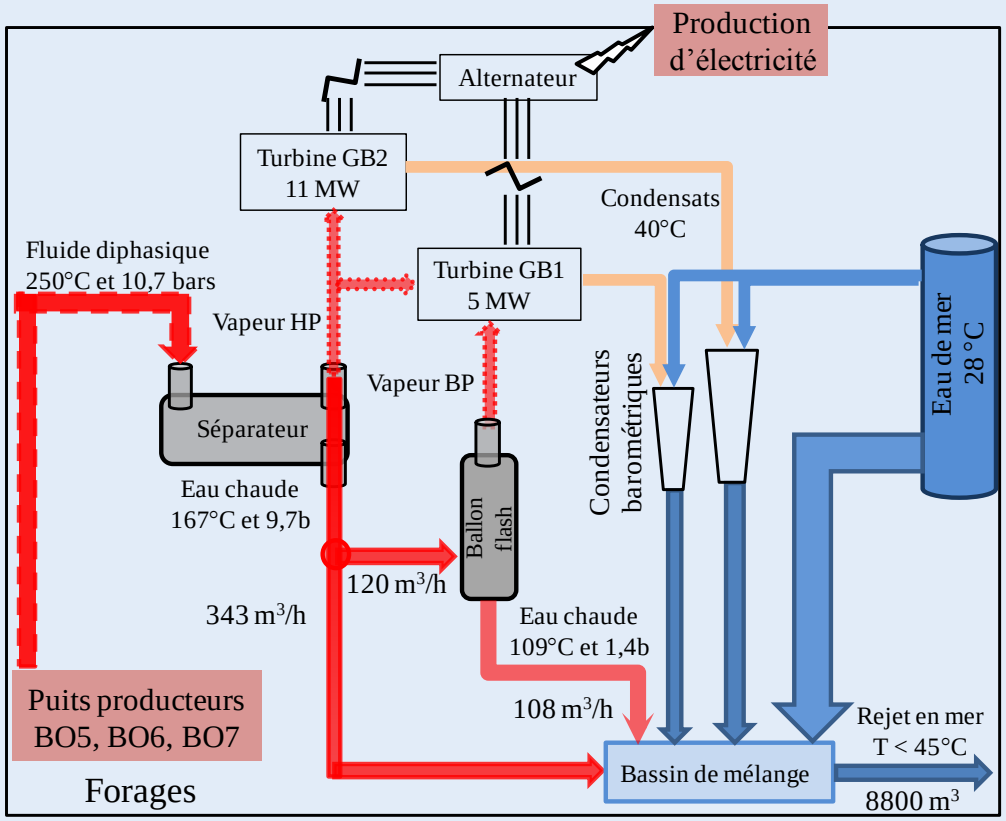
Ressource : Eaux infiltrées réchauffées et enrichies en minéraux dissous au contact de la roche ➔ fluide géothermal ➔ réservoir géothermique

Production d'électricité ➔ si T réservoir > 200°C

***Bouillante : $T_{réservoir} \approx$ 250 – 260°C**

*Guillou-Frottier, 2003

EXPLOITATION D'UNE RESSOURCE GÉOTHERMIQUE



Site de Bouillante

Fluides de production (500 - 600 t/h) :

- **20%** de vapeur alimente 2 turbines
  - ➔ Production d'électricité
- **80%** d'eau séparée refroidie (< 45°C)
  - ➔ Rejetée en mer

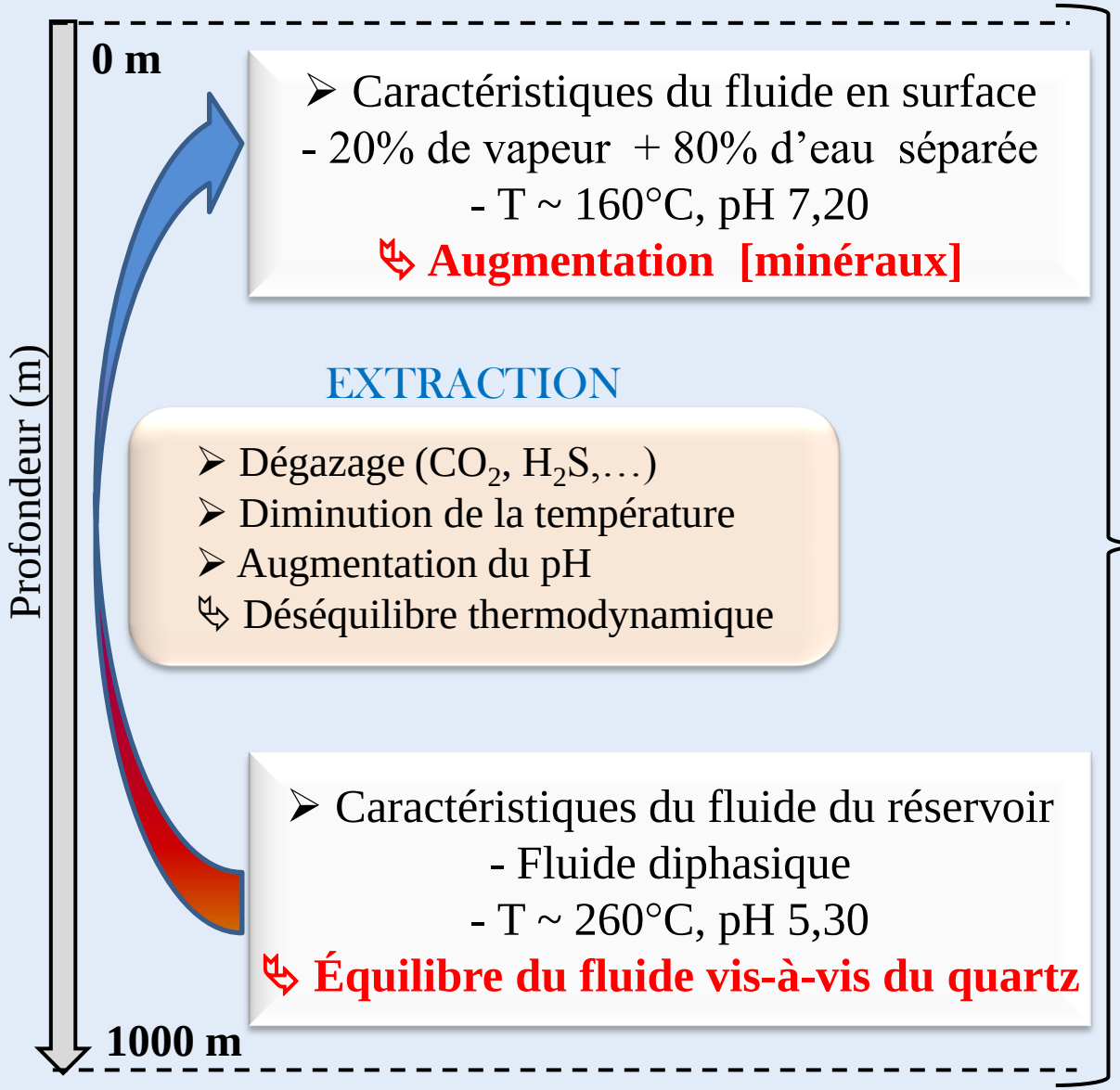
☞ **2011 Tests de réinjection de l'eau séparée (150 t/h)** :

➔ Limiter les impacts environnementaux liés au rejet

➔Maintenir la pression au sein du réservoir

Capacité de production : **15 MWe** (6 à 8% des besoins de l'île)

PROBLÉMATIQUE : PRÉCIPITATIONS MINÉRALES



➢ Caractéristiques du fluide en surface
- 20% de vapeur + 80% d'eau séparée
- T ~ 160°C, pH 7,20
↳ **Augmentation [minéraux]**

EXTRACTION

➢ Dégazage (CO_2, H_2S,…)
➢ Diminution de la température
➢ Augmentation du pH
↳ Déséquilibre thermodynamique

➢ Caractéristiques du fluide du réservoir
- Fluide diphasique
- T ~ 260°C, pH 5,30
↳ **Équilibre du fluide vis-à-vis du quartz**

RISQUE DE PRÉCIPITATION

Sulfures polymétalliques
Sulfates de calcium
Carbonates
Silice amorphe

À Bouillante
➔ Silice amorphe

Azaroual et *al.*, 2005
Sanjuan et *al.*, 2001 et 2008
Serra et *al.*, 2004

PROBLÈME MAJEUR DE LA GÉOTHERMIE HP



Ballon flash



Pompe de réinjection

Conséquences :

- Perturbations sur la production
- Coûts de maintenance élevés
- Impacts sur l'environnement

Conduit



Dépôts de silice amorphe :

- Déposition sur les installations
- Abondants
- Élimination difficile voire impossible





Bassin de contournement

LES OBJECTIFS DE LA THÈSE

- ❖ OPTIMISER les conditions d'exploitation ou de réinjection en minimisant la déposition de la silice
- ❖ AMÉLIORER les connaissances sur les mécanismes et les conditions de déposition de la silice
- ❖ ESTIMER les quantités de silice susceptibles de précipiter selon les conditions d'exploitation
- ❖ ÉVALUER le potentiel de valorisation de la silice géothermale en coproduit de la production d'électricité

- ❖ CARACTÉRISATION physico-chimique des fluides produits à Bouillante et des dépôts associés
- ❖ ÉTUDE CINÉTIQUE de précipitation $4 \leq pH \leq 12$ et $25°C \leq T \leq 90°C$
- ❖ MODÉLISATION des données expérimentales et détermination des paramètres cinétiques
- ❖ SIMULATIONS couplées cinétique – transport 1D
- ❖ TESTS D'ADSORPTION du bleu de méthylène et du plomb sur la silice

