

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Developpement d'une outil de calcul de l'équilibre calcocarbonique (cas des eaux dessales).

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0017-18

APA Citation (توثيق APA):

Maddi, Faïçal (2019). Developpement d'une outil de calcul de l'équilibre calcocarbonique (cas des eaux dessales)[Thèse de master, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتمكين الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات، دوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

NATIONAL HIGHER SCHOOL FOR  
HYDRAULICS

"The MujahidAbdellah ARBAOUI"



المدرسة الوطنية العليا للري

"المجاهد عبد الله عرباوي"

ⵎⴰⵎⴰ ⵏ ⵙⵉⵎⵓⵔ ⵏ ⵙⵉⵎⵓⵔ ⵏ ⵙⵉⵎⵓⵔ ⵏ ⵙⵉⵎⵓⵔ

## MEMOIRE DE MASTER

*Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique*

**Option : ALIMENTATION EN EAU POTABLE**

**THEME :**

**DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE CALCUL DE  
L'EQUILIBRE CALCOCARBONIQUE  
(CAS DES EAUX DESSALEES)**

**Présenté par :**  
MADDI Faïçal

**Devant les membres du jury**

<b>Nom et Prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
AMMARI Abdelhadi	M.C.A	Président
KAHLERRAS Djillali	M.C.B	Examineur
AMMOUR Fadhila	M.A.A	Examineur
SALHI Chahrazed	M.A.A	Examineur
HACHEMI Abdelkader	M.C.B	Promoteur

**Session Septembre 2019**

# ***REMERCIEMENTS***

Je tiens à remercier et rendre grâce à DIEU le tout-puissant de m'avoir donné le courage et la volonté de terminer ce modeste travail.

Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de mon travail, particulièrement à:

Mes chers parents, mes frères et mes sœurs pour les encouragements qu'ils m'ont manifestés tout au long de mon parcours.

Mon promoteur Mr A.HACHEMI pour son encadrement et ses orientations judicieuses qui m'ont été infiniment utiles.

Mes remerciements vont également à:

Mr M.SLIMANI, Mr S.MOHAMED.

J'adresse également mes sincères remerciements à aux membres de jury et à tous ceux qui m'ont aidé dans ce travail, directement ou indirectement

***MADDI Faïçal***

# ***DEDICACES***

Mes parents

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes frères qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mes enseignants de l'ENSH qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

### ملخص

تمر تحلية مياه البحر أو المياه المالحة بعدة مراحل، بما في ذلك التوازن الكربوكلسي. يتضمن عملنا هذا، تقديم لمحة عامة عن التوازن الكربوكلسي وكذلك المشاكل الناتجة عن اختلاله، مثل تآكل الأنابيب أو تحجيمها وتدهور نوعية المياه. لقد أنشأنا واجهة معلوماتية لتسهيل استخدام برنامج التوازن الذي تم تطويره مسبقاً من قبل الطلاب. يتم تطبيق هذا البرنامج مع هذه الواجهة على الحالات الحقيقية لمحطات تحلية المياه مثل محطة تحلية المياه في فوكة في بوسماعيل.

**الكلمات المفتاحية:** تحلية، التوازن الكربوكلسي، برنامج، واجهة، تآكل.

### Résumé

Le dessalement des eaux mer ou des eaux saumâtres passe par plusieurs étapes, notamment l'équilibre calcocarbonique.

Notre travail a notamment consisté à donner un aperçu de l'équilibre calcocarbonique ainsi que les problèmes résultants de sa défaillance, tels que la corrosion d'eau ou l'entartrage des conduites et la dégradation de la qualité de l'eau.

Nous avons établi une interface graphique pour compléter un programme de calcul d'équilibre calcocarbonique développé précédemment par les étudiants.

Ce logiciel doté de cette interface est appliqué sur des cas réels de station de dessalement comme par exemple station de dessalement de Fouka à Bouissmail.

**Mots clé :** dessalement, équilibre, calcocarbonique, programme, corrosion

### Abstract

Desalination of seawater or brackish water goes through several stages, including the calcocarbonic balance. Our work consists in giving an overview of the calcocarbonic balance as well as the problems resulting from its failure, such as the corrosion or the scaling of the pipes and the deterioration of the quality of the water. We have established a graphical interface to facilitate using the equilibrium software previously developed by the students. This software with this interface is applied on real cases of desalination station such desalination of Fouka Bousmail.

**Key words :** desalination, balance, calcocarbonic, software, corrosion.

**TABLE DES MATIERES**

Résumé .....	i
TABLE DES MATIERES.....	ii
LISTE DES FIGURES .....	v
LISTE DES TABLEAUX .....	vii
LISTE DES ABREVIATIONS .....	viii

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

**CHAPITRE I**

**PRESENTATION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE FOUKA**

Introduction .....	3
I.1 Présentation de l'usine .....	3
I.2 Description de l'usine .....	3
I.2.1 Prise d'eau.....	3
I.2.2 Station de pompage .....	4
I.2.3 Système de prétraitement .....	4
I.2.4 Système d'Osmose inverse et réservoir de lavage des filtres .....	4
I.2.5 Traitement des effluents.....	5
I.2.6 Système de reminéralisation et de production de CO <sub>2</sub> .....	5
I.2.7 Station de pompage des eaux traitées.....	5
I.3. Les caractéristiques de l'eau à traiter .....	6
Conclusion.....	6

**CHAPITRE II**

**L'EQUILIBRE CALCOCARBONIQUE DE L'EAU**

Introduction .....	8
II.1 Définition de l'équilibre calcocarbonique .....	8
II.2 Les paramètres d'équilibre.....	9
II.2.1 Les éléments constitutifs de l'eau .....	9
II.2.2 Eléments caractéristiques.....	9
II.3 pH d'équilibre .....	9
II.3.1 Equations du pH d'équilibre .....	9
II.4 Les indices d'appréciations des eaux.....	12

## Table des matières

---

II.5 Les eaux agressives et les eaux incrustantes.....	13
II.6 Comment mettre l'eau à l'équilibre calcocarbonique .....	15
Conclusion.....	15

### CHAPITRE III

#### DEVELOPPEMENT DE MODELE NUMERIQUE

Introduction .....	17
III.1 Approche du pHs par des méthodes graphiques.....	17
III.1.1 Généralités.....	17
III.1.2 Le diagramme de Langelier.....	18
III.1.3 Modèle graphique de Tillmans.....	19
III.1.4 Méthode de Hallopeau et Dubin.....	19
III.1.5 méthode de Legrand et Poirier .....	21
III.2 Choix de modèle.....	23
III.3 Les méthodes de traitements .....	25
III.3.1 Traitement d'une eau aggressive .....	25
III.3.2 Traitement d'une eau incrustante .....	28
Conclusion.....	30

### CHAPITRE IV

#### APPLICATION NUMERIQUE

Introduction .....	32
IV.1 Les langages de programmation.....	32
IV.1.1 Généralités.....	32
IV.1.2 la Langage de programmation « Python » .....	33
IV.1.3 Pourquoi Python ? .....	33
IV.2 L'interface graphique «GUI » .....	34
IV.2.1 L'outil de conception de GUI « Qt Designer » .....	34
IV.2.2 Structure de l'interface graphique .....	34
IV.2.2.1 Etape de l'introduction des données initiales de l'eau .....	34
IV.2.2.2 Etape de l'appréciation de l'eau .....	35
IV.2.2.3 Etape de traitement.....	37
Application du programme équilibre sur la station de dessalement de Fouka :.....	39
Conclusion.....	45

## Table des matières

---

---

Conclusion générale .....	47
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	49
REFERENCE SITO-GRAPHIQUE.....	51
Annexes	

## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I

#### PRESENTATION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE FOUKA

<b>Figure I.1 :</b> Photo de prise d'eau .....	4
--	---

### CHAPITRE II

#### L'EQUILIBRE CALCOCARBONIQUE DE L'EAU

<b>Figure II.1 :</b> Valeurs des $pK_i$ pour différentes degrés de température.....	12
<b>Figure II.2 :</b> Présentation des zones d'existences des eaux dures/eaux douces et eaux entartrantes/eaux agressives en fonction du pH et du TAC.....	14
<b>Figure II.3 :</b> Les diverses formes sous lesquelles se trouve le $CO_2$ dans l'eau.....	14

### CHAPITRE III

#### DEVELOPPEMENT DE MODELE NUMERIQUE

<b>Figure III.1 :</b> Diagramme de Langelier.....	18
<b>Figure III.2 :</b> Graphique carbonique de Hallopeau et Dubin.....	20
<b>Figure III.3 :</b> Délimitation des différentes régions du plan.....	21
<b>Figure III.4 :</b> Point figuratif (M) et courbe d'équilibre.....	23
<b>Figure III.5 :</b> Présentation des deux points M1 et M2 dont l'abscisse est la même .....	25
<b>Figure III.6 :</b> Traitement d'une eau corrosive par l'ajout de la chaux.....	26
<b>Figure III.7 :</b> Traitement d'une eau corrosive par l'ajout de la soude .....	26
<b>Figure III.8 :</b> Traitement d'une eau corrosive par carbonatation.....	27
<b>Figure III.9 :</b> Traitement d'une eau corrosive par dolomite .....	28
<b>Figure III.10 :</b> Adoucissement d'une eau entartrante par l'ajout de la chaux.....	29
<b>Figure III.11 :</b> Adoucissement d'une eau entartrante par l'ajout de la soude.....	30

### CHAPITRE IV

#### APPLICATION NUMERIQUE

<b>Figure IV.1 :</b> Schéma qui définit le rôle de programmation .....	32
<b>Figure IV.2 :</b> Introduction des données initiales .....	35
<b>Figure IV.3 :</b> Etape d'appréciation.....	36
<b>Figure IV.4 :</b> Courbe d'équilibre de l'eau.....	36
<b>Figure IV.5 :</b> Traitement de l'eau par carbonatation.....	37
<b>Figure IV.6 :</b> Courbe d'équilibre du Traitement d'une eau agressive par la soude.....	38

## Liste des figures

---

<b>Figure IV.7</b> : fenêtre de l'étape de traitement d'une eau incrustante sous Qt Designer.....	38
<b>Figure IV.8</b> : Introduction des données initiales de l'eau de Fouka.....	39
<b>Figure IV.9</b> : Appréciation de l'eau de la station de Fouka .....	39
<b>Figure IV.10</b> : courbe d'équilibre de l'eau de la station Fouka.....	40
<b>Figure IV.11</b> : Traitement par la chaux de l'eau de la station de Fouka .....	41
<b>Figure IV.12</b> : Traitement par carbonatation de l'eau de la station de Fouka.....	41
<b>Figure IV.13</b> : Traitement par dolomite non calciné de l'eau de la station de Fouka .....	42
<b>Figure IV.14</b> : Courbe d'équilibre après le traitement par dolomite non calciné.....	43

**LISTE DES TABLEAUX**

CHAPITRE I

PRESENTATION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE FOUKA

**Tableau n° I.1** : Caractéristiques d'eau avant post-traitement ..... 6

CHAPITRE II

L'EQUILIBRE CALCOCARBONIQUE DE L'EAU

**Tableau n° II.1** : Les éléments fondamentaux dans l'eau ..... 9

**Tableau n° II.2** : Les éléments caractéristiques. .... 9

CHAPITRE IV

APPLICATION NUMERIQUE

**Tableau IV.1** : Comparaison entre les différentes méthodes traitements ..... 43

## LISTE DES ABREVIATIONS

- AEC : Algerian Energy Company ;
- $\mu$  : La force ionique ;
- K : Constante d'équilibre ;
- K<sub>s</sub> : Constante de solubilité ;
- K<sub>e</sub> : Constante d'équilibre de l'eau ;
- IL : Indice de Langelier ;
- IR : Indice de Ryznard ;
- Alc : Alcanité ;
- pH : Potentiel d'hydrogène ;
- GUI : Interface graphique ;
- pH<sub>s</sub> : pH d'équilibre calcocarbonique.

# **Introduction générale**

### Introduction générale

Le traitement des eaux est une étape nécessaire avant que l'eau atteigne les consommateurs, il existe plusieurs étapes du traitement rendant l'eau potable.

L'équilibre calcocarbonique est l'une des étapes les plus importantes du traitement, il vise à rendre l'eau ni agressive ni incrustante, ce qui contribue à la protection des réseaux de distribution et leurs équipements associés.

La station de dessalement de Fouka (W. Tipaza) utilise la technique de dessalement membranaire par osmose inverse, l'eau traitée est agressive qui nécessite une reminéralisation. Les méthodes reminéralisation utilisées dans la station de Fouka comprennent l'injection de chaux ainsi que l'ajout de CO<sub>2</sub> gazeux en quantités bien déterminées.

Il existe plusieurs modèles pour calculer l'équilibre calcocarbonique, y compris des modèles graphiques tels que le modèle de, Hallopeau et Dubin, Langelier, Tillmans et Legrand et Poirier. Le modèle de Legrand et Poirier est largement utilisé, il donne des résultats plus précis par rapport aux autres modèles car ce modèle prend en compte tous les paramètres affectant l'équilibre calcocarbonique.

Le code de calcul basé sur le modèle de Lagrande et Poirier qui était déjà établi est utilisé dans ce travail

Afin de faciliter l'utilisation de ce code nous allons y créer une interface interactive et intuitive.

Donc l'objectif de notre travail est de développer un programme générant cette interface en utilisant le langage Python.

Notre mémoire contient quatre chapitres est sont :

Le premier chapitre est la présentation de la station de dessalement de Fouka.

Le deuxième chapitre traitera l'équilibre calcocarbonique des eaux.

Le troisième chapitre est le calcul d'un modèle numérique de l'équilibre calcocarbonique.

Le quatrième chapitre présentera une application numérique de programme élaboré sur la station de dessalement de Fouka.

**Chapitre I :**  
**Présentation de la station  
de dessalement de Fouka**

## **CHAPITRE I**

# **PRESENTATION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE FOUKA**

### **Introduction**

Face au manque des ressources en eau douce en Algérie, le gouvernement a décidé de procéder au dessalement de l'eau de mer afin de combler ce manque.

Dans ce travail, nous avons choisi l'usine de dessalement d'eau de mer Fouka de Tipaza, où cette dernière s'emploie à renforcer l'approvisionnement en eau potable des provinces de Tipaza et d'Alger.

Nous donnerons un aperçu général de cette station et des diverses structures qui la composent, ainsi que certaines des informations dont nous aurons besoin dans les chapitres suivants.