Plan de la présentation

1. Introduction

2. Étude de la cinétique de précipitation de la silice dans le contexte de Bouillante

   2.1. État des Connaissances

   2.2 Échantillons

   2.3. Étude expérimentale et modélisation cinétique

   2.3. Caractérisation de la phase solide

   2.4. Implications

3. Valorisation de la silice de Bouillante

   3.1. La pollution des eaux

   3.2. La fonctionnalisation et l'élaboration d'un matériau hybride

   3.3. Élimination du plomb par adsorption

4. Conclusion et Perspectives

2 Étude cinétique sur site

L'ÉVOLUTION DE LA SILICE AU COURS DE LA POLYMÉRISATION

2 PRINCIPAUX MÉCANISMES

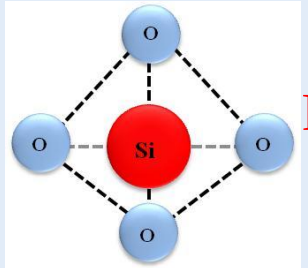
Nucléation hétérogène
(présence de germes)
Croissance



DÉPÔTS

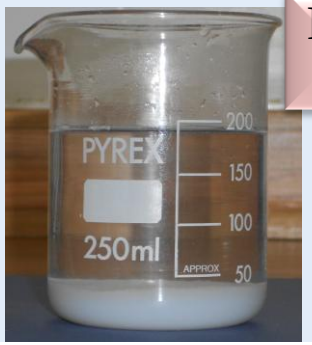
Dépôsition directe

?

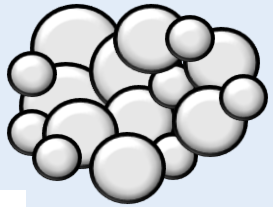


Polymérisation

Nucléation homogène
(absence de germes)
Croissance



Particules en suspension



COLLOÏDES

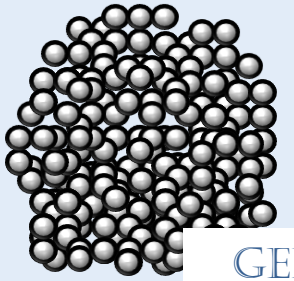
MONOMÈRE

H_4SiO_4

Forme dissoute en solution

Agglomération





GEL

DÉPENDENT DE L'ÉTAT DE SURSATURATION EN SILICE DU FLUIDE EN SURFACE.

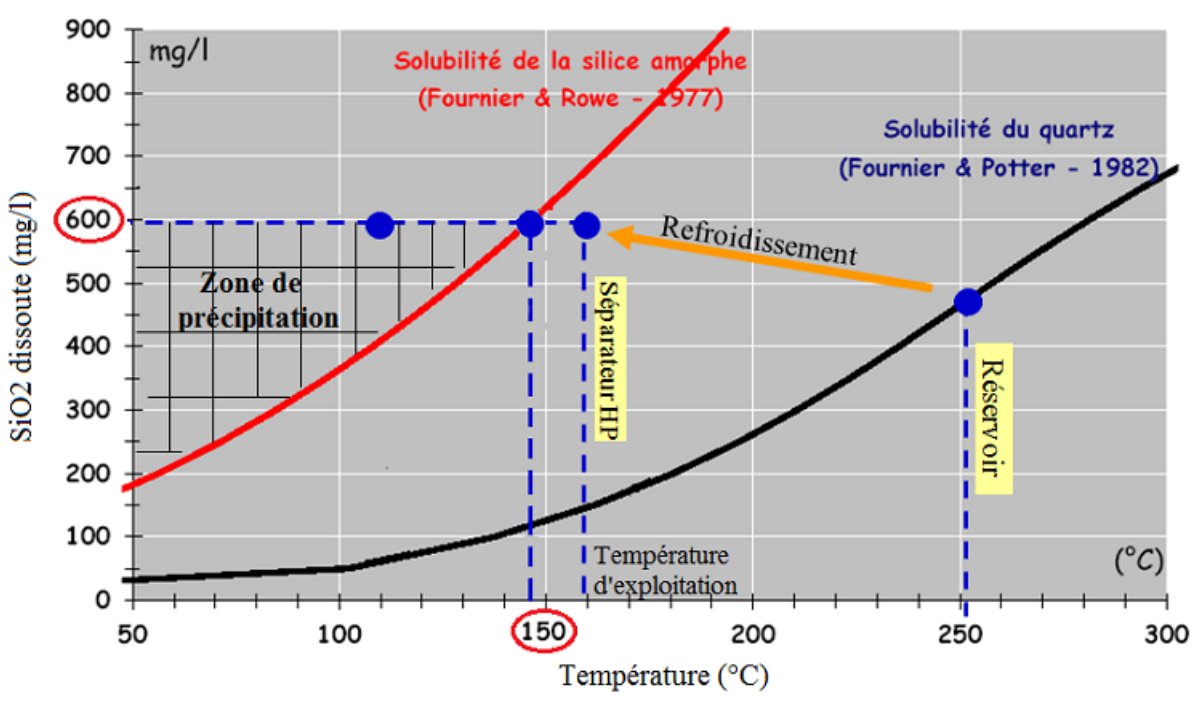
CONDITIONS THERMODYNAMIQUES

Définition de la solubilité C_e:
Quantité maximale de soluté que l'on peut dissoudre dans un volume de solvant, à T et P données

Si $C > C_e$ ➔ Solution sursaturée

Sursaturation $S = (C - C_e)/C_e$

➔ Précipitation possible



Exemple de Bouillante

Déposition de $SiO_{2(am)}$ possible pour $T < 150°C$

☞ **Cinétique de la réaction**

➔ Retarde la précipitation

➔ Diminue les quantités susceptibles de précipiter

FACTEURS FAVORISANT LA PRÉCIPITATION DE LA SILICE

- Sursaturation en silice dissoute : doit être suffisante (S > 1,3)
- pH : précipitation max si 6 < pH < 9 car catalysée par les ions OH^-
- Salinité et présence de certaines espèces chimiques (ex. fluorures)
- Température, force ionique : effet moindre

* Makrides et *al.* (1978) ; Weres et *al.* (1980) ; Marsh et *al.* (1975) ; Bohlmann et *al.* (1980)

LES LIMITES DES CONNAISSANCES ACQUISES

- Études expérimentales en laboratoire sur solution aqueuse sursaturée ou fluides simulés
- Observations et interprétations contradictoires notamment sur l'effet du pH
- Grande diversité dans les lois cinétiques empiriques et théoriques proposées

☞ Beaucoup de données existantes mais la précipitation de la silice géothermale reste un processus complexe encore mal connu

Les apports de l'éTUDE CINÉTIQUE RÉALISÉE

Approfondissement des connaissances existantes sur la déposition de la silice amorphe

Sur fluide réel
Dans les conditions d'exploitation

À différentes T (25 - 90°C)

➔ Détermination de l'énergie d'activation

➔ Prédiction des paramètres cinétiques à des températures plus élevées (> 90°C)

À différents pH (5 - 8)

autour du pH naturel du fluide en surface
6,4 (puits) à 7,10 (eau séparée)

Loi cinétique générale (en fonction du pH et T)

➔ Estimation de la masse de silice susceptible de précipiter

➔ Détermination des conditions optimales d'exploitation

Caractérisation de la silice précipitée

➔ Compréhension des conditions de formation et des mécanismes

➔ Méthode d'extraction optimale de la silice amorphe

CONTEXTE SPÉCIFIQUE DE BOUILLANTE

CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU GÉOTHERMALE DE BOUILLANTE

pH (25°C)	6.78 ± 0.31
E_h	-242 ± 37 mV
TDS	24.6 ± 0.6 $g.l^{-1}$
	(mg/l)
Cl	14561 ± 355
Na	6331 ± 186
Ca	2217 ± 108
K	944 ± 33
SiO_2	**595 ± 34**
Br	51.0 ± 3.9
HCO_3	25.3 ± 6.1
SO_4	21.3 ± 2.2
Sr	18.13 ± 1.46
B	14.57 ± 1.12
Ba	7.65 ± 0.58
Mn	5.23 ± 0.32
Li	4.87 ± 0.42
Mg	1.9 ± 0.7
F	1.3 ± 0.5
H_2S	0.68 ± 0.45

Suivi géochimique (BRGM) : fluides de production (puits), eau séparée (après séparateur HP), condensats de vapeur et gaz incondensables

Analyse statique de ces données (2005-2011) :

➔ Composition chimique moyenne du fluide géothermale en surface et dans le réservoir

➔ Homogénéité et stabilité dans le temps

☞ **Eau séparée** : représentative des eaux de production et du fluide profond

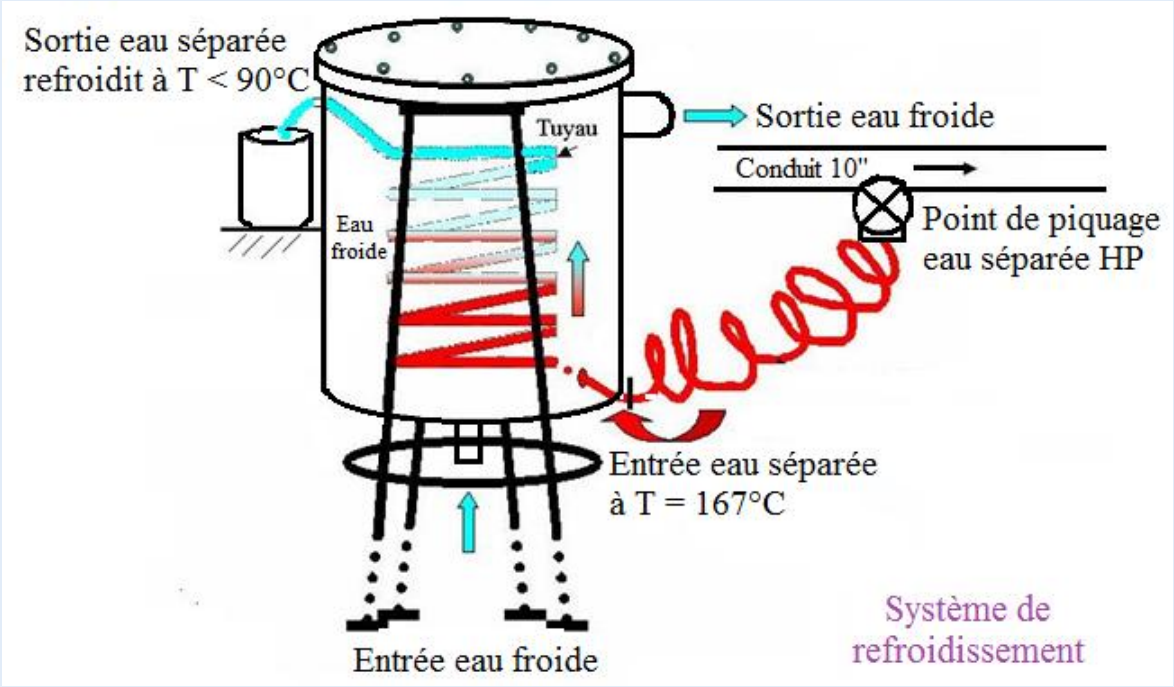
☞ [SiO_2] en mg/l sur d'autres champs :
Wairakei, Nouvelle-Zélande = 234;
Nesjavellir, Iceland = 820.5 ;
Cerro Prieto, Mexique = 1138.

Moyennement riche en SiO_2, ≈ 600 mg/l
⇒ Risque de précipitation modéré

PROTOCOLE EXPÉRIMENTALE



Point de piquage HP



Conditions expérimentales

- Ajustement du pH avec des solutions de HCl et NaOH
  - ☞ **pH de l'étude :** 4, 5, 6, 7, 8 et 9
- Prélèvement à une température T donnée et maintien de T (±1°C) à l'aide d'un bain thermostaté
  - ☞ **Températures de l'étude :** 25, 50, 75 et 90°C

ANALYSE DE LA SILICE DISSOUTE

Mesure de la concentration de silice dissoute par spectrométrie
Précision : 5%



Spectrophotomètre MERCK
Kit de test Si

Méthode d'analyse

- Dosage colorimétrique
- Méthode au bleu de molybdène
- Mesure de la silice monomérique notée H_4SiO_4

- Intervalles des mesures : 10 min sur 1h ; 20 min sur 1h; chaque 1h
- Durée d'une expérience et nombre de série : ~ 9h * 3
- Traitement des données : Tracé de $[H_4SiO_4] = f(t)$
- Remarque : Extraction de la phase précipitée à la fin de l'expérience

MODÉLISATION CINÉTIQUE

Code géochimique utilisé : PHREEQC (Parkhurst &Appelo, 1999)
Base de données thermodynamiques LLNL

➢ Modèle cinétique (Bohlmann et *al.*, 1980)

$$\frac{dC_{SiO_{2(am)}}}{dt} = -k \cdot A_S \cdot \left(1 - \frac{C_t}{C_{eq}}\right)^n$$

k: constante cinétique
n: ordre réaction

➢ Paramètres du modèle

➔ La solubilité vs T (Gunnarson et *al.*, 2005)

$$\log C_e = -8{,}48 - 485{,}24 \cdot T^{-1} - 2{,}27 * 10^{-6} \cdot T^2 + 3{,}07 \cdot \log T$$

Prise en compte du pH et salinité

➔ La surface réactive

$$A_S = S_{BET} \cdot \left(C_i - C_{eq}\right)_T \cdot M_{SiO_2}$$

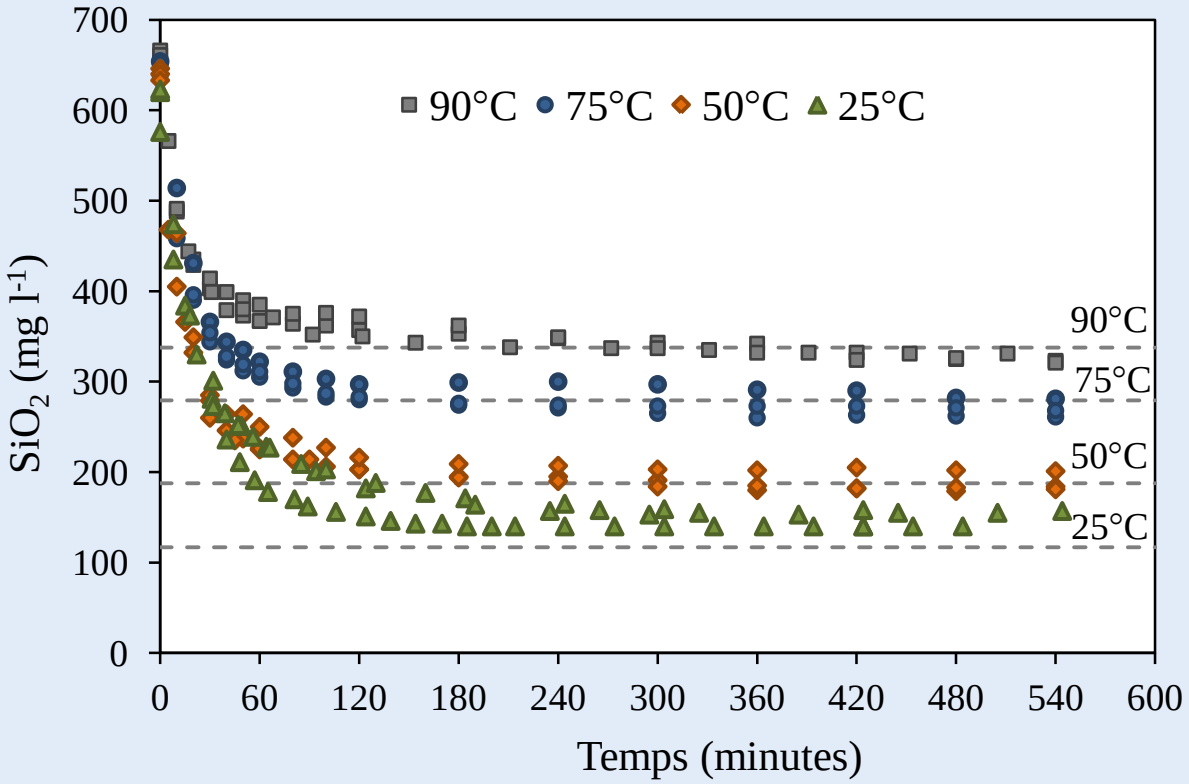
Surface spécifique S_{BET} : Mesurer par adsorption N2 sur silice extraite

➢ Écart modèle-données ε

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(C_{\exp} - C_{cal}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N} \left(C_{\exp}\right)^2}}$$