### **I.1 Présentation de l'usine**

L'usine de dessalement d'eau de mer de Fouka a été construite sur la côte de Tipaza et mise en service en juillet 2001 pour produire 120 000 mètres cubes par jour. L'usine est gérée par la société MyahTipaza SPA. (myahtipaza.dz, 2019)

### **I.2 Description de l'usine**

#### **I.2.1 Prise d'eau**

La prise d'eau de mer se compose de deux 2 canalisations d'un diamètre de 1600 mm. L'absorption, qui se caractérise par des bouées (voir photo). (myahtipaza.dz, 2019)



**Figure I.1 :** Photo de prise d'eau. (myahtipaza.dz, 2019)

### **I.2.2 Station de pompage**

La station de pompage d'eau de mer relève l'eau jusqu'au système de filtration. Elle est constituée de 7 pompes (dont une de secours) de 230 kW refoulant 1.900 m<sup>3</sup>/h à 22m. (myahtipaza.dz, 2019)

### **I.2.3 Système de prétraitement**

Le prétraitement permet d'amener l'eau à la qualité nécessaire avant son passage sur les membranes d'osmose. Il est constitué de :

- Une injection de divers réactifs, qui permettent en particulier d'agglomérer les matières en suspension de manière à ce qu'elles soient retenues sur les filtres à sable (floculation) ;

- Un passage à travers des filtres (au nombre de 20) constitués d'une couche de sable et d'une couche d'anthracite (charbon) ;

- Le pompage est effectué à l'aide de sept pompes identiques pour atteindre un débit de 1.900 m<sup>3</sup>/h et une hauteur manométrique totale de 50 mètres. (myahtipaza.dz, 2019)

### **I.2.4 Système d'Osмосe inverse et réservoir de lavage des filtres**

L'eau filtrée est absorbée par des pompes puis pompée à travers des membranes d'osmose.

Environ la moitié de l'eau passe à travers les membranes, débarrassée d'une grande partie de son sel. L'autre moitié, très concentrée en sel, retourne à la mer après que son énergie a été récupérée, en passant par un réservoir qui sert à alimenter le lavage des filtres à sables et par un dispositif de traitement des effluents.

La production journalière de la station est de 120.000 m<sup>3</sup>. (myahtipaza.dz, 2019)

### **I.2.5 Traitement des effluents**

Les eaux rejetées sont acheminées vers le réservoir de traitement (neutralisation) des effluents et, de là, vers l'émissaire constitué d'une conduite en polyéthylène 1.400 mm de diamètre.

Le point de rejet, à 450 m de la côte, est équipé d'un diffuseur qui permet une dilution quasi immédiate des eaux de rejet dans l'eau de mer, afin de ne pas perturber les écosystèmes. (myahtipaza.dz, 2019)

### **I.2.6 Système de reminéralisation et de production de CO<sub>2</sub>**

Afin de reminéraliser l'eau traitée après son passage à travers les membranes, l'usine utilise la technique de carbonisation, qui consiste à injecter du dioxyde de carbone et à ajouter de la chaux.

### **I.2.7 Station de pompage des eaux traitées**

Après reminéralisation, l'eau est stockée dans un réservoir d'eau traitée de 3.600 m<sup>3</sup>, où elle subit une désinfection finale au Chlore.

L'eau est ensuite refoulée vers le réseau externe par 7 pompes (dont une de secours) de 800 kW débitant 833 m<sup>3</sup>/h à 240 m.

L'Usine dispose par ailleurs d'un réseau d'eau de service, d'un réseau incendie et d'un réseau d'eau potable. (myahtipaza.dz, 2019)

### I.3. Les caractéristiques de l'eau à traiter

**Tableau n° I.1** : Caractéristiques d'eau avant post-traitement

Paramètre		l'unité	Eau traitée
Température	T	°C	20
Calcium	Ca <sup>2+</sup>	mmole/l	0.6
Dioxyde de carbone libre	CO <sub>2</sub> libre	mmole/l	0.57
Potentiel hydrogène	pH	/	8.2
Hydrogénocarbonate	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mmole/l	1.44
Titre alcalimétrique complet	TAC	mmole/l	0.33
Magnésium	Mg <sup>2+</sup>	mmole/l	0.48
Sodium	Na <sup>+</sup>	mmole/l	4.9
Potassium	K <sup>+</sup>	mmole/l	0.11
Sulfate	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mmole/l	0.29
Chlorure	Cl <sup>-</sup>	mmole/l	5.91

(Station de dessalement Fouka, 2019)

### Conclusion

L'eau dessalée doit passer par un test d'équilibre calcocarbonique avant d'être pompée vers les réseaux de distribution.

Après le passage par membranes les eaux sortent non équilibrées vis-à-vis l'équilibre calcocarbonique (eaux agressives).

Il existe plusieurs techniques de reminéralisation visant à éliminer l'agressivité de l'eau, telles que la technique de carbonatation qui consiste l'injection de chaux et de gaz carbonique telle utilisée dans l'usine de dessalement de Fouka.

**Chapitre II :**  
**L'équilibre**  
**calcocarbonique de l'eau**

---

---

## CHAPITRE II

### L'EQUILIBRE CALCOCARBONIQUE DE L'EAU

#### Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons l'équilibre calcocarbonique et les divers paramètres inclus dans leur calcul, car il représente une étape importante dans la séquence de traitement et leur déséquilibre rend l'état de l'eau agressive ou inconstant, ce qui pose des problèmes de captage, adduction et de distribution.

#### II.1 Définition de l'équilibre calcocarbonique

L'équilibre calcocarbonique d'une eau est un état d'équilibre chimique dans lequel les concentrations en dioxyde de carbone, hydrogénocarbonates anciennement désignés par bicarbonates et carbonates ne varient pas en présence de carbonate de calcium.

Cet équilibre est un cas particulier des notions générales d'équilibre chimique.

Lorsque l'on soumet des eaux à un traitement complet avant leur distribution, il n'est pas rare que le pH de sortie soit inférieur à 6,5. La nécessité de limiter la corrosion des conduites de distribution en acier, amène le producteur à ajuster (par valeur supérieure) le pH à une valeur proche du pH d'équilibre, dit aussi pH de saturation (pH<sub>s</sub>) qui fait référence à l'équilibre du carbonate de calcium. Dans le même temps il est important de maintenir une eau qui ne soit ni trop douce, ni trop dure. (<https://fr.wikipedia.org/>, 2013)

La réaction chimique prépondérante est la suivante : (LEGRAND, 1981)



## II.2 Les paramètres d'équilibre

### II.2.1 Les éléments constitutifs de l'eau

Ce sont les éléments qui apparaissent dans la réaction (II.1)

**Tableau n° II.1** : Les éléments fondamentaux dans l'eau.

Cations		Anions		Molécules	
Hydronium	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	Hydroxyle	OH <sup>-</sup>	Eau	H <sub>2</sub> O
Calcium	Ca <sup>2+</sup>	Carbonate	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	acide carbonique	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
		Hydrogénocarbonate	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		

(DEGREMONT, 1995)

### II.2.2 Eléments caractéristiques

C'est qui leurs concentrations diffèrent d'une eau à l'autre

**Tableau n° II.2** : Les éléments caractéristiques.

Cations		Anions	
Magnésium	Mg <sup>2+</sup>	Sulfate	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Sodium	Na <sup>+</sup>	Chlorure	Cl <sup>-</sup>
Potassium	K <sup>+</sup>	Nitrate	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>

(DEGREMONT, 1995)

## II.3 pH d'équilibre

Pour une eau en équilibre, son pH est égale au PH d'équilibre ou appelé pH de saturation. (pHs). Pour mettre une eau à l'équilibre il faut ajuster son pH à la valeur de son PHs.

### II.3.1 Equations du pH d'équilibre (LEGRAND, 1981)

- Dissociation du carbonate de calcium



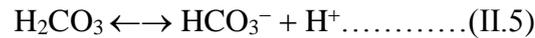
La constante de solubilité est défini par

$$K'_s = [\text{CO}_3^{2-}].[Ca^{2+}] \dots\dots\dots(\text{II.3})$$

- Dissolution du CO<sub>2</sub> gazeux dans l'eau



A son tour le  $H_2CO_3$  donne :



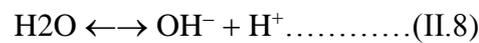
La constante d'équilibre est donnée  $K'_1$  par :

$$K'_1 = \frac{[HCO_3^-] \cdot [H^+]}{[H_2CO_3]} \dots \dots \dots (II.6)$$

La constante d'équilibre  $K'_2$  est donnée par :

$$K'_2 = \frac{[CO_3^{2-}] \cdot [H^+]}{[HCO_3^-]} \dots \dots \dots (II.7)$$

- L'équilibre de dissociation de l'eau



La constante d'équilibre de l'eau est donnée par :

$$[H^+] \cdot [OH^-] = K'_e \dots \dots \dots (II.9)$$

- L'alcalinité

$$2[alc] = 2[CO_3^{2-}] + [HCO_3^-] + [OH^-] - [H^+] \dots \dots \dots (II.10)$$

**N.B :** On exprime les constantes d'équilibre  $K_i$  en fonction des activités des ions ( ) et non pas par les concentrations [ ].

$$(I) = \gamma[I] \dots \dots \dots (II.11)$$

$$\log \gamma = -A \left[ \frac{\sqrt{\mu}}{1 + \sqrt{\mu}} - 0.3\mu \right] \dots \dots \dots (II.12)$$

Avec :

$\gamma$  : Le coefficient d'activité ;

$\mu$  : La force ionique ;

$$A = 1.82 \times 10^6 (\epsilon \theta)^{-1.5} ;$$

$\epsilon$  : Constante diélectrique de l'eau (égal à 78.3) ;

$\theta$  : Température (°K).

La relation entre les  $pK_i$  et les  $pK'_i$  est comme suit :

$$pK'e = pK_e + \log \gamma_1 \dots\dots\dots (II.13)$$

$$pK1' = pK1 + \log \gamma_1 \dots\dots\dots (II.14)$$

$$pK'2 = pK2 + \log \gamma_2 \dots\dots\dots (II.15)$$

$$pKS' = pKS + \log \gamma_2 \dots\dots\dots (II.16)$$

La résolution simultanée des équations (II),(II.7),(II.9) et (II.10) permet de trouver l'expression du PHs entre 6.5 et 9.5 :

$$pH_s = pK'2 + pCa^{2+} - pKs' - \log [alc] - \log \gamma_1 \dots\dots\dots (II.17)$$

Avec

- les concentrations sont en mol/l
- Alc : en mol/l CaCO<sub>3</sub>

L'équation (II.17) permet de calculer le pH d'équilibre d'une eau.

Voici les valeurs des constantes d'équilibres de pk1 d'après (LEGRAND, 1981):

$$pK1 = -646.10^{-9}t^3 + 163,5.10^{-6}t^2 - 12,3.10^{-3}t + 6,583 \dots\dots\dots (II.18)$$

$$pK2 = -328.10^{-9}t^3 + 135,3.10^{-6}t^2 - 15,04.10^{-3}t + 10,627 \dots\dots\dots (II.19)$$

$$pK_e = -1,49.10^{-6}t^3 + 270.10^{-6}t^2 - 43,44.10^{-3}t + 14,940 \dots\dots\dots (II.20)$$

$$pKs = 444.10^{-9}t^3 + 61.10^{-6}t^2 - 14.10^{-3}t + 8,022 \dots\dots\dots (II.21)$$

Temperature (°C)	pK <sub>e</sub>	pK <sub>1</sub>	pK <sub>2</sub>	pK <sub>s</sub>	pK <sub>2</sub> - pK <sub>s</sub> <sup>(1)</sup>
0	14.94	6.58	10.63	8.02	2.61
10	14.53	6.48	10.49	8.15	2.34
18	14.24	6.41	10.40	8.26	2.14
20	14.17	6.39	10.38	8.28	2.10
25	14.00	6.37	10.33	8.34	1.99
30	13.84	6.34	10.29	8.39	1.90
40	13.54	6.31	10.22	8.51	1.71
50	13.26	6.30	10.17	8.62	1.55
60	13.02	6.30	10.14	8.74	1.40
70	12.70	6.30	10.12	8.86	1.26
80	12.30	6.31	10.12	8.97	1.15

1. Information provided for calculating pH<sub>s</sub>.

Figure II.1. : Valeurs des pKi pour différentes degrés de température (suezwaterhandbook.fr, 2019)

### II.4 Les indices d'appréciations des eaux

Via l'indice d'appréciation on peut savoir rapidement l'état d'équilibre d'une eau.

#### a. Indices de Langelier IL

$$IL = pH - pH_s \dots\dots\dots (II.22) \text{ (RAYMOND.D, 1999)}$$

- Si IL < 0 l'eau est agressive
- Si IL > 0 l'eau est incrustante
- Si IL = 0 l'eau est en équilibre

#### b. Indice de Ryznard IR

$$IR = 2pH_s - pH \dots\dots\dots (II.23) \text{ (RAYMOND.D, 1999)}$$

- IR > 7 eau agressive
- IR < 7 eau incrustante

**NB :** Il faut que l'eau soit légèrement incrustante.

### c. L'indice de Larson

Cet indice est défini de la manière suivante :

$$I_c = \frac{([Cl^-] + 2 \cdot [SO_4^{2-}])}{[HCO_3^-]} \dots\dots\dots (II.24) \quad (\text{RAYMOND.D, 1999})$$

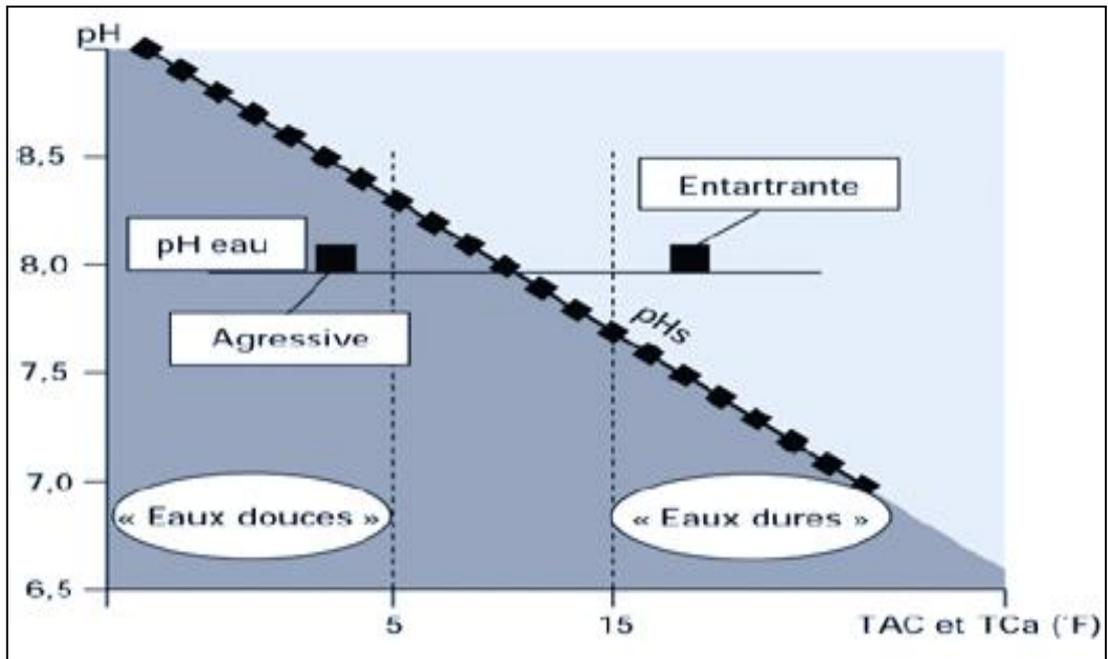
- $IC < 0,2$                       Pas de tendance à la corrosion
- $0,2 < IC < 0,4$               Faible tendance
- $0,4 < IC < 0,5$               Légère tendance
- $0,5 < IC < 0,1$               Tendance moyenne