Critère validation
ε < 10%

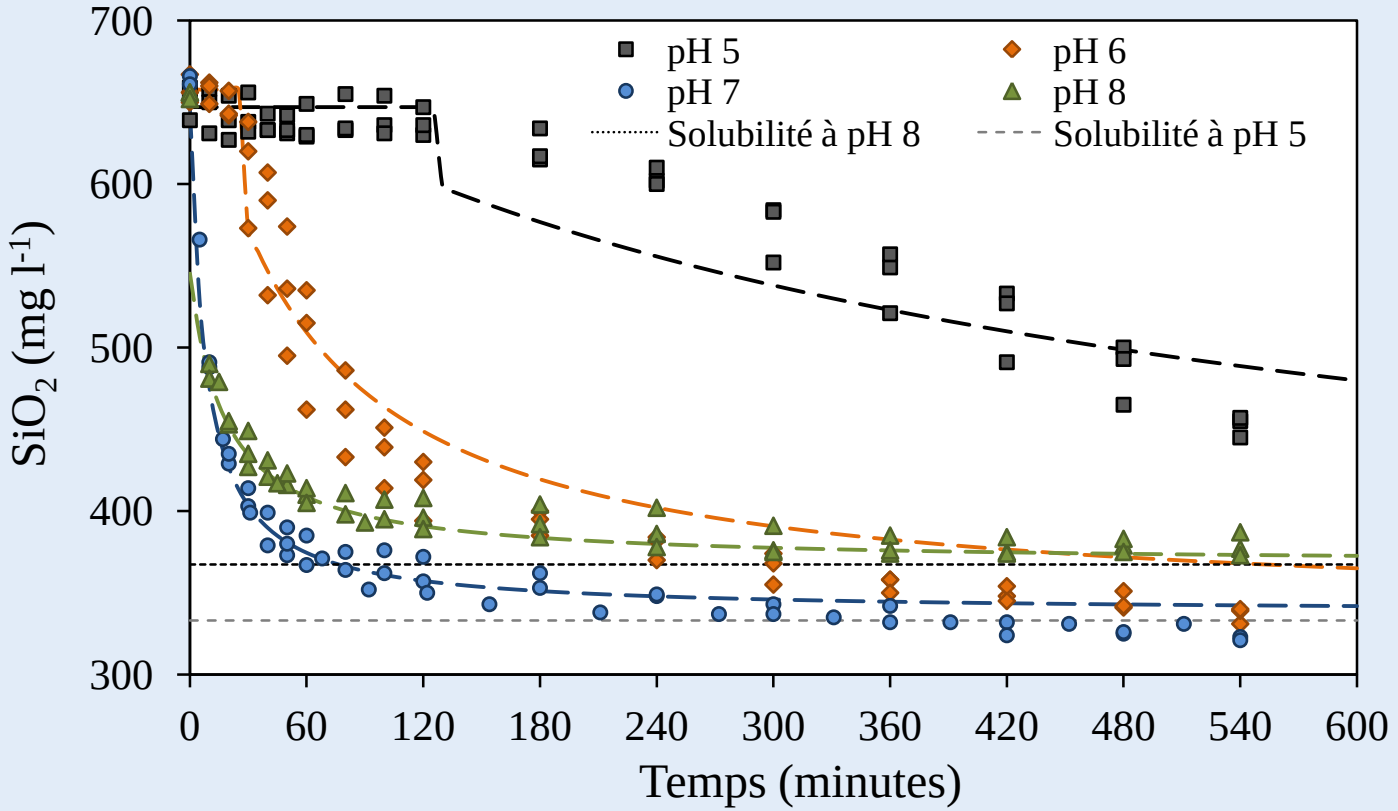
RÉSULTATS : EFFET DE LA TEMPÉRATURE



Diminution de [H_4SiO_4] en fonction du temps dans le fluide pH ~ 7

- Concentration d'équilibre proche ou égale à la solubilité à T donnée
- Temps d'équilibre estimé à 6h à 50, 75 et 90°C et à 3 jours à 25°C
- Mécanisme de polymérisation uniquement

RÉSULTATS : EFFET DU PH À 90°C



Milieu acide (pH 5 – 6)

- Période de transition (max ~ 3h)
- Diminution lente de SiO_2

➔ pH limitant la précipitation

Milieu basique (pH 7 – 8)

- Pas de période de transition
- Diminution rapide de SiO_2

➔ pH favorisant la précipitation

MODÉLISATION CINÉTIQUE DE LA PRÉCIPITATION

Paramètres cinétiques

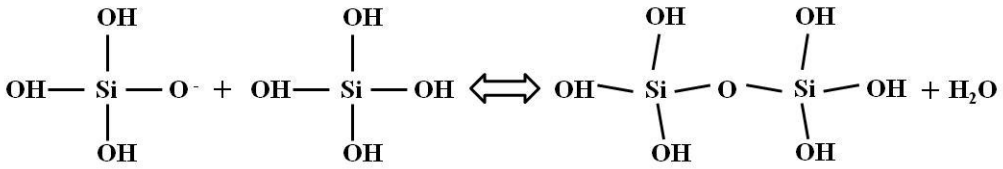
Temp (°C)	pH	A_s	k_2*10^{-9} (mol.m^{-2}.s^{-1})	Erreur ε (%)
25	5	136	0,06	5
	6	136	0,5	5
	7	104	4,59	5
	8	34	37,14	5
50	5	125	0,15	4
	6	123	2,36	7
	7	93	28,57	6
	8	30	70,42	8
75	5	110	1,67	4
	6	104	11,19	7
	7	77	112,6	7
	8	26	51,86	6
90	5	90	2,25	4
	6	90	17,46	6
	7	66	194,6	4
	8	21	674,5	3

Modèle cinétique général

➢ Loi cinétique de second ordre (n = 2) vis-à-vis de la silice monomérique

$$\frac{d[H_4SiO_4]}{dt} = -k_2 \cdot A_S \cdot \left(1 - \frac{[H_4SiO_4]_t}{[H_4SiO_4]_{eq}}\right)^2$$

Ordre 2 ➔ Réaction contrôlée par la dimérisation

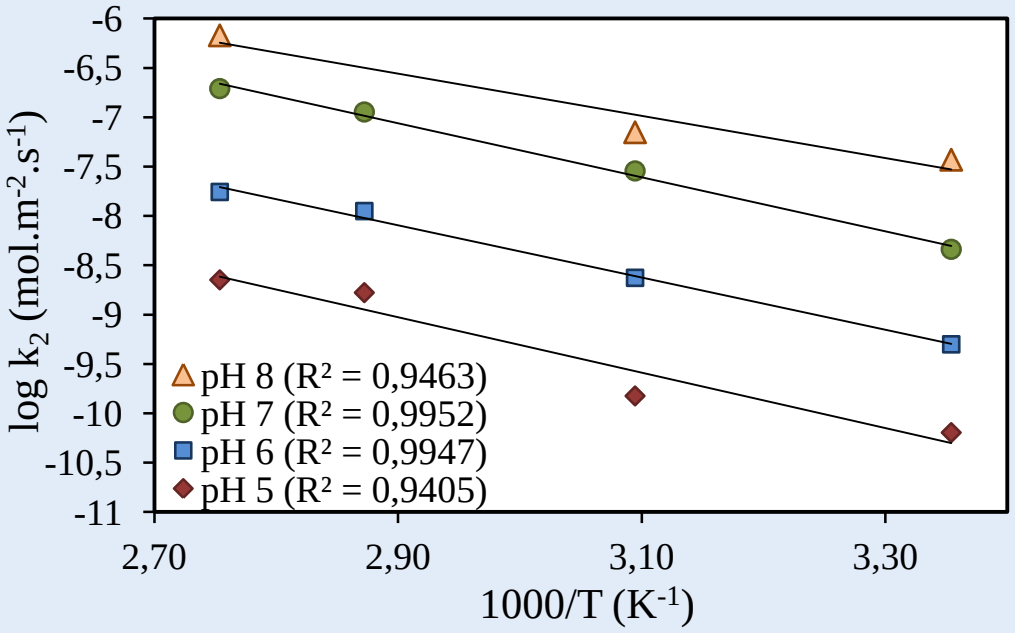


➢ k_2 varie de $6*10^{-11}$ à $6,7*10^{-7}$ mol.m^{-2}.s^{-1}

☞ Valeurs un peu plus élevées par rapport aux valeurs reportées dans la littérature.

➢ k_2 augmente quand T et pH augmentent.

RELATION ENTRE K_2 – T ET K_2 - pH



Calcul de l'énergie d'activation

$$k = A \cdot e^{-\left(E_a / RT\right)}$$ Loi d'Arrhenius

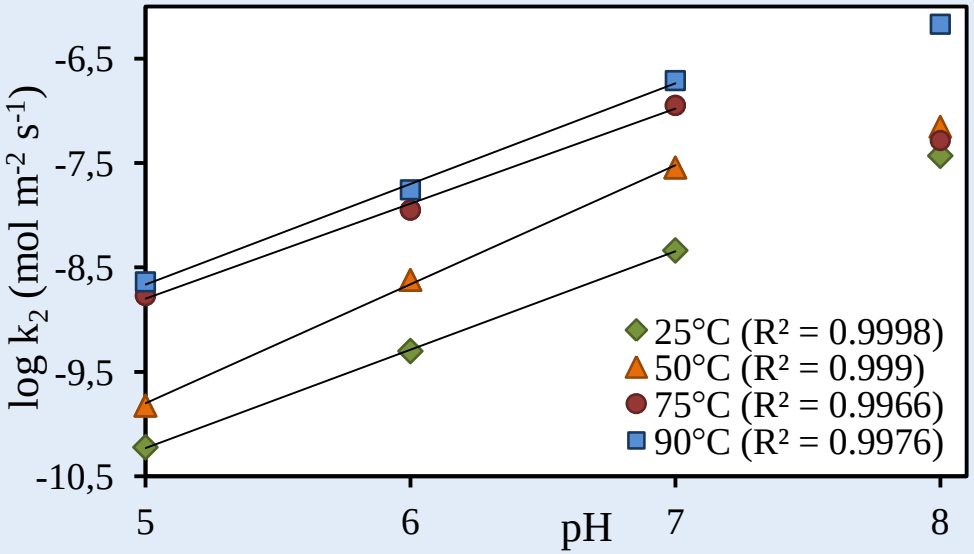
pH	E_a (kJ.mol^{-1})	A (mol m^{-2}s^{-1})
8	41 ± 9,8	0,699
7	52 ± 2,6	2,416
6	51 ± 2,6	0,658
5	54 ± 9,6	0,413

☞ E_a calculée ~ E_a littérature

Relation k_2 – pH

- pH5 - 7 : Dépendance linéaire
- pH 8 : Changement de pente (sauf pour T = 25°C).

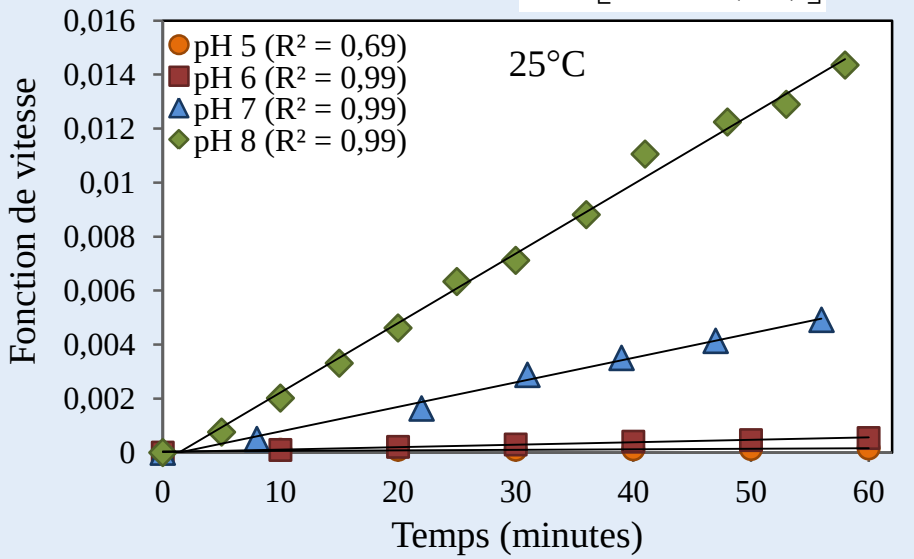
☞ Inflexion confirmée par les expériences menées à pH > 8



MODÉLISATION DE LA PHASE INITIALE DE PRÉCIPITATION

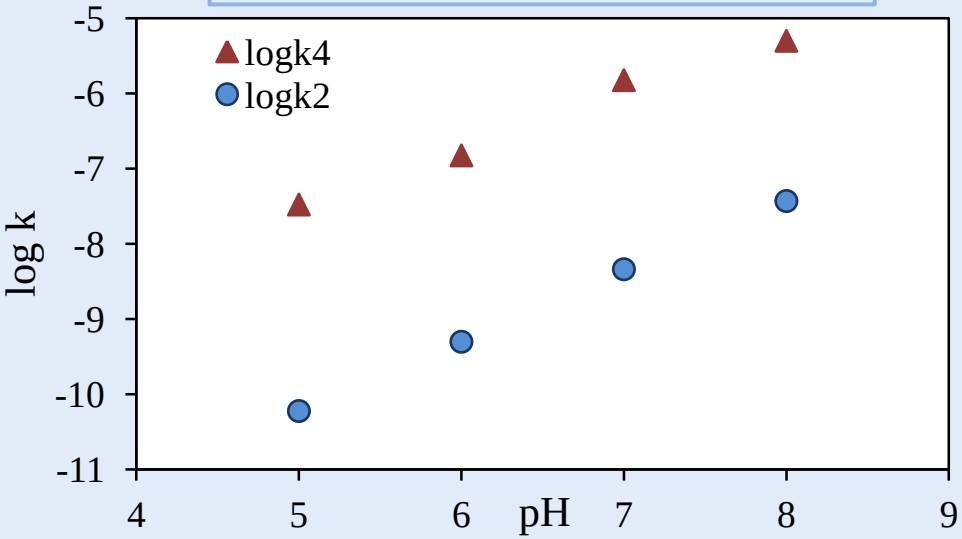
Phase initiale = 1ère heure de la réaction ➔ Approche proposée par Icopini et *al.*(2005)

Fonction de vitesse $\left(\frac{1}{3}\right)\cdot\left[\left(\frac{1}{C^3}\right)-\left(\frac{1}{C_0^3}\right)\right]$



Relation k_4 - pH (25°C)

Relation k - pH peu dépendant de n et donc de la loi cinétique utilisée



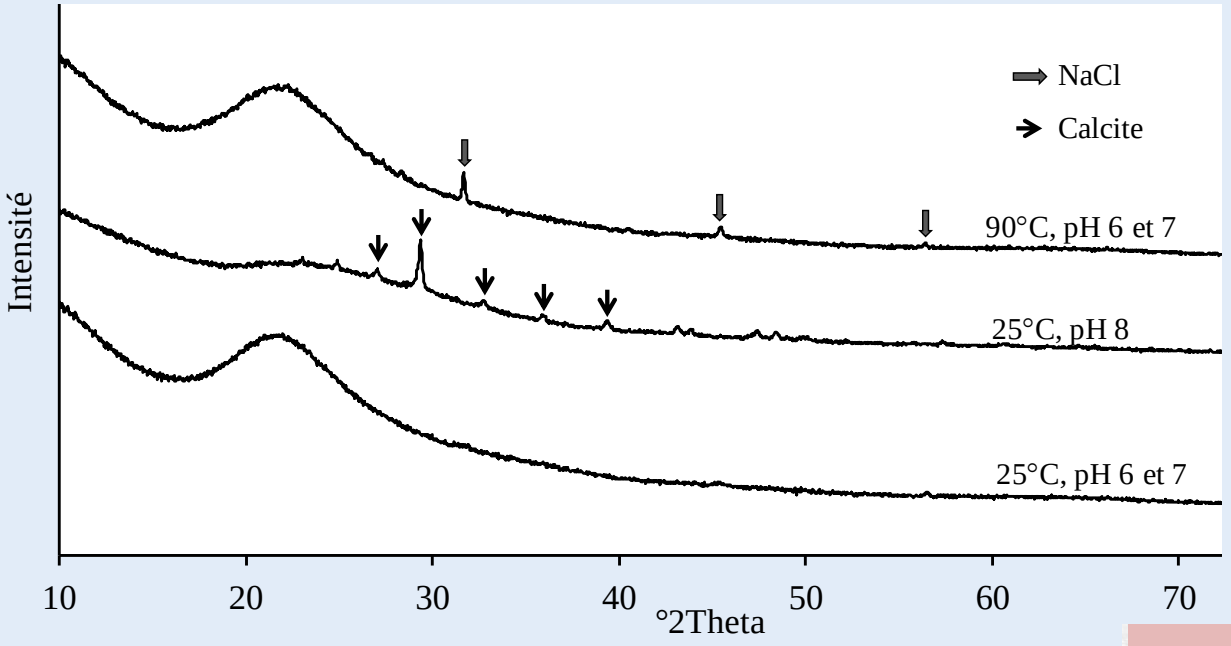
Modèle cinétique

$$\frac{d[H_4SiO_4]}{dt} = -k_4 \cdot [H_4SiO_4]^4$$

Ordre 4 ➔ précipitation contrôlée par la formation de tétramères (4 noyaux de Si)

Différents ordres ➔ Différents mécanismes ➔ Coexistence de ≠ espèces polymériques