## II.5 Les eaux agressives et les eaux incrustantes

A une minéralisation donnée (TH et TAC définies), Tillmans a montré qu'il existe un pH dit pH de saturation pHs ou pH d'équilibre au-delà duquel une précipitation des ions calcium et bicarbonate est observée sous forme de carbonate de calcium (calcaire). Ce précipité (couche de Tillmans) joue un rôle protecteur des parties métalliques vis-à-vis de l'eau. (BOURAS, 2017)

Les eaux peuvent donc être classées en fonction de la valeur de leur pH par rapport à leur pHs :

- Si le  $pH > pH$  d'équilibre, les eaux ont tendance à déposer du  $CaCO_3$ , elles sont dites "entartrantes" ;
- Si le  $pH < pH$  d'équilibre, les eaux ont tendance à dissoudre du carbonate de calcium, elles sont dites "agressives". (BOURAS, 2017)

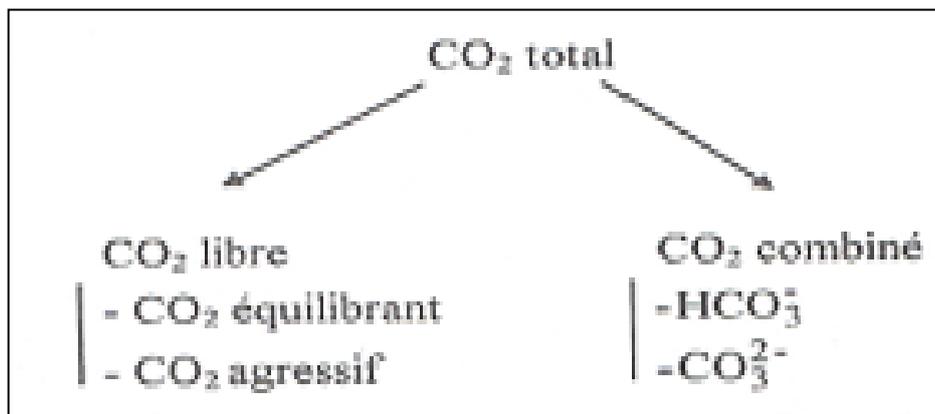


**Figure II.2 :** Présentation des zones d'existences des eaux dures/eaux douces et eaux entartrantes/eaux agressives en fonction du pH et du TAC. (DEGREMONT, 1995)

La relation entre le CO<sub>2</sub> libre - CO<sub>2</sub> agressif - CO<sub>2</sub> équilibrant :

- Une eau à l'équilibre (pH = pHs) contient une quantité souvent faible, mais non nulle, de CO<sub>2</sub>, celui-ci est dit "équilibrant" ;
- Une eau agressive contiendra plus de CO<sub>2</sub> qu'une eau à l'équilibre, le CO<sub>2</sub> agressif est donc défini comme la différence entre le CO<sub>2</sub> libre et le CO<sub>2</sub> à l'équilibre ;
- CO<sub>2</sub> libre est la somme de CO<sub>2</sub> équilibrant et CO<sub>2</sub> agressif. (BOURAS, 2017)

La figure II.2 montre les diverses formes sous lesquelles on rencontre le dioxyde de carbone dans l'eau.



**Figure II.3 :** Les diverses formes sous lesquelles se trouve le CO<sub>2</sub> dans l'eau. (DEGREMONT, 1995)

## **II.6 Comment mettre l'eau à l'équilibre calcocarbonique**

Il y a typiquement deux problèmes distincts : corriger une eau agressive et corriger une eau incrustante, la correction d'une eau agressive peut s'effectuer de plusieurs façons :

- Par l'ajout de chaux ;
- Par passage sur lit filtrant. ;
- Par l'ajout de soude ;
- Par la carbonatation.

Pour la correction d'une eau incrustante, l'adoucissement de l'eau est le procédé envisageable qui se traduit soit par :

- La précipitation chimique ;
- L'échange d'ions ;
- Par la séparation membranaire. (BOURAS, 2017)

### **Conclusion**

Il est recommandé que l'eau soit dans un état d'équilibre calcocarbonique ou légèrement incrustante. Nous avons fourni une vue générale sur l'équilibre calcocarbonique et les méthodes utilisées pour le calculer, Tout cela afin de déterminer le type de post-traitement soit refiltrer l'eau ou la reminéraliser.

Il est à noter que dans la plupart des cas, l'eau traitée est dans un état agressive, ce qui nécessite un processus de post-traitement appelé la reminéralisation.

.

**Chapitre III :**  
**Développement de**  
**modèle numérique**

---

## CHAPITRE III

### DEVELOPPEMENT DE MODELE NUMERIQUE

#### Introduction

Afin de faciliter l'étude d'équilibre calcocarbonique, des nombreux chercheurs ont développé des modèles graphiques permettant à savoir l'état de l'eau si elle en équilibre, agressive ou incrustante.

Ces modèles sont très pratiques dans la détermination de type de post-traitement, soit la reminéralisation si l'eau est agressive ou l'adoucissement si l'eau est incrustante.

Dans ce chapitre, nous choisirons l'un de ces modèles. Notre travail est basé sur les mêmes équations que celles utilisées dans le modèle graphique, mais nous les avons appliquées numériquement.

#### III.1 Approche du pHs par des méthodes graphiques

##### III.1.1 Généralités

Les méthodes des indices d'appréciation bien qu'elles permettent de savoir si l'eau est agressive ou incrustante, elles ne permettent pas de déterminer comment mettre l'eau à l'équilibre ni de nous donner le taux de traitement nécessaire.

Les modèles graphiques consistent à représenter l'eau dans un plan (xy). Ils permettent :

- Savoir l'état de l'eau (incrustante ou agressive).
- Les différents cas de la mise en équilibre
- Les taux de traitement appliqués.

Il existe plusieurs modèles graphiques on cite :

- Modèle de Tillmans ;
- Modèle de Hallopeau et Dubin ;
- Modèle de Legrand –Poirrier.

Pour mémoire c'est à Tillmans que l'on doit la notion de protection des métaux par une couche protectrice de carbonates de fer et de calcium. (suezwatnerhandbook.fr, 2019)

### III.1.2 Le diagramme de Langelier

Langelier a introduit la notion de pH comparé au pHs, d'où la définition de l'indice de Langelier : IL ou IS (Indice de Saturation) =  $\text{pH} - \text{pH}_s$  ; donc :  $\text{IS} = 0$  : eau à l'équilibre,  $\text{IS} < 0$  : eau agressive,  $\text{IS} > 0$  : eau incrustante.

Pour la détermination de ce pHs, Langelier a établi un graphique faisant intervenir l'alcalinité et le calcium, exprimés en  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ , et la salinité totale (extrait sec en  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ).

Ce diagramme tient compte de la température et de la salinité jusqu'à environ  $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  mais ne permet pas le calcul des doses de réactifs de « neutralisation ». (suezwaterhandbook.fr, 2019)

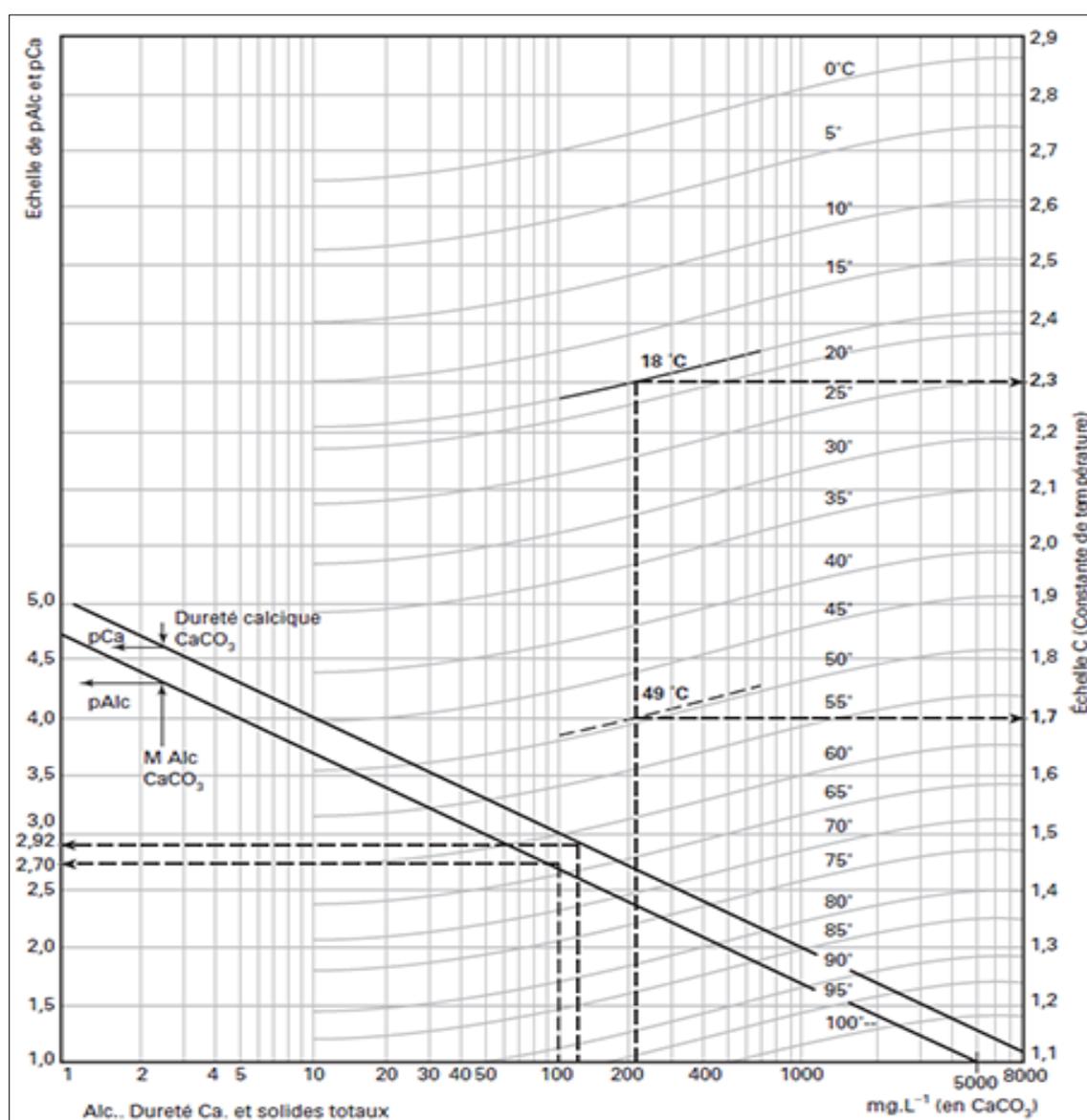


Figure III.1 : Diagramme de Langelier (suezwaterhandbook.fr, 2019)

### III.1.3 Modèle graphique de Tillmans

Ce modèle consiste à représenter l'eau sur un plan de coordonnées CO<sub>2</sub> libre dans l'eau en axe des ordonnées et Ca<sup>2+</sup> en axe des abscisses.

#### Hypothèse :

Tillmans suppose que l'eau à étudier est une solution de Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.

Donc [Ca<sup>2+</sup>] = [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>].

Pour déterminer l'équation de la courbe d'équilibre :

$$\text{H}_2\text{CO}_3 = f([\text{Ca}^{2+}] = 0.5 [\text{HCO}_3^-]) \dots \dots \dots (\text{III.1})$$

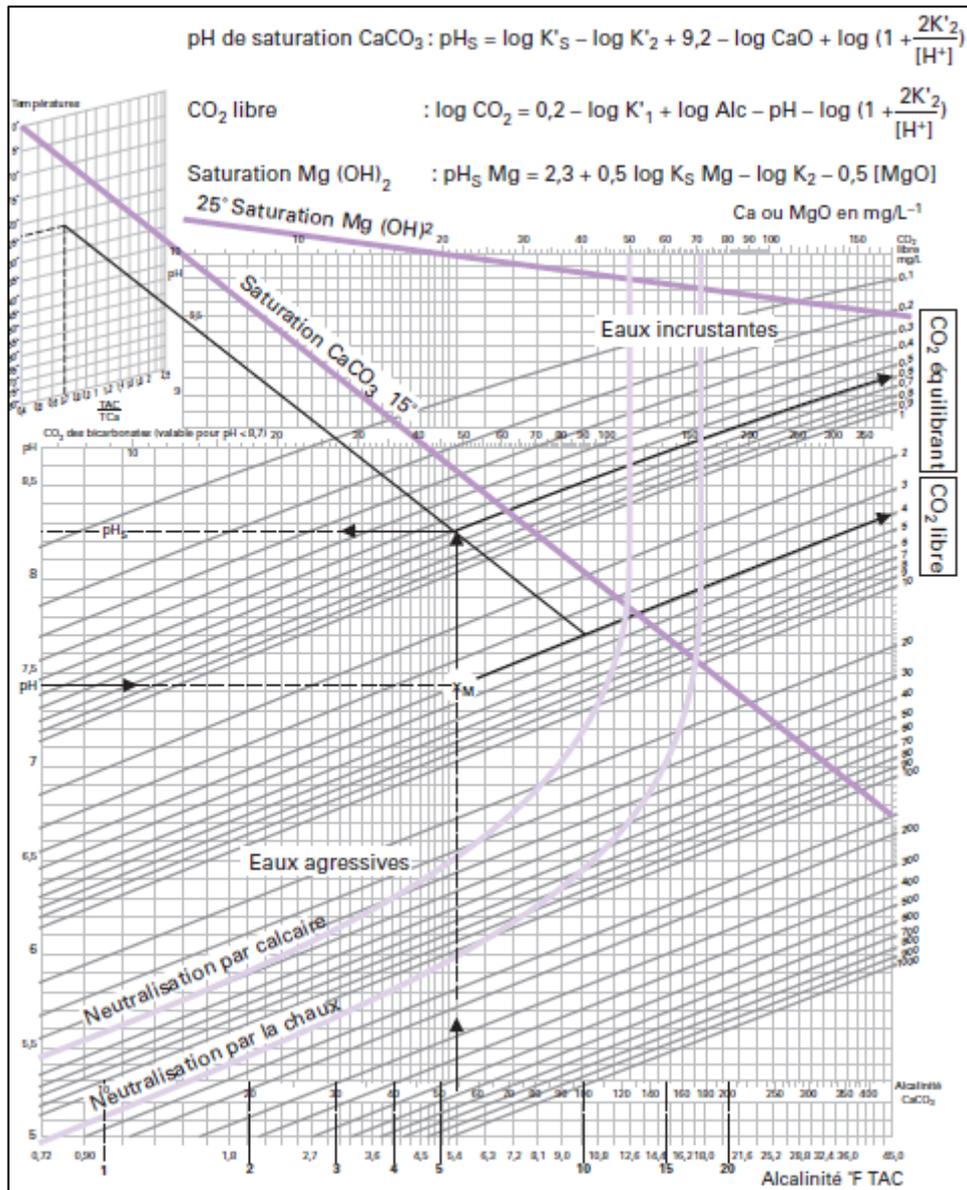
### III.1.4 Méthode de Hallopeau et Dubin

Ces auteurs ont établi une méthode graphique permettant de caractériser quantitativement la teneur en CO<sub>2</sub> libre d'une eau et sa fraction agressive au calcaire, de calculer les quantités de réactifs de neutralisation et de prévoir les caractéristiques de l'eau après correction pour ajuster le pH à la valeur de l'équilibre calcocarbonique.