CARACTÉRISATION DES PRÉCIPITÉS

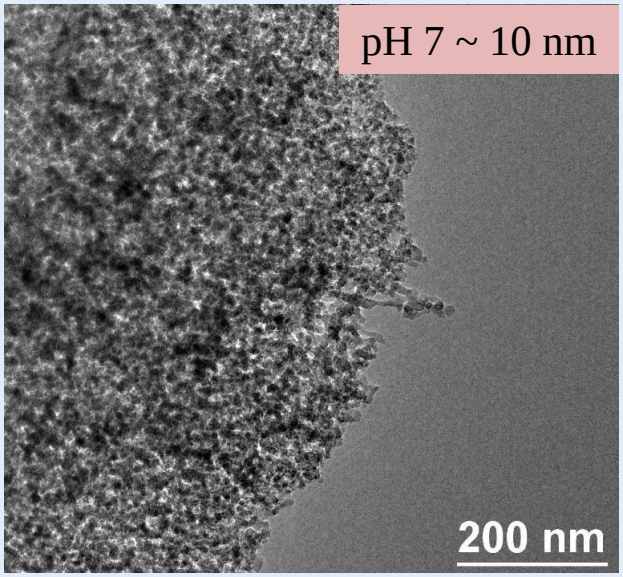


Composition minérale

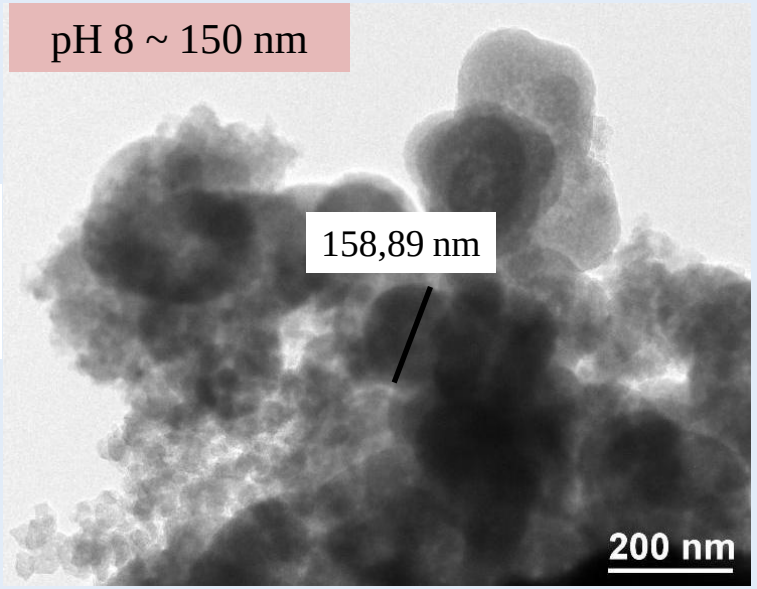
À pH 6 - 7 : SiO_2 amorphe

À pH 8: Phase amorphe + calcite

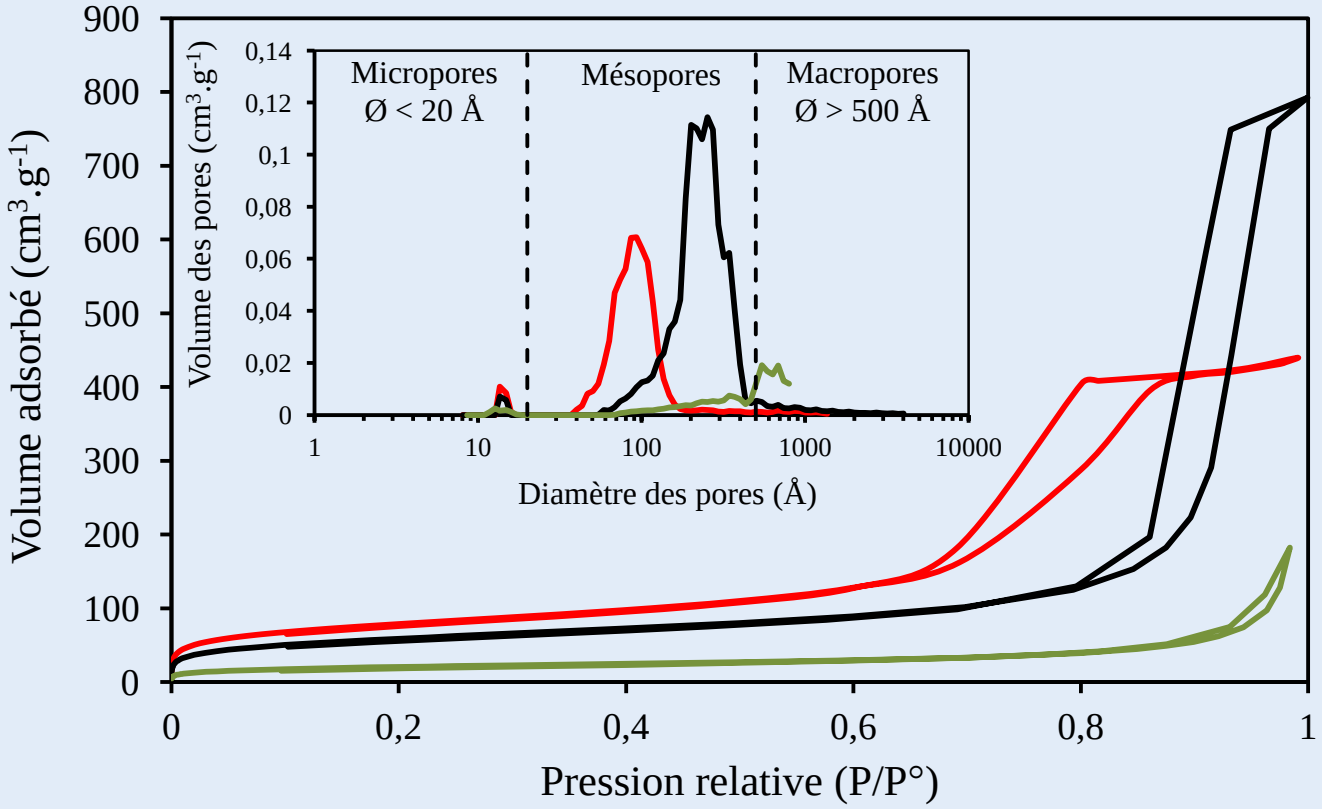
☞ Co-précipitation pH ≥ 8



Taille particule colloïdale (TEM)



CARACTÉRISATION DES PRÉCIPITÉS



	pH 6	pH 7	pH 8
S_{BET} ($m^2.g^{-1}$)	278	207	114
V_{pore} ($cm^3.g^{-1}$)	0,68	1,23	0,95
$Ø_{pore}$ (Å)	94	189	227

Microstructure (BET)

- À pH 7 : S_{BET} ↗ si T ↗
- À 25°C : S_{BET} ↘ si pH ↗

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE CINÉTIQUE

1. Période d'induction

Jusqu'à 3h à pH 5 à 90°C ➔ Retarde la précipitation de la silice lors de l'exploitation ou la réinjection du fluide

2. Polymérisation de la silice dissoute uniquement

3. Modélisation des données expérimentales

Ordre 2 ➔ Formation de dimères

Ordre 4 (phase initiale) ➔ Formation de tétramères

Énergie d'activation ➔ De 41 à 54 kJ/mol

4. Caractérisation de la silice précipitée

Silice amorphe pure à ~ 98% à pH 6 – 7

Co-précipitation à pH ≥ 8 : Phase amorphe + calcite

Microstructure des colloïdes : Variation importante en fonction du pH

3 Valorisation de la silice géothermale

Prévention des dépôts

➔ Extraction de la silice dissoute par précipitation provoquée.

Estimation de la silice

400 tonnes d'eau résiduelle contenant ~ 600 mg/l de SiO_2 $\Rightarrow$ 5 t/jrs de SiO_2

Pureté > 98% (formation rapide à 25 °C)

Voie de valorisation de la silice

➔ Utilisation de ses **propriétés d'adsorption** pour le traitements des eaux polluées

☞ Dépollution des eaux : défi environnemental crucial en Guadeloupe (contamination chlordécone, ...)

Objectif de cette étude de valorisation et travail réalisé

❖ ÉVALUER le potentiel de valorisation de la silice géothermale en coproduit de la production d'électricité

❖ TESTS D'ADSORPTION du bleu de méthylène et du plomb sur la silice

❖ Élaboration d'un nouveau matériau adsorbant à base de silice

FONCTIONNALISATION DE LA SILICE

Propriétés de surface de la silice

➢ Présence des groupes SiOH, surface spécifique et porosité élevées

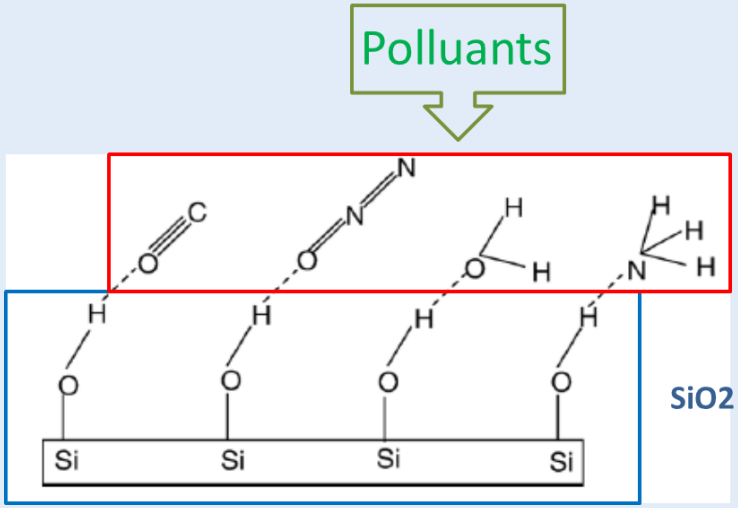
☞ Peut fixer et stocker les polluants présents dans l'eau

☞ Mise au point d'adsorbants à base de silice pour la dépollution

La fonctionnalisation : quel – intérêt ?

Définition : Modification contrôlée des propriétés physiques et chimiques d'un matériau par incorporation d'un groupement organique

☞ Surfactant : Améliore l'affinité entre la surface de la silice (≡ support) et le polluant



Fonctionnalisation de SiO2 à l'aide espèces se fixant facilement sur SiO2 + affinité avec le polluant

Nouveau matériau adsorbant COMBINANT les propriétés de la silice et du surfactant.

ADSORPTION : ASPECTS THÉORIQUES

Processus physique

Capacité de certains solides (adsorbant) à fixer des molécules (adsorbat) sur leur surface.

Physisorption : Interactions adsorbant/adsorbat faibles, processus réversible

Chimisorption : Interactions adsorbant/adsorbat fortes, processus irréversible

	Modèle	Expression
Cinétique	Pseudo premier ordre	$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$
	Pseudo-second ordre	$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$
Isotherme	Langmuir	$q_e = \frac{q_m \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e}$
	Freundlich	$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n}$
	Redlich-Peterson	$q_e = \frac{A \cdot C_e}{(1 + K_{RP} \cdot C_e^{\beta})}$
	Brouers-Sotolongo	$q_e = q_{BS}\left(1 - \exp\left(-K_{BS} C_e^{\alpha}\right)\right)$

Modèles cinétiques et isothermes

➔ Étudier des mécanismes d'adsorption

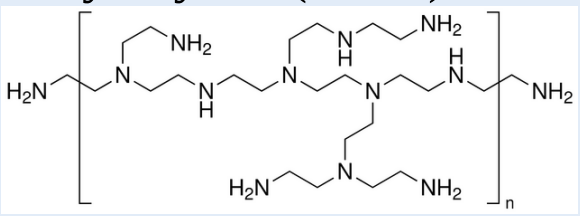
➢ Déterminer la capacité d'adsorption du matériau en fonction du temps

➢ Décrire le comportement à l'équilibre entre adsorbant et adsorbat

$q_{e,t}$: capacité d'adsorption à l'équilibre et à l'instant t
Ce : concentration à l'équilibre
Autres symboles : paramètres spécifiques au modèle considéré

Le matériau adsorbant PEI/SiO_2

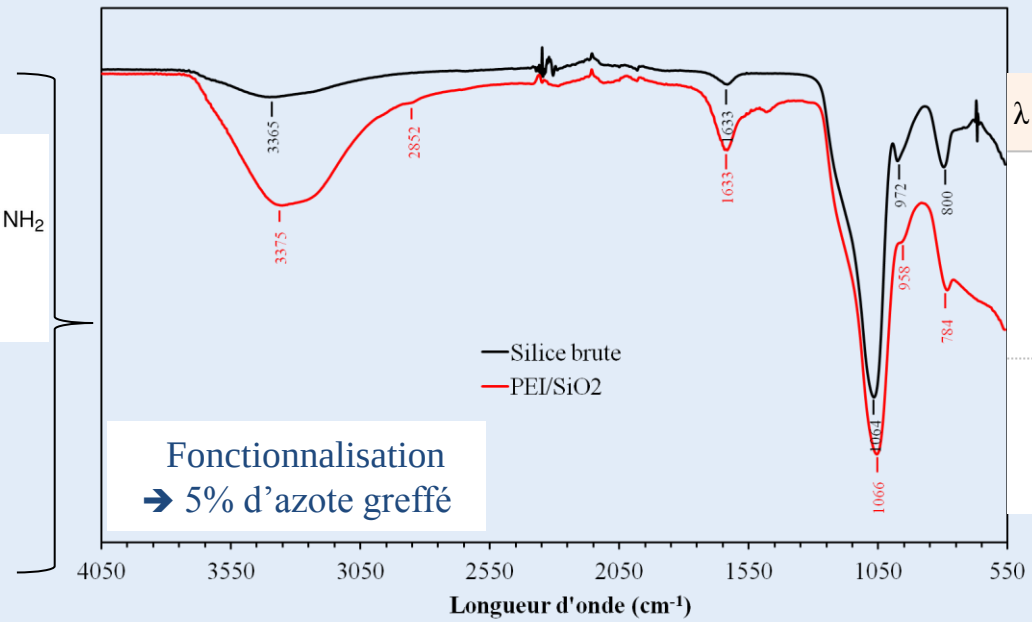
Surfactant
Polyéthylène(imine)