En exprimant le pH d'équilibre en fonction des logarithmes de l'alcalinité (mesurée par le TAC et exprimée en mol · L<sup>-1</sup>) et de la dureté calcique (en mol · L<sup>-1</sup>), on a :

Dans ce graphique (figure III.2), CO<sub>2</sub> libre et pH d'équilibre sont alors représentés par deux familles de droites parallèles. Pour une eau donnée, le pH<sub>S</sub> est déterminé par l'intersection entre :

La verticale tracée à partir du point représentatif M, défini par le TAC et le pH de l'eau ; et la parallèle à la droite de « saturation CaCO<sub>3</sub> à 15 °C », tracée à partir du point représentatif de l'eau dans le diagramme auxiliaire de gauche, qui comporte les valeurs du rapport TAC/TCa en abscisses et de la température en ordonnées. (suezwaterhandbook.fr, 2019)



**Figure III.2 :** Graphique carbonique de Hallopeau et Dubin (suezwaterhandbook.fr, 2019)

Si le point M se trouve déjà sur une telle droite, l'eau est à l'équilibre calcocarbonique ; au-dessous, elle est agressive, au-dessus elle est incrustante.

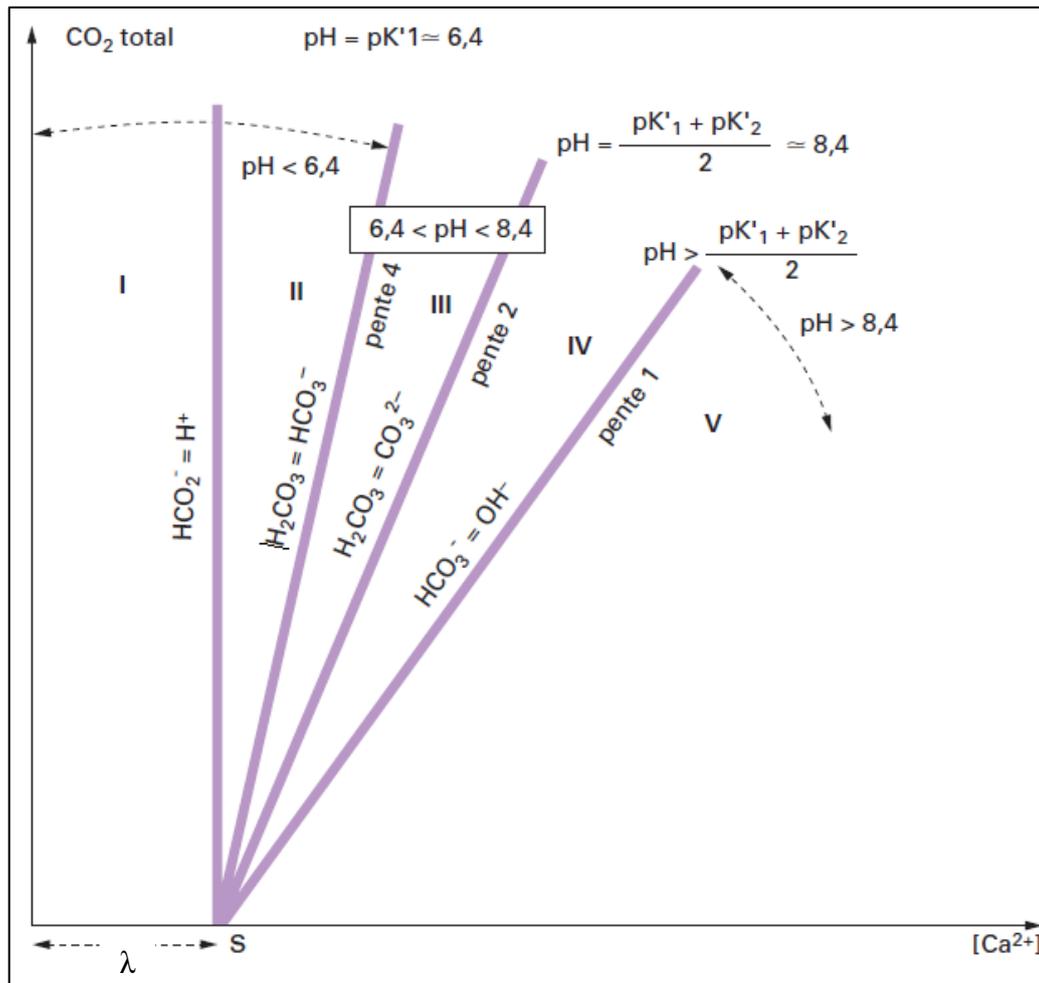
Le graphique donne également le pHs correspondant à la précipitation de Mg(OH)<sub>2</sub> à 25 °C soit :

Connaissant le pH et l'alcalinité d'une eau, on peut aussi déterminer le CO2 libre et le CO2 équilibrant (sur l'échelle de droite, en suivant un chemin parallèle au réseau de droites obliques). Le graphique met en évidence les courbes de dissolution ou d'évasion physique du CO2 et les courbes de neutralisation par la chaux (ou la soude) ou par le calcaire (ou Na2CO3) : ces dernières sont obtenues en traçant, à partir du point représentatif de l'eau,

une courbe parallèle à la courbe de base correspondante, telle qu'obtenue par translation parallèle à l'axe des abscisses. (suezwaterhandbook.fr, 2019)

### III.1.5 méthode de Legrand et Poirier

C'est une représentation de l'eau dans un système de coordonnées  $Ca^{2+}$  (mmole/l) en axe des abscisses et  $CO_2$  total (mmole/l) en axe des ordonnées (Voir figure III.3).



**Figure III.3 :** Délimitation des différentes régions du plan ( $T = 20\text{ °C}$ ) (suezwaterhandbook.fr, 2019)

Ils justifient ce choix par les avantages qui en découlent :

- les échelles sont arithmétiques (en principe en millimole  $\cdot L^{-1}$ ), ce qui permet d'éviter le rejet des origines à l'infini ;
- Les concentrations de tous les éléments fondamentaux y apparaissent immédiatement ;
- Les déplacements du point figuratif de l'eau s'y effectuent pratiquement toujours suivant des droites ou suivant la courbe d'équilibre ;

- Enfin, la pratique d'un traitement se traduit sur ce graphique soit par un déplacement du point figuratif, soit par une modification de la courbe d'équilibre, soit par les deux à la fois (suezwaterhandbook.fr, 2019).

Pour avoir l'équilibre ionique il faut :

La somme des charges positives = la somme des charges négatives

Si N et P représentent les sommes respectives des ions secondaires positifs et négatifs tel que :

$$P = 2.[Mg^{2+}] + [Na^+] + [K^+]$$

$$N = [Cl^-] + [NO_3^-] + 2.[SO_4^{2-}]$$

En posant :

$$\frac{N-P}{2} = \lambda \dots \dots \dots (III.2)$$

La relation de neutralité électrique devient :

$$[HCO_3^-] = 2([Ca^{2+}] - \lambda) - 2[CO_3^{2-}] - [OH^-][H^+] \dots \dots \dots (III.2)$$

Et, en ajoutant à chaque membre l'expression  $[CO_3^{2-}] + [H_2CO_3]$

$$CO_2 \text{ total} = 2([Ca^{2+}] - \lambda) + [H_2CO_3] - [CO_3^{2-}] - [OH^-][H^+] \dots \dots \dots (III.3)$$

La courbe sur laquelle figurent toutes les eaux à l'équilibre calcocarbonique, pour des valeurs données de la température et du paramètre  $\lambda$ , est du type représenté sur la figure III.3 ; cette figure donne en outre l'exemple du point figuratif M d'une eau donnée, agressive, vu sa position par rapport à la courbe d'équilibre et les renseignements que l'on peut en tirer vis-à-vis des caractéristiques de l'eau (en particulier la proportion de  $CO_2$  agressif dans la teneur totale en  $CO_2$  libre). (suezwaterhandbook.fr, 2019)

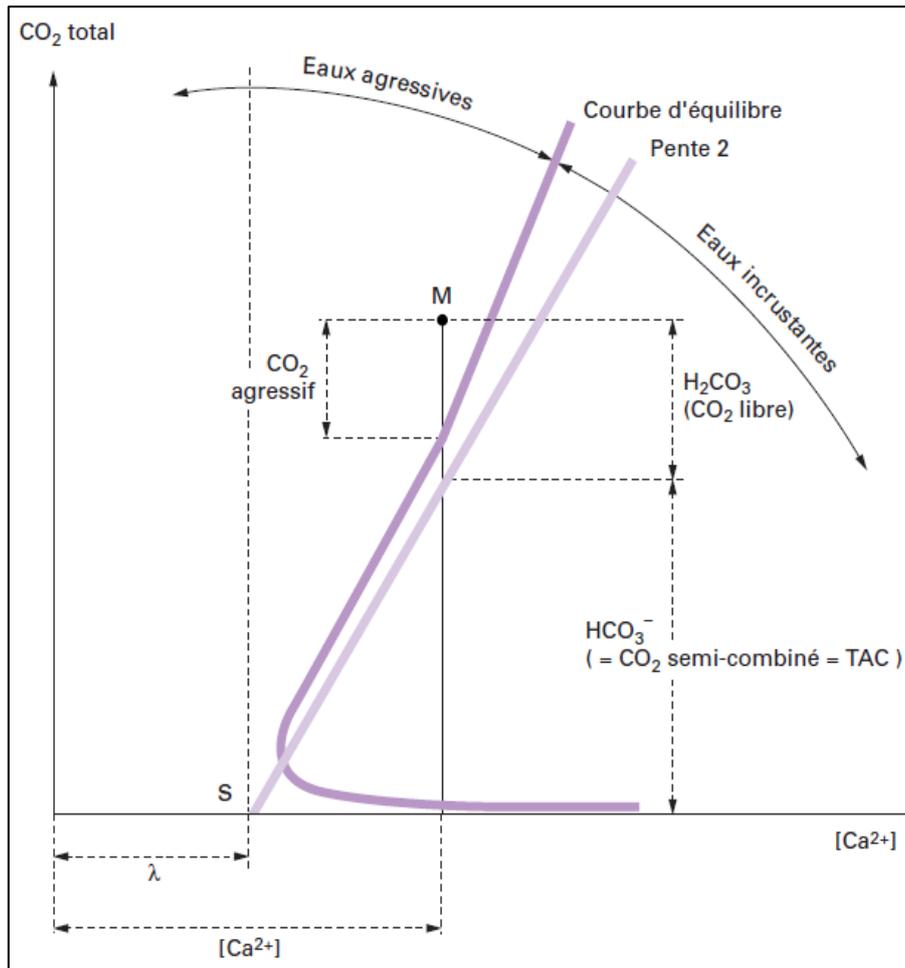


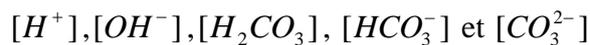
Figure III.4 : Point figuratif (M) et courbe d'équilibre (suezwaterhandbook.fr, 2019)

### III.2 Choix de modèle

Nous avons choisi les modèles de Legrand et Poirier, car il prend en compte tous les paramètres inclus dans le calcul d'équilibre calcocarbonique, ce qui lui confère une plus grande précision, ainsi que la facilité de lecture des informations du diagramme.

Le but c'est de développer une fonction qui permet de tracer les variations de  $CO_2$ total en fonction de calcium  $Ca^{2+}$  c.-à-d.  $CO_2$ total = f ( $Ca^{2+}$ )

Nous avons les cinq inconnus suivant :



Afin de trouver ces inconnues, nous allons résoudre le système de cinq équations suivantes :

$$K'_1 \cdot [H_2CO_3] = [HCO_3^-] \cdot [H^+] \dots\dots\dots (III.4)$$

$$K'_2 \cdot [HCO_3^-] = [CO_3^{2-}] \cdot [H^+] \dots\dots\dots (III.5)$$

$$[H^+].[OH^-] = K'_e \dots\dots\dots (III.6)$$

$$CO_2 \text{ total} = [H_2CO_3] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] \dots\dots\dots (III.7)$$

$$2.([Ca^{2+}] - \lambda) = [HCO_3^-] + 2.[CO_3^{2-}] + [OH^-] - [H^+] \dots\dots\dots (III.8)$$

La résolution simultanée de ces équations permet de trouver l'équation de 3<sup>ème</sup> degré reliant le CO<sub>2</sub>total et le Ca<sup>2+</sup>. (LEGRAND, 1981)

$$CO_2 \text{ total} = \frac{[H^+] - \frac{K'_e}{[H^+]} + 2.([Ca^{2+}] - \lambda)}{2 + \frac{[H^+]}{K'_2}} \left(1 + \frac{[H^+]}{K'_2} + \frac{[H^+]^2}{K'_1.K'_2}\right) \dots\dots\dots(III.9)$$

On utilise les mêmes équations pour trouver la relation de H<sup>+</sup>, on a trouvé : (LEGRAND, 1981)

$$[H^+] = \frac{[Ca^{2+}] - \lambda - \frac{K'_s}{[Ca^{2+}]} \pm \sqrt{\left([Ca^{2+}] - \lambda - \frac{K'_s}{[Ca^{2+}]}\right)^2 - \frac{K'_e}{K'_2} \frac{K'_s}{[Ca^{2+}]}}}{\frac{K'_s}{K'_2} \frac{1}{[Ca^{2+}]}} \dots\dots\dots (III.10)$$

**N.B :** [H<sup>+</sup>] prend deux valeurs et ce qui nous donne les deux branches de la courbe C

- Branche ascendante pour la valeur grande de [H<sup>+</sup>].
- Branche descendante pour la valeur petite de [H<sup>+</sup>].

Donc on peut tracer facilement la fonction CO<sub>2</sub>total = f (Ca<sup>2+</sup>).

**N.B :** Pour une seule valeur de [Ca<sup>2+</sup>] il existe deux points figuratifs M1 et M2, c.-à-d. pour même quantité de CO<sub>2</sub>total il y a la possibilité d'avoir deux eaux en équilibre.

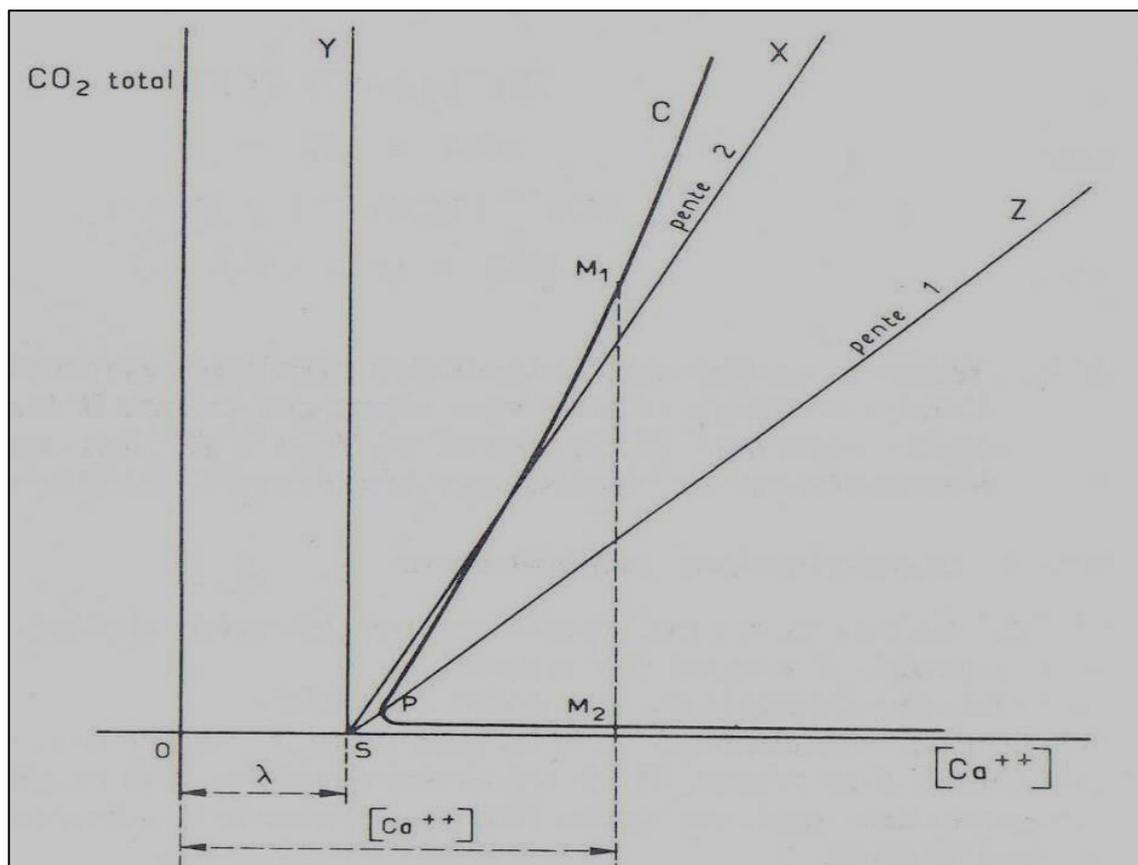


Figure III.5 : Présentation des deux points M1 et M2 dont l'abscisse est la même. (LEGRAND, 1981)

### III.3 Les méthodes de traitements

#### III.3.1 Traitement d'une eau agressive

- Par l'ajout de la chaux ( $Ca(OH)_2$ ) :

La longueur de segment  $M_0M_1$  représente la quantité de  $[Ca^{2+}]$  ajouter pour atteint l'équilibre (Voir Figure III.6).

Donc la dose de chaux à ajouter  $D_{CH}$  en (mg/L) :

$$D_{CH} = (CaM_1 - CaM_0).74 \dots \dots \dots (III.11) \text{ (LEGRAND, 1981)}$$

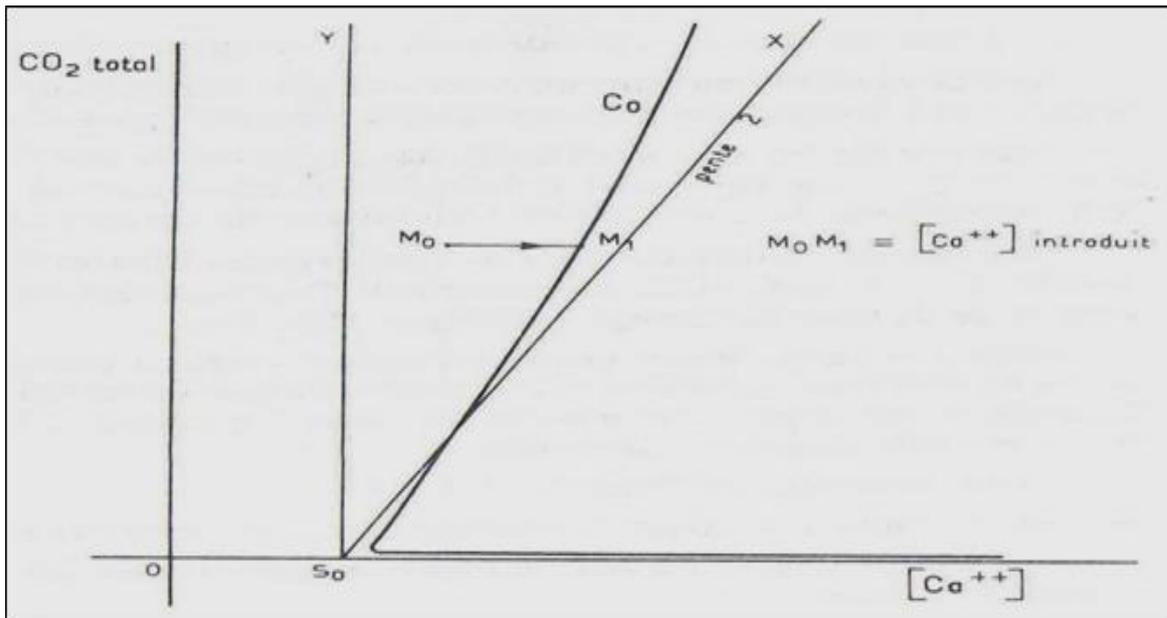


Figure III.6 : Traitement d’une eau corrosive par l’ajout de la chaux (LEGRAND, 1981)

• Par l’ajout de la soude (NaOH )

Comme la figure (III.7) représente, après l’ajout de soude une nouvelle courbe d’équilibre sera établit, La dose de la soude est donnée par l’équation (III.12)

$$D_{soude} = 2.(\lambda_0 - \lambda_1).40 \dots\dots\dots (III.12)$$

Avec :

-  $\lambda_0$  : Coefficient qui représente les éléments caractéristiques avant l’ajout de NaOH ;

$\lambda_1$  : Coefficient qui représente les éléments caractéristiques après l’ajout de NaOH .  
(BOURAS, 2017)

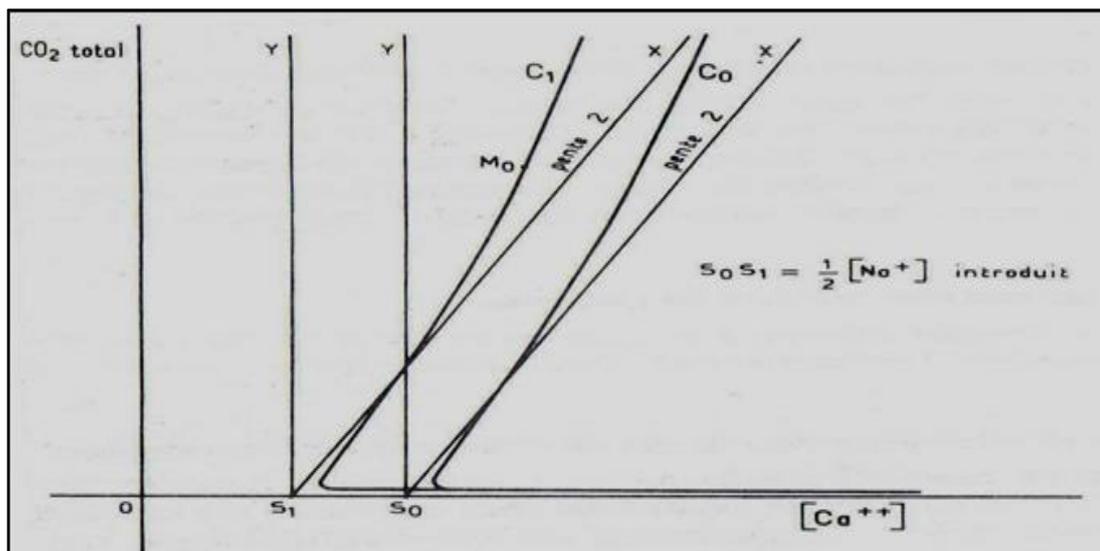


Figure III.7 : Traitement d’une eau corrosive par l’ajout de la soude (LEGRAND, 1981)

- **La carbonatation**

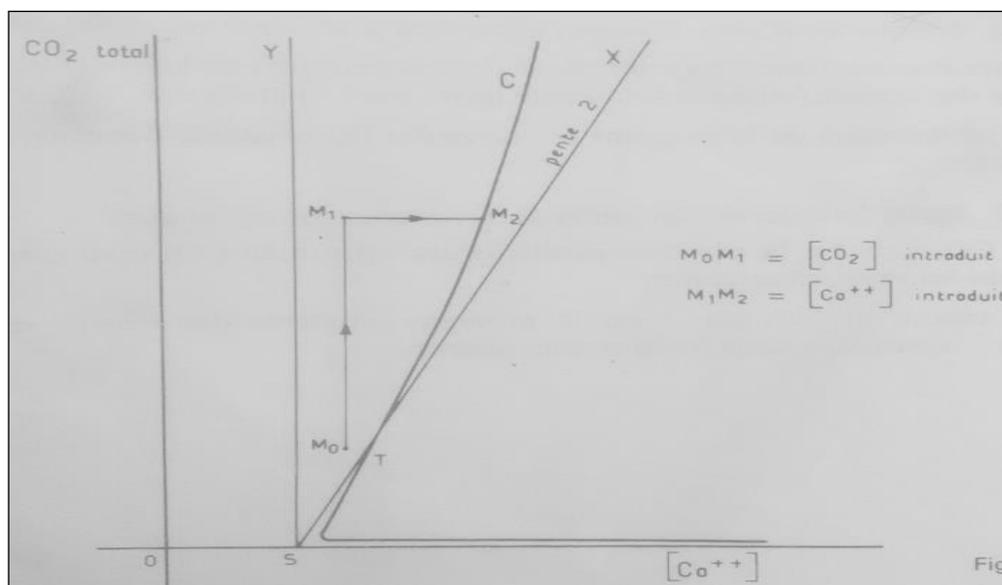
Il est alors nécessaire d'introduire le dioxyde de carbone avec la chaud (le plus utilisé) afin d'aboutir à une eau légèrement calcifiante et dont le point figuratif soit suffisamment éloigné du point T voir (figure III.8) :

Déplace le point figuratif de l'eau, initialement en  $M_0$ , passant par le point  $M_1$  ;

Ne modifie pas : la courbe d'équilibre et la position du point S.

Après traitement l'eau est figurée en  $M_2$  sur la courbe C. La dose de réactif à introduire est déterminée à partir de la longueur du segment  $[M_0M_1]$  et  $[M_1M_2]$ .

(BOURAS, 2017)

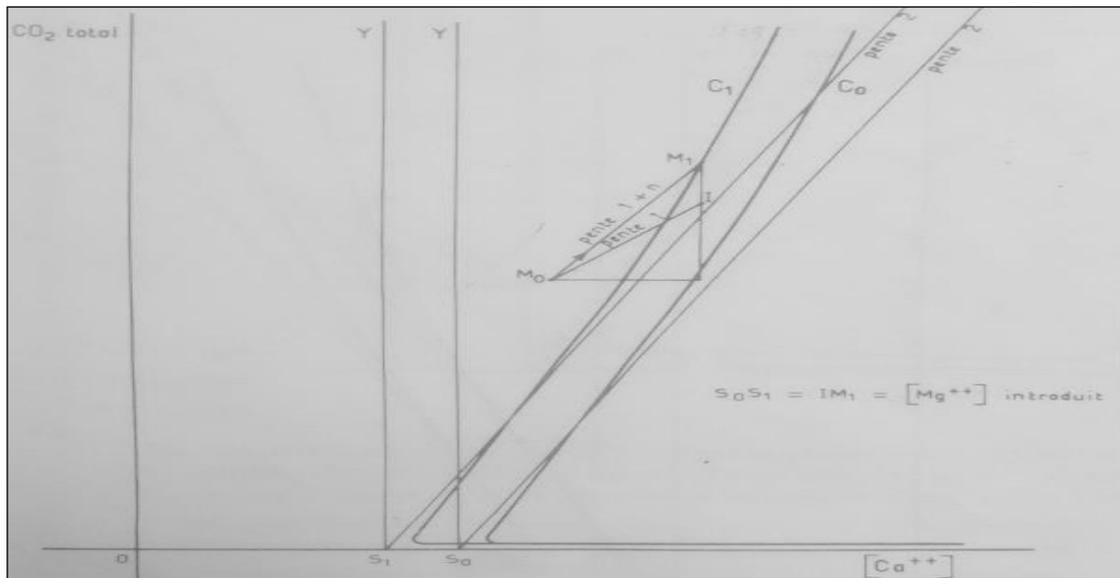


**Figure III.8 :** Traitement d'une eau corrosive par carbonatation. (LEGRAND, 1981)

- **Passage par lit filtrant de dolomite ( $\text{CaCO}_3$ ,  $n\text{MgCO}_3$ )**

L'addiction de ce réactif à une eau représentée en  $M_0$  (figure III.9) :

- Déplace le point figuratif de l'eau sur une courbe que l'on assimile ici à la demi droite de pente  $1+n$ , issue de  $M_0$ . ( $n = 0.5$ )
- Modifie la courbe d'équilibre, représentée initialement en  $C_0$ .
- Déplace vers la gauche le point S, d'une longueur égale à différence entre la projection sur l'axe des ordonnées du déplacement du point figuratif de l'eau et la projection sur l'axe des abscisses de ce déplacement.
- Après traitement l'eau est figurée en  $M_1$  sur la nouvelle courbe d'équilibre  $C_1$ . La dose de réactif à introduire est déterminée à partir de la longueur du segment  $[S_0S_1]$ . (BOURAS, 2017)



**Figure III.9 :** Traitement d'une eau corrosive par dolomite. (LEGRAND, 1981)

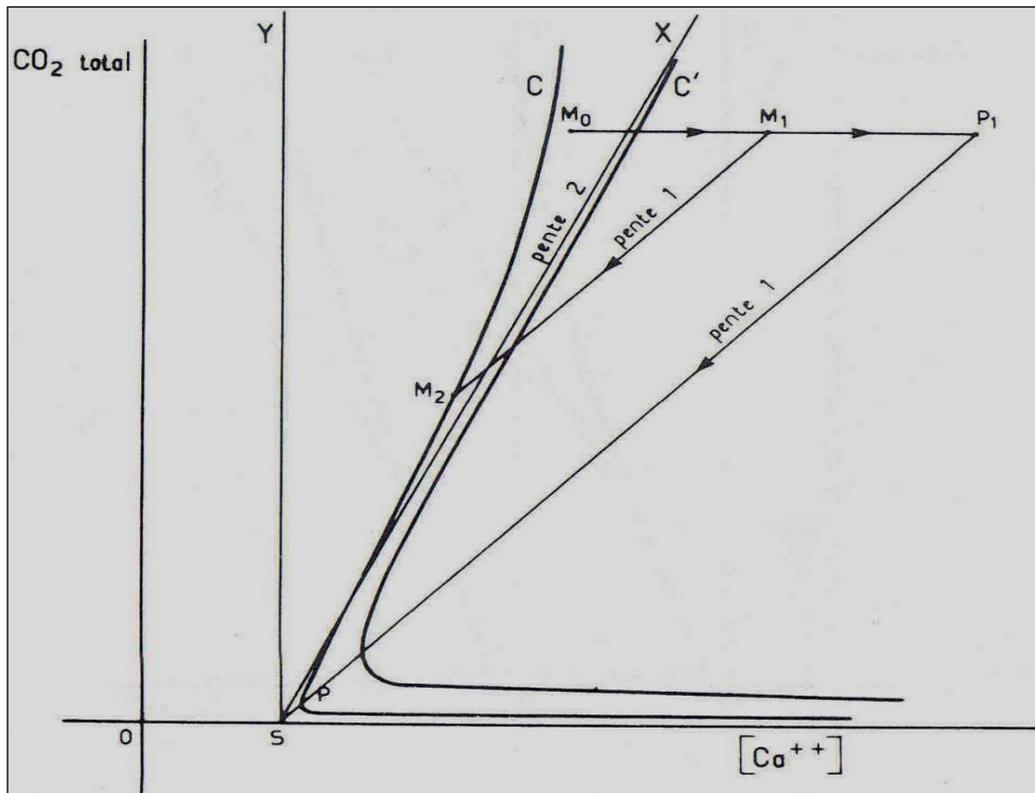
### III.3.2 Traitement d'une eau incrustante

- **Adoucissement par addition de chaux**

Une eau agressive ou même légèrement calcifiante ne présente pas les caractéristiques souhaitables si sa teneur en ions calcium est jugée excessive, entraînant de ce fait une valeur trop faible de la résistivité ou du  $pH$ . Une eau concentration élevée en ions calcium cause d'ailleurs une gêne aux utilisateurs (eau trop dure).