+

$OH—(SiO_2)_n$

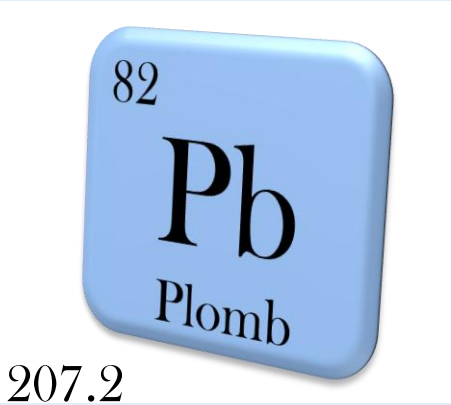
Silice



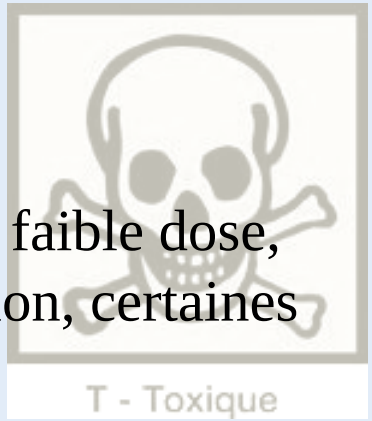
Fonctionnalisation
➔ 5% d'azote greffé

λ (cm^{-1})	Fonction
3600	O–H (silanol)
1633	O–H (H_2O)
1074	Si–O–Si
972	Si–OH
800	O–H (silanol)
3400	N–H
1473	C–N

Le polluant : le plomb

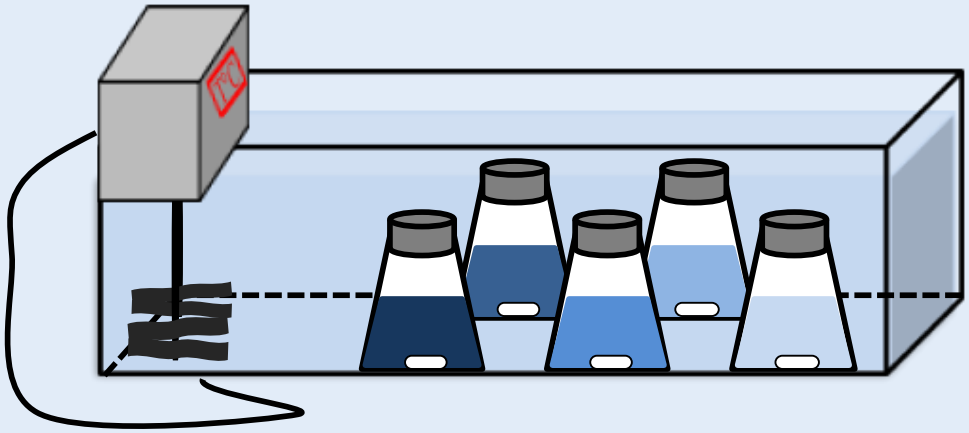


- Polluant métallique
- Très toxique et peu mobile
- Peut provoquer une intoxication même à faible dose,
- Origine: peintures, revêtements canalisation, certaines voitures



PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

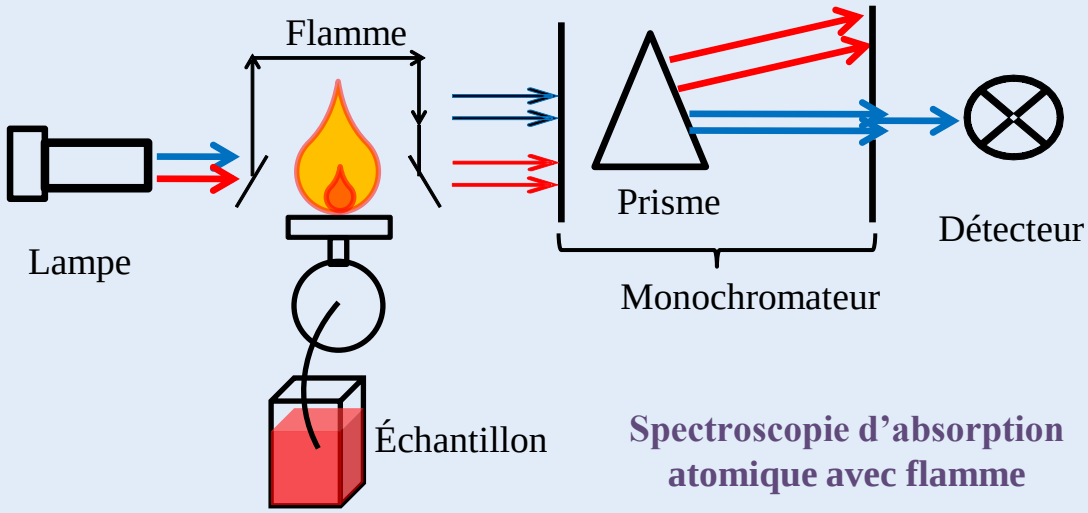
Dispositif expérimental



Conditions expérimentales

- Masse adsorbant (kg) : 0.25, 0.5 et 1
- $[Pb^{2+}]_{initiale}$ (mg/l) : 10, 20, 30, 40, 50
- T (°C) : 25, 35, 45
- pH : 4, 5, 7

Technique d'analyse



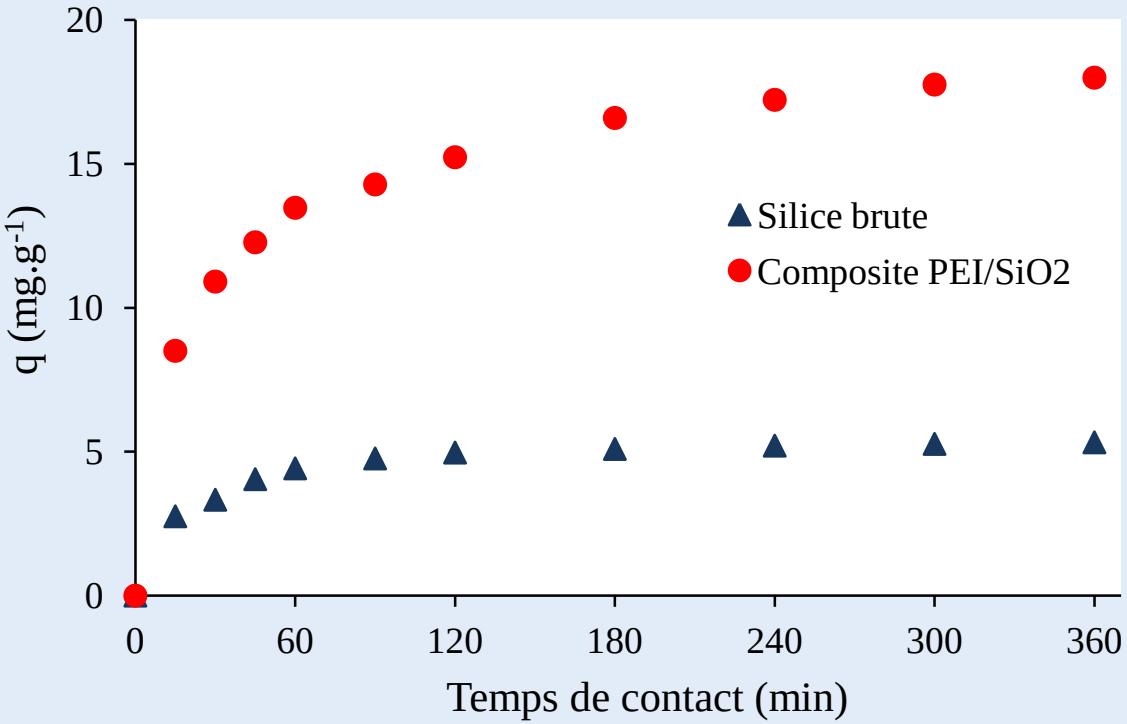
Spectroscopie d'absorption atomique avec flamme