Il est alors possible, dans un établissement de traitement, de réduire la teneur en ions calcium (figure III.10).

- En ajoutant de manière à rendre l'eau très calcifiante (déplacement du point figuratif de l'eau de  $M_0$  en  $M_1$  au-delà de la courbe  $C'$ ).
- Puis en laissant déposer le carbonate de calcium qui se forme spontanément. (LEGRAND, 1981)



**Figure III.10 :** Adoucissement d'une eau entartrante par l'ajout de la chaux (BENAMOUR.M, 2007)

Dans la pratique, on est amené à se fixer la concentration finale en ions calcium. Connaissant le tracé de la courbe d'équilibre, on en déduit immédiatement, sur le graphique, la dose de chaux à introduire dans l'eau à traiter.

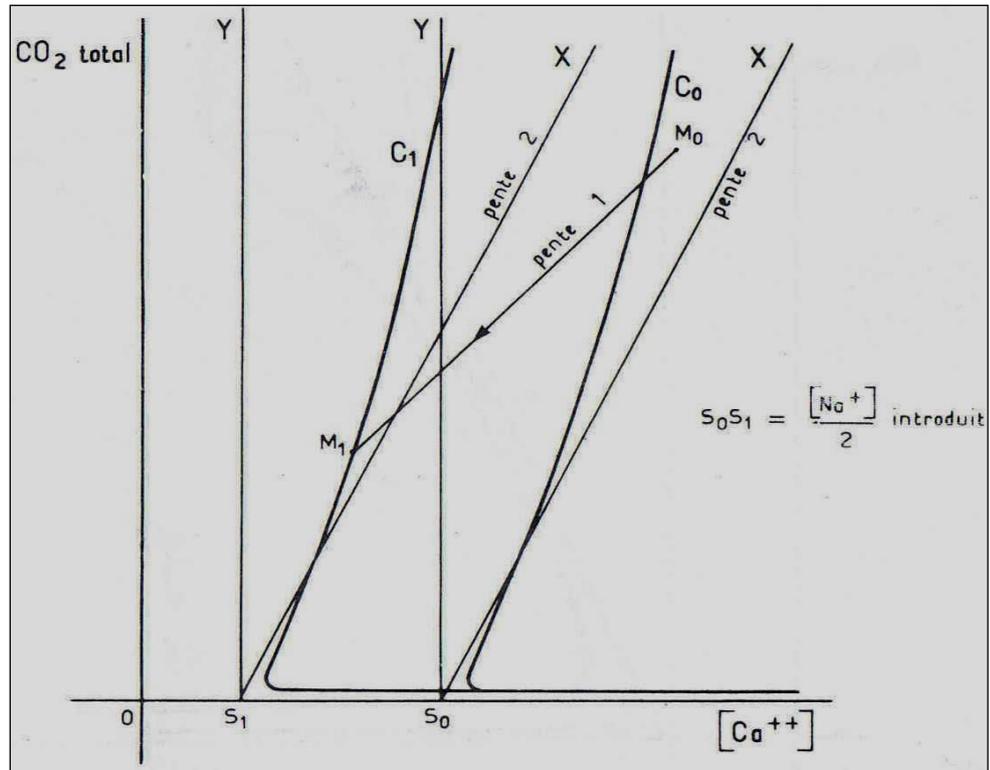
L'adoucissement est maximal lorsque la dose de chaux introduite amène le point figuratif de l'eau en  $P_1$  sur la demi-droite de pente 1, issue de  $S$ .

La teneur minimale en ions calcium, obtenue après précipitation du carbonate de calcium, est pratiquement nulle dans le cas où  $\lambda$  est négatif. Elle est très voisine de  $\lambda$  dans le cas où ce terme est positif. (LEGRAND, 1981)

- **Adoucissement par addition de soude :**

L'adoucissement au moyen de chaux permet généralement, dans la pratique des distributions d'eau potable, même si  $\lambda$  est positif, d'atteindre la teneur en ions calcium que l'on s'est fixé. Mais pour certaines industries qui utilisent des eaux très pauvres en calcium, l'adoucissement au moyen de chaux est insuffisant lorsque le terme  $\lambda$ , positif, est d'une

certaine importance. On peut alors recourir à l'adoucissement par addition de soude (figure III.11). (LEGRAND, 1981)



**Figure III.11** : Adoucissement d'une eau entartrante par l'ajout de la soude. (BENAMOUR.M, 2007)

L'ajout de soude a pour effet de rendre l'eau très calcifiante (modification de la courbe d'équilibre de  $C_0$  en  $C_1$ ). On laisse ensuite déposer le carbonate de calcium qui se forme spontanément (déplacement de  $M_0$  en  $M_1$  du point figuratif de l'eau).

La résistivité de l'eau augmente sensiblement si l'eau initiale est à l'équilibre ou calcifiante. (LEGRAND, 1981)

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité toutes les équations du modèle numériques nécessaires avec une illustration graphique de la méthode de Legrand et Poirrier qui constituent la base de notre code de calcul « Equilibre » établi avant avec Matlab.

Ces graphiques sont importantes pour comprendre et vérifier nos résultats l'application du code traduit en langage python qui est l'objectif du prochain chapitre.

**Chapitre IV :**  
**Application numérique**

---

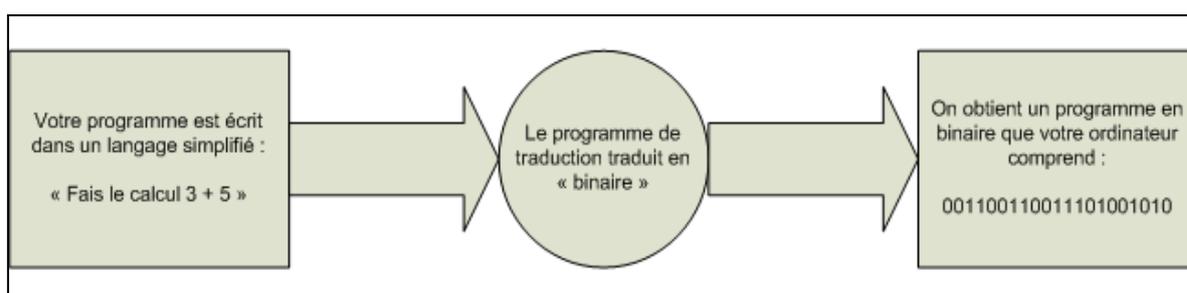
**CHAPITRE IV****APPLICATION NUMERIQUE****Introduction**

A ce présent chapitre, on va transformer le programme graphique de Legrand et Poirier en model de calcul numérique « programme » en utilise le langage de programmation « Python ». Après qu'on va introduire les donnes, le programme va donner l'état d'équilibre calcocarbonique de notre eau, ainsi il nous donne la main pour choisir le type de traitement applique.

En fin le programme donne pour chaque type de traitement les quantités des produit ajoutée pour atteint l'équilibre calcocarbonique.

**IV.1 Les langages de programmation****IV.1.1 Généralités**

Les langages de programmation sont des langages bien plus faciles à comprendre pour nous, pauvres êtres humains que nous sommes. Le mécanisme reste le même, mais le langage est bien plus compréhensible. Au lieu d'écrire les instructions dans une suite assez peu intelligible de 0 et de 1, les ordres donnés à l'ordinateur sont écrits dans un « langage », souvent en anglais, avec une syntaxe particulière qu'il est nécessaire de respecter. Mais avant que l'ordinateur puisse comprendre ce langage, celui-ci doit être traduit en langage machine (figure IV.1). (openclassrooms.com, 2019)



**Figure IV.1** : Schéma qui définit le rôle de programmation (openclassrooms.com, 2019)

En gros, le programmeur « n'a qu'à » écrire des lignes de code dans le langage qu'il a choisi, les étapes suivantes sont automatisées pour permettre à l'ordinateur de les décoder.

Il existe un grand nombre de langages de programmation et Python en fait partie. Il n'est pas nécessaire pour le moment de donner plus d'explications sur ces mécanismes très schématisés. Si vous n'avez pas réussi à comprendre les mots de vocabulaire et l'ensemble

de ces explications, cela ne vous pénalisera pas pour la suite. Mais je trouvais intéressant de donner ces précisions quant aux façons de communiquer avec son ordinateur. (openclassrooms.com, 2019).

### IV.1.2 la Langage de programmation « Python »

Python est un langage de programmation, dont la première version est sortie en 1991. Créé par Guido van Rossum, il a voyagé du Macintosh de son créateur, qui travaillait à cette époque au Centrum voor Wiskunde en Informatica aux Pays-Bas, jusqu'à se voir associer une organisation à but non lucratif particulièrement dévouée, la Python Software Foundation, créée en 2001. Ce langage a été baptisé ainsi en hommage à la troupe de comiques les « Monty Python ». (openclassrooms.com, 2019)

### IV.1.3 Pourquoi Python ?

Le choix du langage python réside dans sa richesse de bibliothèques telles que PyQt et PyQtgraph.

Il est, en outre, très facile d'étendre les fonctionnalités existantes, comme nous allons le voir. Ainsi, il existe ce qu'on appelle des **bibliothèques** qui aident le développeur à travailler sur des projets particuliers. Plusieurs bibliothèques peuvent ainsi être installées pour, par exemple, développer des interfaces graphiques en Python. (openclassrooms.com, 2019)

Concrètement, voilà ce qu'on peut faire avec Python :

De petits programmes très simples, appelés **scripts**, chargés d'une mission très précise sur votre ordinateur ;

Des programmes complets, comme des jeux, des suites bureautiques, des logiciels multimédias, des clients de messagerie...

Des projets très complexes, comme des progiciels (ensemble de plusieurs logiciels pouvant fonctionner ensemble, principalement utilisés dans le monde professionnel).

Voici quelques-unes des fonctionnalités offertes par Python et ses bibliothèques :

- Créer des interfaces graphiques ;
- Faire circuler des informations au travers d'un réseau ;

Dialoguer d'une façon avancée avec votre système d'exploitation ; (openclassrooms.com, 2019)

## IV.2 L'interface graphique «GUI»

L'interface graphique désigne la manière dont est présenté un logiciel à l'écran pour l'utilisateur. C'est le positionnement des éléments : menus, boutons, fonctionnalités dans la fenêtre. Une interface graphique bien conçue est ergonomique et intuitive afin que l'utilisateur la comprenne tout de suite. (cours-informatique-gratuit.fr, 2019)

Il existe de nombreux outils pour la conception des interfaces graphiques. Nous avons choisi le QT Designer car il s'adapte au langage de programmation Python.

### IV.2.1 L'outil de conception de GUI « Qt Designer »

Qt Designer est l'outil Qt pour la conception et la construction d'interfaces utilisateur graphiques (GUI) avec Qt Widgets. Vous pouvez composer et personnaliser vos fenêtres ou vos boîtes de dialogue de la manière que vous voyez, et les tester à l'aide de différents styles et résolutions.

Les widgets et les formulaires créés avec Qt Designer s'intègrent de manière transparente au code programmé, à l'aide du mécanisme de signaux et d'emplacements de Qt, afin que vous puissiez facilement attribuer un comportement aux éléments graphiques. Toutes les propriétés définies dans Qt Designer peuvent être modifiées dynamiquement dans le code. En outre, des fonctionnalités telles que la promotion des widgets et des plug-ins personnalisés vous permettent d'utiliser vos propres composants avec Qt Designer. (<https://doc.qt.io/>, 2019)

### IV.2.2 Structure de l'interface graphique

L'interface graphique établie pour le logiciel équilibre est constituée de 03 étapes :

- Etape de l'introduction des données
- Étape de l'appréciation de l'eau
- Etape de traitement

Ces étapes sont illustrées sous forme de fenêtres construites à l'aide de Qt Designer et commandées par PyQt.

#### IV.2.2.1 Etape de l'introduction des données initiales de l'eau

Cette étape permet à l'utilisateur d'introduire les données initiales de l'eau à savoir les cations et les anions y contenus avec l'unité choisi mg/l, meq/l ou mmol/l voir figure (IV.2).

En cliquant sur le bouton calcul, le logiciel met à jour les valeurs dans les cases dites « LineEdit ».

Il permet aussi de calculer les valeurs de certains éléments chimiques qui ne sont pas introduit au début, à savoir le  $\text{CO}_2$  gazeux dissous ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ),  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^{2-}$ .

En cliquant sur le bouton suivant, la fenêtre de l'étape suivante s'affiche qui est l'étape de l'appréciation de l'eau.

#### IV.2.2.2 Etape de l'appréciation de l'eau

Dans cette étape, le programme nous fournit la valeur de pH d'équilibre de l'eau (pHs) et le compare avec la valeur du pH de l'eau pour nous afficher si l'eau est agressive ou incrustante voir figure (IV.2).

The screenshot shows a software window titled "equilibre ETAPE 0" with the following data:

introduire les données initiales de l'eau		choisir une unité			
Ca	0.91	Cl	5.63	<input type="checkbox"/> mgpl	
Mg	0.13	SO4	0.08	<input type="checkbox"/> meqpl	
Na	3.8	NO3	0.012	<input checked="" type="checkbox"/> mmolpl	
Fe	0.05	HCO3	0.268045187	T(°C)	20
K	0.09	PO4	0.	PH	6.6500001
Ba	0.	F	0.	TAC(°F)	0.5
Mn	0.	SIO2	0.		
NH4	0.	CO3	7.12159599e-05		
H3O	0.000223872063	OH	3.62037426e-05		
Balance ionique	1.54962308e-05	H2CO3	0.125720844	CO2t	0.393837243

Buttons: Save, Calculer, suivant

**Figure IV.2 :** Introduction des données initiales.(Station de Fouka,2019)

On peut visualiser la courbe d'équilibre de cette eau et notamment la situation de son point représentatif M0 sur le graphique. On note que les graphiques sont réalisés en utilisant la bibliothèque PyQtgraph fonctionnant sous Python et PyQt.



Figure IV.3 : Etape d'appréciation

La figure (IV.3) illustre la courbe d'équilibre de l'eau.

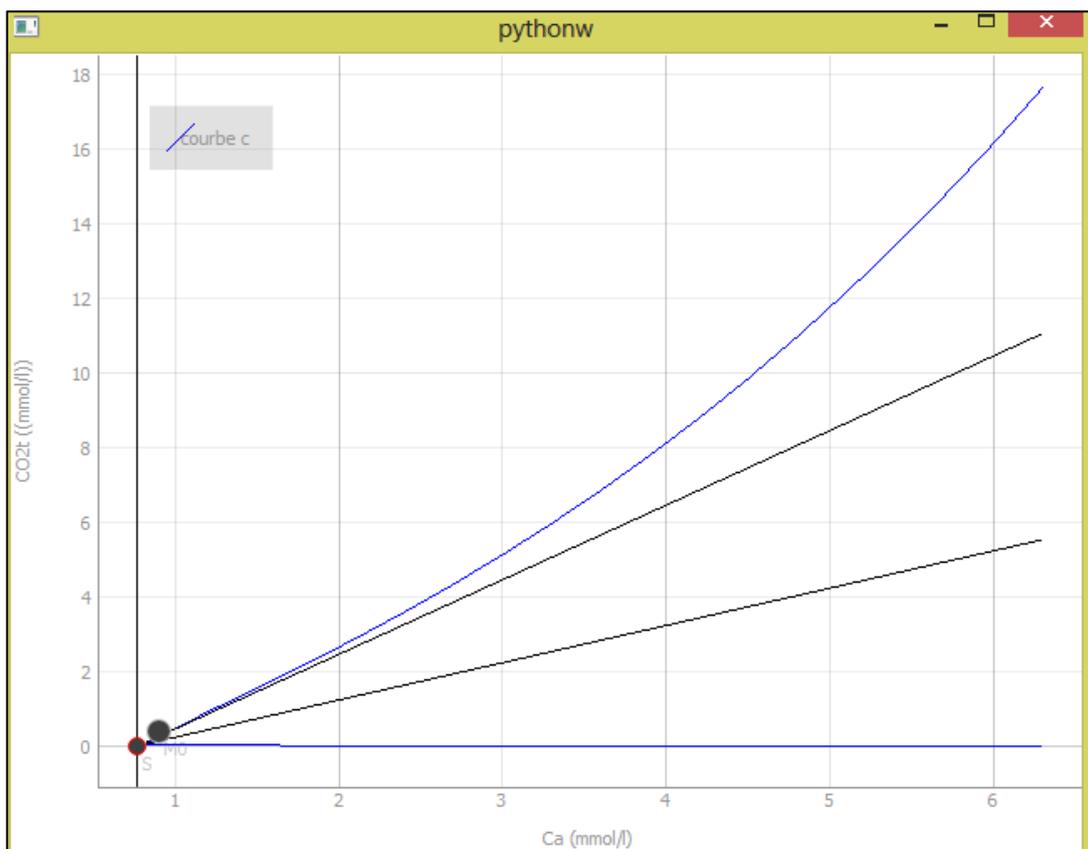


Figure IV.4 : Courbe d'équilibre de l'eau

Le point s sur la figure représente lambda. La courbe en bleu est la courbe d'équilibre. Les deux droites en noir sont celles de pente 1 et pente 2.

En cliquant sur le bouton suivant nous passerons à l'étape suivante celle de traitement.

#### IV.2.2.3 Etape de traitement

Dans cette étape on choisit le type de traitement pour mettre cette eau agressive à l'équilibre. Il s'agit :

- Traitement par la chaux ;
- Traitement par la soude ;
- Traitement par dolomite non calciné ( $n=0.5$ ) ;
- Par carbonatation.

Ensuite en cliquant le bouton calcul le programme nous fournit les quantités des réactifs ajoutés ainsi que les caractéristique de l'eau à l'équilibre après traitement voir figure (IV.5).

The screenshot shows a software window titled "equilibre etape de traitement" with the following content:

**Traitement d'une eau agressive**

quantité de chaux ajoutée en mg/l: 6.65999889

quantité de Co2 gazeux ajoutée en mg/l (carbonatation): 1.85528004

choisir le type de traitement:

- par la chaux
- par la soude
- par dolomite calciné
- par carbonatation

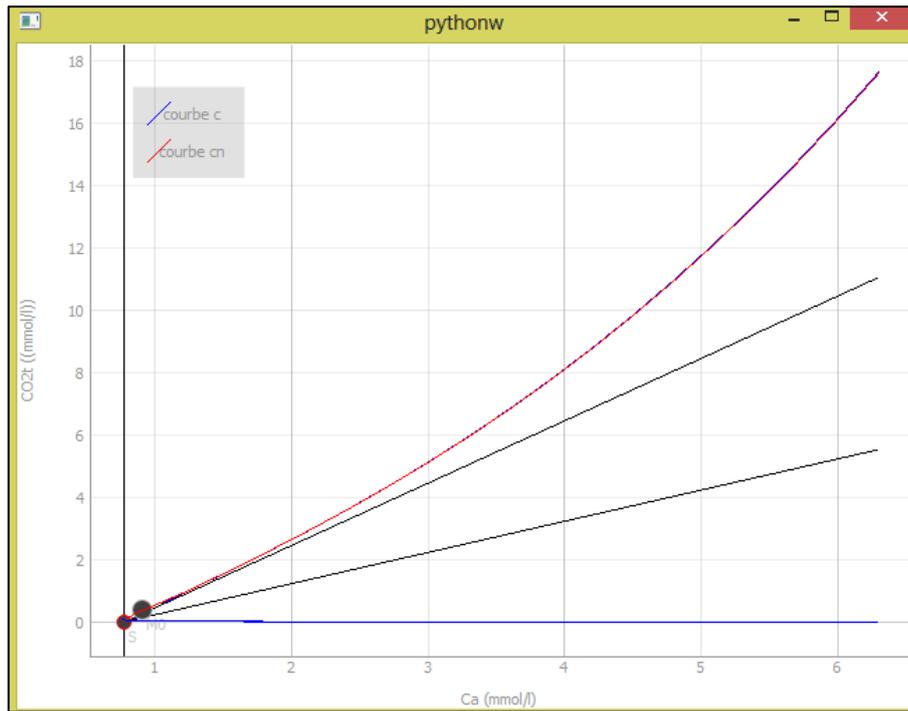
caractéristiques de l'eau à l'équilibre après traitement en mmol/l

Ca	H2CO3
1.0	0.00209823065
HCO3	CO2t
0.423234195	0.436002702
CO3	PHS
0.0106702922	8.624
Na	Mg
3.79999995	0.129999995
Lamda	

Buttons: calcul, save, courbe

**Figure IV.5 :** Traitement de l'eau par carbonatation

On peut notamment visualiser la courbe d'équilibre pour le traitement appliqué en cliquant sur le bouton courbe. Le résultat trouvé pour le traitement par la soude est représenté par la figure (IV.6).



**Figure IV.6 :** Courbe d'équilibre du Traitement d'une eau agressive par la soude

Dans le cas où l'eau est agressive une autre fenêtre s'affiche, elle contient deux choix de traitement soit par la chaux ou par la soude. Voir figure (IV.7).

Qt etape de traitement - etape\_traitement2.ui

Traitement d'une eau agressive

quantité de soude ajoutée en mg/l  
 quantité de chaux ajoutée en mg/l

\_\_\_\_\_

choisir le type de traitement

par la chaux

par la soude

caractéristiques de l'eau à l'équilibre après traitement en mmol/l

Ca	H2CO3
_____	_____
HCO3	CO2t
_____	_____
CO3	PHS
_____	_____
Na	Mg
_____	_____
Lamda	_____
_____	_____

calcul save courbe

**Figure IV.7 :** fenêtre de l'étape de traitement d'une eau incrustante sous Qt Designer

Enfin, nous pouvons sauvegarder nos résultats dans un fichier global resultats.out

**Application du programme équilibre sur la station de dessalement de Fouka :**

Les données initiales sont illustrées par la figure (IV.8).

**Figure IV.8 :** Introduction des données initiales de l'eau de Fouka

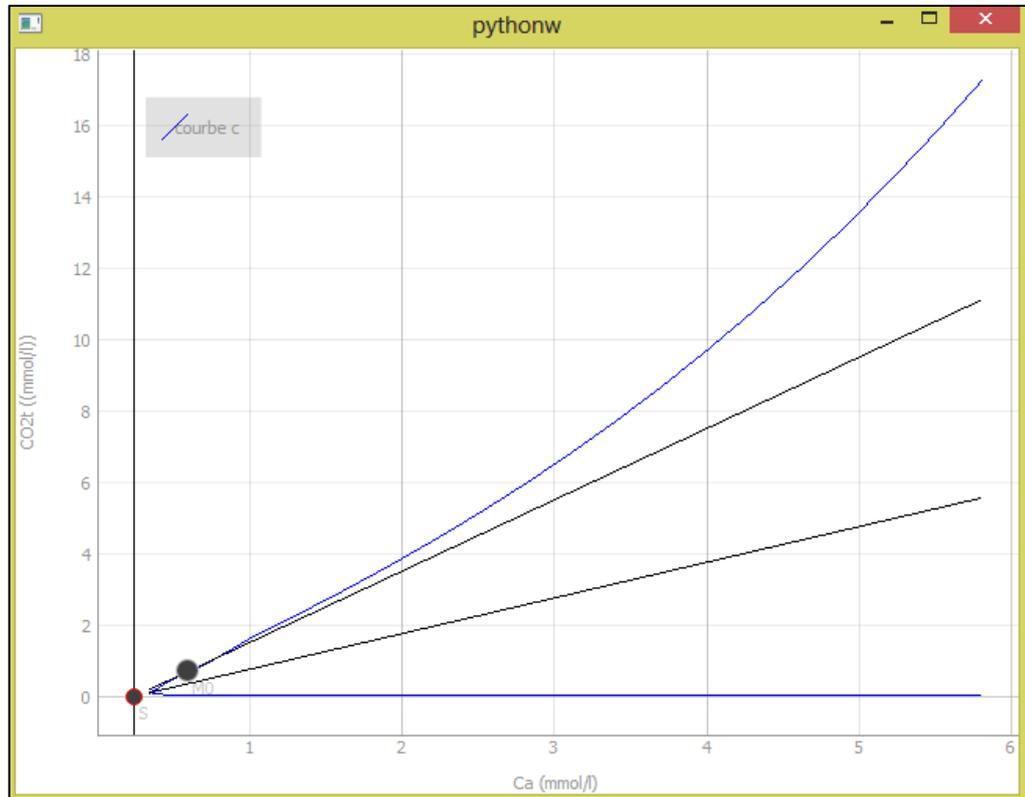
Après l'exécution du programme et la mise à jour de ces données la figure (IV.9) illustre les résultats trouvés.

**Figure IV.9 :** Appréciation de l'eau de la station de Fouka

On remarque que le programme donne une valeur du  $\text{PHs} = 8.66 > \text{pH} = 8.2$  donc l'eau est agressive c'est le cas.

La courbe d'équilibre correspondant à l'eau de Fouka est illustrée par la figure (IV.10).

Le point M0 se trouve légèrement au-dessus de la courbe.



**Figure IV.10 :** courbe d'équilibre de l'eau de la station Fouka

Si on applique le traitement par la chaux on trouve les résultats suivants :

La quantité de chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  à ajouter en mg/l pour mettre cette eau à l'équilibre est de 0.80mg/l. C'est une valeur faible du fait que le point M0 est proche de la courbe d'équilibre.

Les caractéristiques de l'eau à l'équilibre montre que sa valeur du  $\text{pHs}$  est de 8.66.

**Figure IV.11 :** Traitement par la chaux de l’eau de la station de Fouka

Si on applique le traitement de reminéralisation par carbonatation et c’est le cas de la station de Fouka, et si on veut une concentration finale de 1 mmole/l de  $Ca^{2+}$  alors on trouve les résultats de la figure (IV.12) :

**Figure IV.12 :** Traitement par carbonatation de l’eau de la station de Fouka

On remarque d'après la figure que la quantité de chaux ajoutée est de 29.6 mg/l et celle de CO<sub>2</sub> gazeux est de 35.65mg/l.

Si on applique le traitement par dolomite non calciné CaCO<sub>3</sub>, nMgCO<sub>3</sub> avec n=0.5

Alors on trouve les résultats ci-dessous :

On note que la valeur de dolomite non calcinée appliquée est de 1.83mg/l.

Ici aussi c'est une valeur très faible, et le point de l'eau sur la courbe d'équilibre est proche de S, Voir figure (IV.13).

La nouvelle courbe d'équilibre en rouge passe par le point M0 parce qu'il est proche de la courbe d'équilibre initiale en bleu.

Toujours la position de l'eau à l'équilibre est proche du point s, d'où il faut augmenter la quantité de ca à l'équilibre.

C'est pourquoi il est mieux d'appliquer la carbonatation pour atteindre un point d'équilibre avec un [Ca<sup>2+</sup>] = 1 mmole/l.

equilibre etape de traitement

Traitement d'une eau agressive

quantité de dolomites calcinés ajoutée en mg/l

1.83363354

choisir le type de traitement

par la chaux

par la soude

par dolomite calciné

par carbonatation

caractéristiques de l'eau à l'équilibre après traitement en mmol/l

Ca	H2CO3
0.612876356	0.00339031685
HCO3	CO2t
0.698732734	0.720322847
CO3	PHS
0.0181997754	8.62915516
Na	Mg
4.90000057	0.486438334
Lamda	
0.243561491	

calcul save courbe

Figure IV.13 : Traitement par dolomite non calciné de l'eau de la station de Fouka

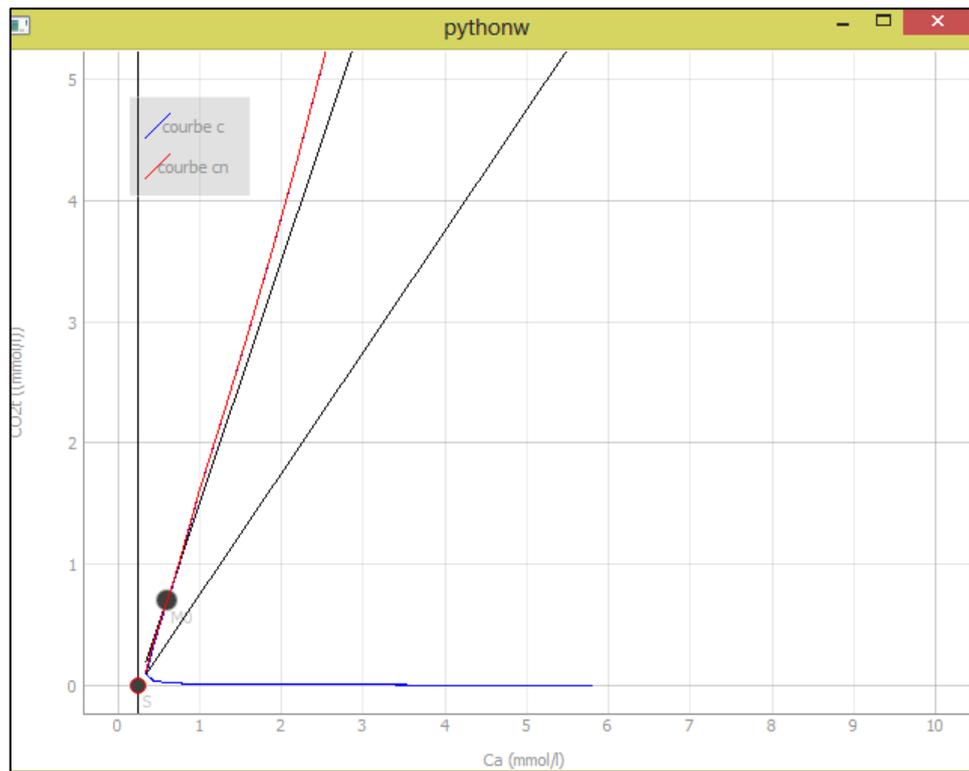


Figure IV.14 : Courbe d'équilibre après le traitement par dolomite non calciné

Tableau IV.1 : Comparaison entre les différentes méthodes traitements.