Quantité de Pb^{2+} adsorbée par gamme de SiO_2 (mg/g)

$$q = \frac{V(C_i - C_t)}{m}$$

$$\%adsorbé = \frac{(C_i - C_t)}{C_i} * 100$$

RÉSULTATS : EFFET DE LA FONCTIONNALISATION



Cinétique d'adsorption de Pb^{2+} par SiO_2 et SiO_2/PEI

Masse d'adsorbant : 0,5 g

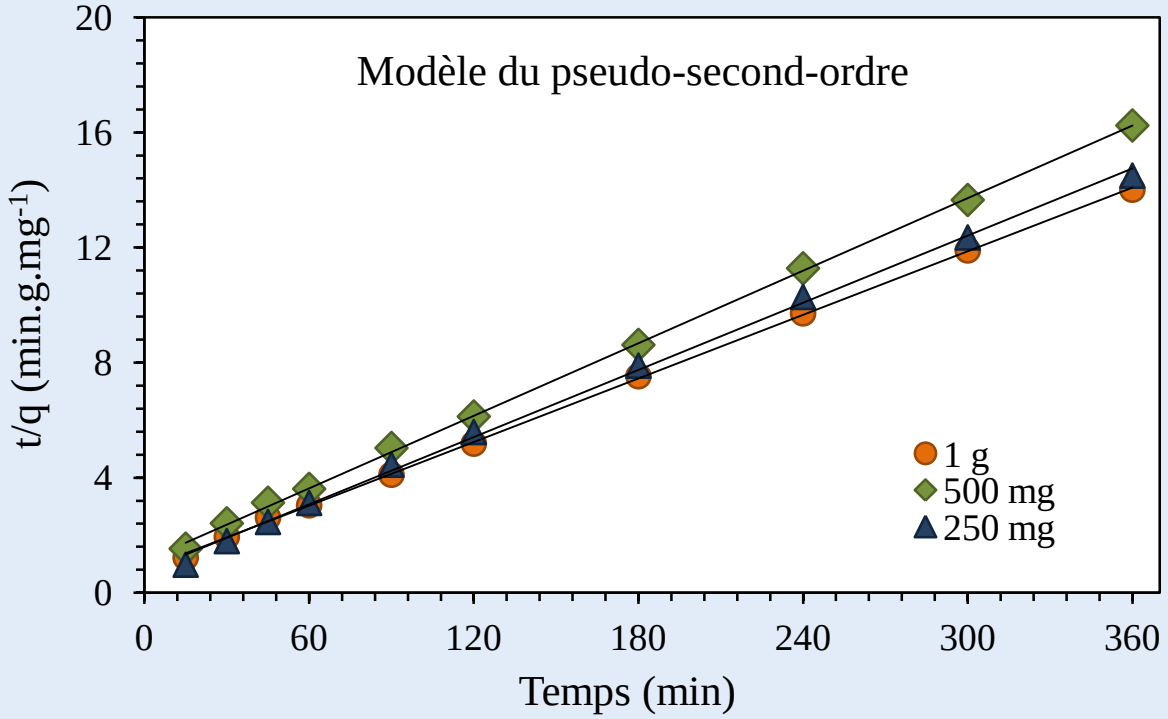
$[Pb^{2+}]_i$: 50mg/l

pH ~ 5 et 25°C

- Fonctionnalisation ➔ Capacité d'adsorption 3 fois plus élevée
- Temps de contact pour atteindre l'équilibre ➔ SiO_2 : **2h** et PEI/SiO_2 : **3h**
- Capacité à l'équilibre ➔ SiO_2 : **5,3 mg.g^{-1}** et PEI/SiO_2 : **18 mg.g^{-1}**

Amélioration de la capacité d'adsorption du plomb après fonctionnalisation de la silice

RÉSULTATS : CINÉTIQUE D'ADSORPTION DU PLOMB



Modélisation des cinétiques d'adsorption de Pb^{2+} par SiO_2 et SiO_2/PEI

Masse d'adsorbant : 0,25 à 1g

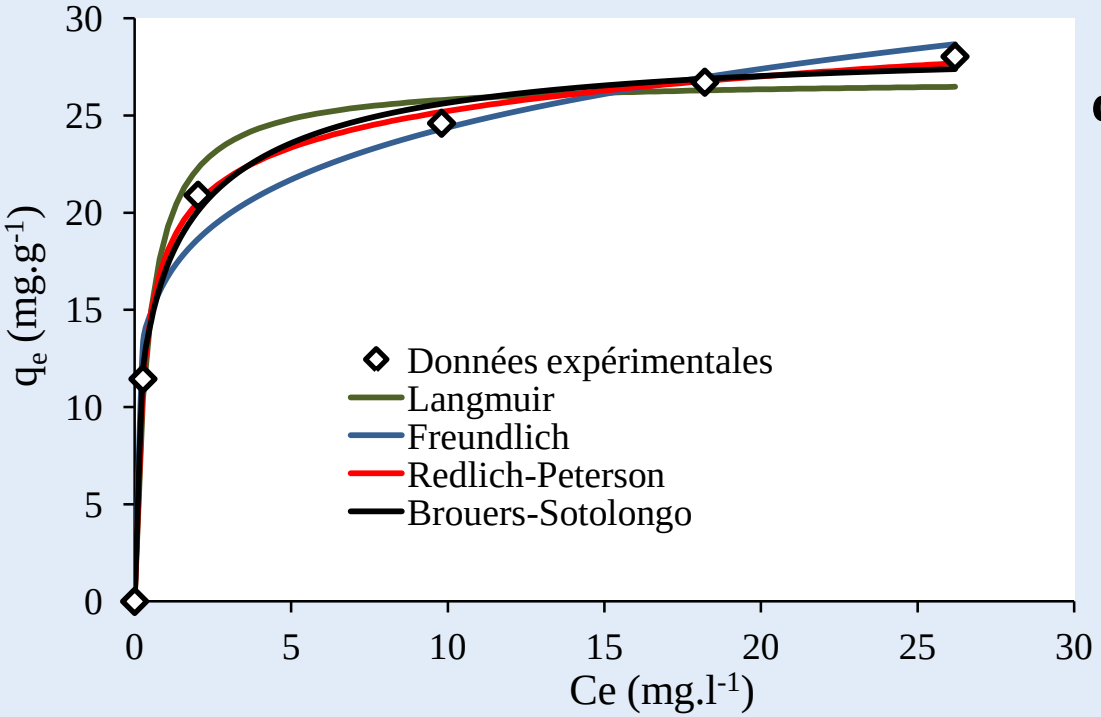
$[Pb^{2+}]_i$: 50 mg/l

pH ~ 5 et 25°C

Quantité d'adsorbant	250 mg	500 mg	1 g
k_2*10^{-2} ($g.mg^{-1}.min^{-1}$)	0,21	0,16	0, 17
q_e calculée ($mg.g^{-1}$)	25,71	23,81	27,1
R^2	0,9983	0,9996	0,9997
%D	4,900	2,3803	2,1885
q_e expérimentale	24,15	21,81	25,21

Modèle du pseudo-2-ordre
Formation de liaisons covalentes entre l'adsorbant et les molécules de plomb en solution

RÉSULTATS : ISOTHERME D'ADSORPTION DU PLOMB



Modélisation de l'isotherme d'adsorption de Pb^{2+} par SiO_2/PEI

Masse d'adsorbant : 0,50 g

$[Pb^{2+}]_i$: 10 à 50 mg/l

pH ~ 5 et 25°C

Modèle Redlich-Peterson

Adsorption du plomb en monocouche sur des sites actifs énergiquement homogènes

Langmuir		Freundlich		Redlich-Peterson		Brouers-Sotolongo	
q_m ($mg.g^{-1}$)	26,899	K_F [$mg/g(mg/l)^{1/n}$]	16,557	A [$(L.mg^{-1})^{\beta}$]	106,823	q_{B-S} ($mg.g^{-1}$)	28,147
K_L ($l.mg^{-1}$)	2,390	n	5,947	K_{R-P} ($l.g^{-1}$)	4,991	K_{B-S} ($l.mg^{-1}$)	0,934
-	-	-	-	β	0,918	α	0,414
R^2	0,9886	R^2	0,9848	R^2	0,9990	R^2	0,9963
%D	4,569	%D	5,167	%D	0,933	%D	2,232

COMPARAISON AVEC LA LITTÉRATURE

Adsorbant	pH	q_e ($mg.g^{-1}$)	Références
CA à base de coques de coco	4.5	26,5	Sekar et *al.*, 2004
CA végétale *E. rigida*	6	279,7	Gerçel et Gerçel, 2007
CA d'origine animale	4	32,1	Cechinel et *al.*, 2013
Sciure de bois	4.4	40	Chouchane et *al.*, 2011
Composite bagasse/carbone	4.5	54,5	Hamza et *al.*, 2013
Silice modifiée avec un thiol	5.5	17,8	Kushwaha et *al.*, 2002
Silice modifiée avec le PEI	6	19,16	An et Gao, 2007
Silice modifiée avec le PEI	**7**	**26,9**	**Cette étude**

La capacité d'adsorption de notre composite est comparable à celle de la plupart des autres adsorbants

4 Conclusion et Perspectives

Conclusion

Étude cinétique

► **Influence du pH et de T** :
Période de transition à pH 5 - 6

► **Polymérisation** :
Ordre 2 ➔ Réaction globale contrôlée par la dimérisation

Ordre 4 ➔ Phase initiale contrôlée par la formation de tétramères de SiO_2

Différents ordres ➔ Différents mécanismes

► **Énergie d'activation** :
De l'ordre de 41 à 54 kJ/mol

► **Relation k – pH** :
Dépendance linéaire pour pH 5 – 7

☞ Meilleure compréhension des conditions de précipitation de la silice

Caractérisation des précipités

Silice amorphe pH 6 – 7

Co-précipitation pH ≥ 8

☞ Optimisation conditions d'extraction

Valorisation de la silice

► **Fonctionnalisation**

Améliore adsorption du plomb

Pseudo - second ordre
➔ Liaisons covalentes entre adsorbant et adsorbat

Modèle de Redlich-Peterson
➔ Adsorption en monocouche

☞ Matériau efficace pour le traitement des eaux contaminées par le plomb

Remerciements

Je tiens à remercier

MERCI DE VOTRE ATTENTION