Type de traitement	Réactif	Caractéristique du point M0	Caractéristique du point M après traitement	La dose de réactif à ajouter (mg/l)
Injection de chaux	Ca(OH) <sub>2</sub>	[Ca <sup>2+</sup> ] en mmole/l	[Ca <sup>2+</sup> ] en mmole/l	0.79
		0.61	0.61	
		CO <sub>2t</sub> en mmole/l	CO <sub>2t</sub> en mmole/l	
		0.70	0.70	
		pH	pH	
8.2	8.66			
Injection de soude	NaOH	[Ca <sup>2+</sup> ] en mmole/l	[Ca <sup>2+</sup> ] en mmole/l	0.5
		0.6		
		CO <sub>2t</sub> en mmole/l	CO <sub>2t</sub> en mmole/l	
		0.70		
		pH	pH	
8.2				
La dolomite non calciné	CaCO <sub>3</sub> , MgCO <sub>3</sub>	[Ca <sup>2+</sup> ] en mmole/l	[Ca <sup>2+</sup> ] en mmole/l	1.83
		0.61	0.61	
		CO <sub>2t</sub> en mmole/l	CO <sub>2t</sub> en mmole/l	
		0.70	0.72	
		pH	pH	
8.2	8.62			
La carbonatation	CO <sub>2</sub> et Ca(OH) <sub>2</sub>	[Ca <sup>2+</sup> ] en mmole/l	[Ca <sup>2+</sup> ] en mmole/l	Chaux
		0.61	1.0	29.6
		CO <sub>2t</sub> en mmole/l		
		0.70	pH	CO <sub>2</sub> gazeux
		pH	8.1	35.65
8.2				

## **Conclusion**

A travers ce chapitre nous avons montré le fonctionnement du programme d'équilibre et son importance pour faciliter le calcul automatique de l'équilibre calcocarbonique. L'interface graphique qu'on a ajoutée au programme est très utile pour faciliter son utilisation.

Le programme nous donne les quantités des réactifs ajoutées pour faire la reminéralisation des eaux agressives, et qui concerne la méthode de reminéralisation utilisé dans la station de Fouka (carbonatation) on a trouvé une quantité de 29.6 mg/l de chaux et 35.65 mg/l de CO<sub>2</sub> gazeux, et pour la soude le programme nous donne 0.5 mg/l de NaOH.

Et avons conclu que les deux méthodes de reminéralisation les plus adaptées au modèle sont la méthode de carbonatation et la méthode d'ajout de soude.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

A travers ce travail nous avons pu développer un programme de calcul calcocarbonique, en utilisant le langage de programmation Python. Le choix du langage python réside dans sa richesse de bibliothèques telles que PyQt et PyQtgraph.

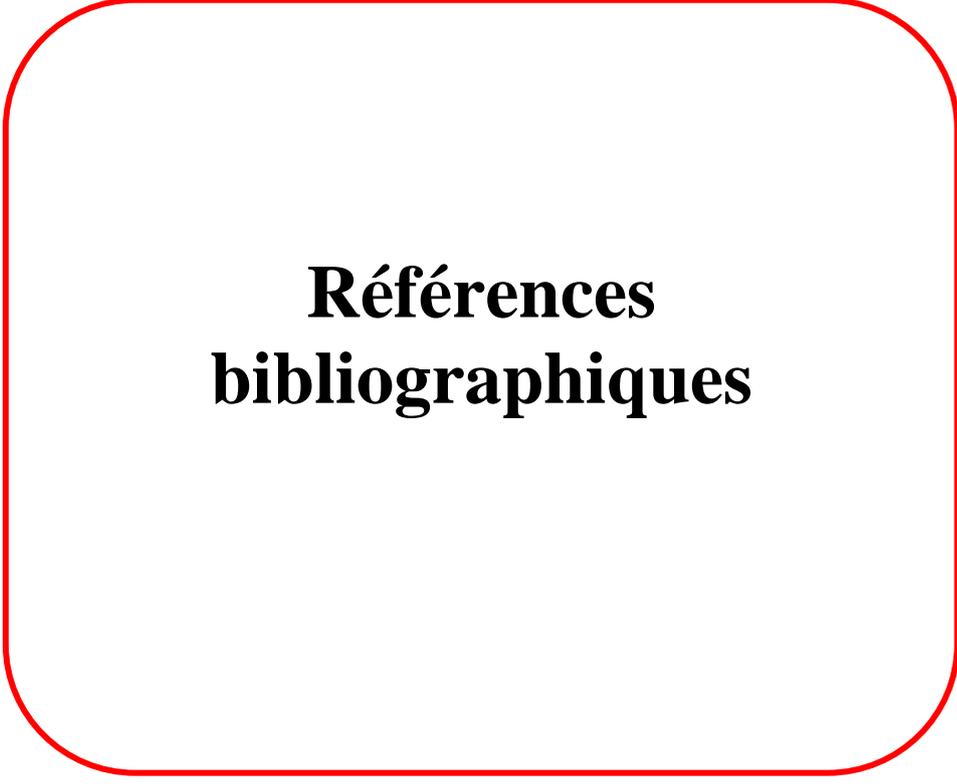
L'interface graphique ainsi développée dans ce travail a permis de faciliter l'exploitation du code de calcul équilibre. En effet, l'utilisateur peut introduire les données et recevoir les résultats via des fenêtres sans comprendre le fond du logiciel.

L'outil graphique est géré par la bibliothèque matplotlib qui a permis de visualiser les courbes d'équilibre par des scripts sous python.

Le logiciel nous donne l'état de l'eau agressive au incrustante et aussi donne les quantités des réactifs ajouter au stade de post-traitement pour atteint l'équilibre calcocarbonique. Les informations fournies par le logiciel nous montre que les eaux traitées de la station de Fouka sont en état agressif et doivent être reminéralisées au stade de post-traitement.

Le programme nous donne les quantités des réactifs ajoutées pour faire la reminéralisation des eaux agressives, et qui concerne la méthode de reminéralisation utilisé dans la station de Fouka (carbonatation) on a trouvé une quantité de 29.6 mg/l de chaux et 35.65 mg/l de CO<sub>2</sub> gazeux, et pour la soude le programme nous donne 0.5 mg/l de NaOH.

Et avons conclu que les deux méthodes de reminéralisation les plus adaptées au modèle sont la méthode de carbonatation et la méthode d'ajout de soude.



**Références  
bibliographiques**

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**BENAMOUR.M. 2007.** Calcul numérique de l'équilibre calcocarbonique de l'eau, mémoire de fin d'étude. Blida : ENSH, 2007.

**BOURAS, IMEN. 2017.** Reminéralisation et mise à l'équilibre des eaux, Memoirde master. Blida : ENSH, 2017.

**CARDOT, C. 1999.** Les traitements de l'eau. Procédés physico-chimiques et biologiques. Paris : Ellipse, 1999.

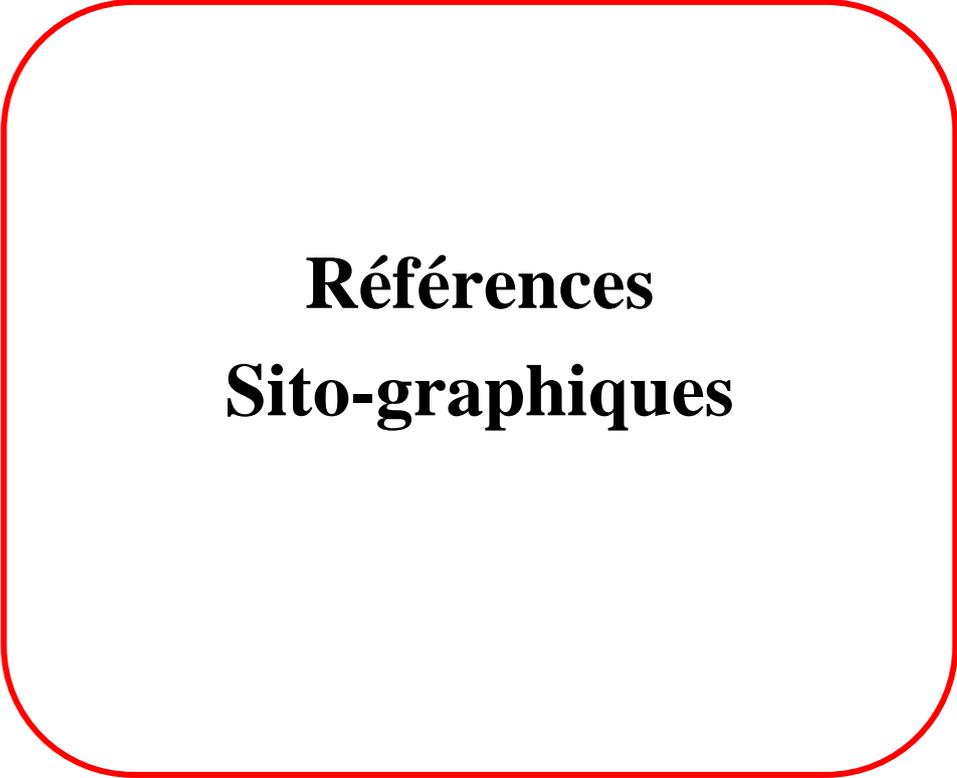
**DEGREMONT. 1995.** Mémento technique de l'eau. s.l. : Suez, 1995. Vol. 1.

**LEGRAND, POIRIER. 1981.** Les équilibres carboniques et l'équilibre calcocarbonique dans les eaux naturelles. s.l. : Eyrolle, 1981.

**LEGUBE.B, MERLET.N & COLL. 2009.** L'analyse de l'eau, techniques modernes d'analyse chimiques, biologiques et microbiologiques des eaux. 9. Paris : Dunod, 2009.

**RAYMOND.D. 1999.** Water Quality & Treatment. A Handbook of Community Water Supplies. s.l. : McGraw-Hill Professional, 1999.

**ROMPRE.A, ALLARD.D et NIQUETTE.P. 1999.** Optimisation de l'implantation des stratégies de contrôle de la corrosion interne dans les réseaux de distribution. Québec-Laval : s.n., 1999.



**Références**  
**Sito-graphiques**

### REFERENCE SITO-GRAPHIQUE

**aquaportail.com/. 2019.** <https://www.aquaportail.com/definition-3739-alcalinite.html>. aquaportail.com. [En ligne] 2019.

**cours-informatique-gratuit.fr. 2019.** <https://cours-informatique-gratuit.fr/dictionnaire/interface-graphique/>. <https://cours-informatique-gratuit.fr>. [En ligne] 2019.

**https://doc.qt.io/. 2019.** <https://doc.qt.io/>. <https://doc.qt.io/qt-5/qt designer-manual.html>. [En ligne] 2019.

**https://fr.wikipedia.org/. 2013.** <https://fr.wikipedia.org>. Wikipedia. [En ligne] 9 2013. [Citation : 14 3 2019.] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quilibre\\_calco-carbonique](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quilibre_calco-carbonique).

**myahtipaza.dz. 2019.** <http://www.myahtipaza.dz/index.php/l-usine-en-images/video>. www.myahtipaza.dz. [En ligne] 2019.

**openclassrooms.com. 2019.** <https://openclassrooms.com/fr/courses/235344-apprenez-a-programmer-en-python/230659-decouvrez-python>. <https://openclassrooms.com/fr>. [En ligne] 2019.

**suezwaterhandbook.fr. 2019.** <https://www.suezwaterhandbook.fr>. suezwaterhandbook.fr. [En ligne] 2019.

# **Annexes**

## Annexe 1

Tableau n° 1 : La table de Tillmans. (BENAMOUR.M, 2007)

<i>CO<sub>2</sub></i> semi combiné (mg/L)	<i>TAC</i>	<i>CO<sub>2</sub></i> équilibrant (mg/L)	<i>pH</i> d'équilibre	<i>TAC</i>	<i>CO<sub>2</sub></i> équilibrant (mg/L)	<i>pH</i> d'équilibre
5	1,1	0	9,9	24,4	32,3	7,19
15	3,4	0,25	8,44	25	35	7,16
17,5	4	0,4	8,31	25,6	37,8	7,14
20	4,5	0,5	8,26	26,1	40,75	7,12
22,5	5	0,6	8,23	26,7	43,8	7,1
25	5,7	0,75	8,19	27,3	47	7,07
27,5	6,3	0,9	8,16	27,9	50,2	7,05
30	6,8	1	8,14	28,4	54	7,03
32,5	7,4	1,2	8,1	29	57,4	7,01
35	8	1,4	8,07	29,6	61	6,99
37,5	8,5	1,6	8,04	30,1	64,7	6,98
40	9,1	1,75	8,02	30,7	68,5	6,96
42,5	9,7	2,1	7,97	31,3	72,3	6,95
45	10,2	2,4	7,94	31,8	76,4	6,93
47,5	10,8	2,7	7,91	32,4	80,5	6,92
50	11,4	3	7,89	33	85	6,9
52,5	11,9	3,5	7,84	33,5	89,1	6,89
55	12,5	3,9	7,81	34,1	93,5	6,87
57,5	13	4,25	7,79	34,7	98	6,86
60	13,6	4,8	7,76	35,2	103	6,84
62,5	14,2	5,25	7,74	35,8	107,5	6,83
65	14,8	6	7,7	36,4	112,5	6,82
67,5	15,3	6,75	7,67	37	117,5	6,81
70	15,9	7,5	7,64	37,5	122,5	6,8
72,5	16,5	8,3	7,61	38,1	127,6	6,79
75	17	9,25	7,57	38,6	132,9	6,77
77,5	17,6	10,4	7,54	39,2	138	6,76
80	18,1	11,5	7,51	39,8	143,8	6,75
82,5	18,7	12,8	7,47	40,4	149,1	6,74
85	19,3	14,1	7,44	41	154,5	6,73
87,5	19,9	15,6	7,41	41,5	160	6,72
90	20,5	17,2	7,38	42	165,5	6,72
92,5	21	19	7,35	42,6	171	6,71
95	21,6	20,75	7,33	43,2	176,6	6,7
97,5	22,2	22,75	7,3	43,8	182,3	6,69
100	22,7	25	7,27	44,4	188	6,68
102,5	23,3	27,3	7,24	44,9	194	6,68
105	23,8	29,8	7,22	45,5	199,5	6,67

Annexe 2

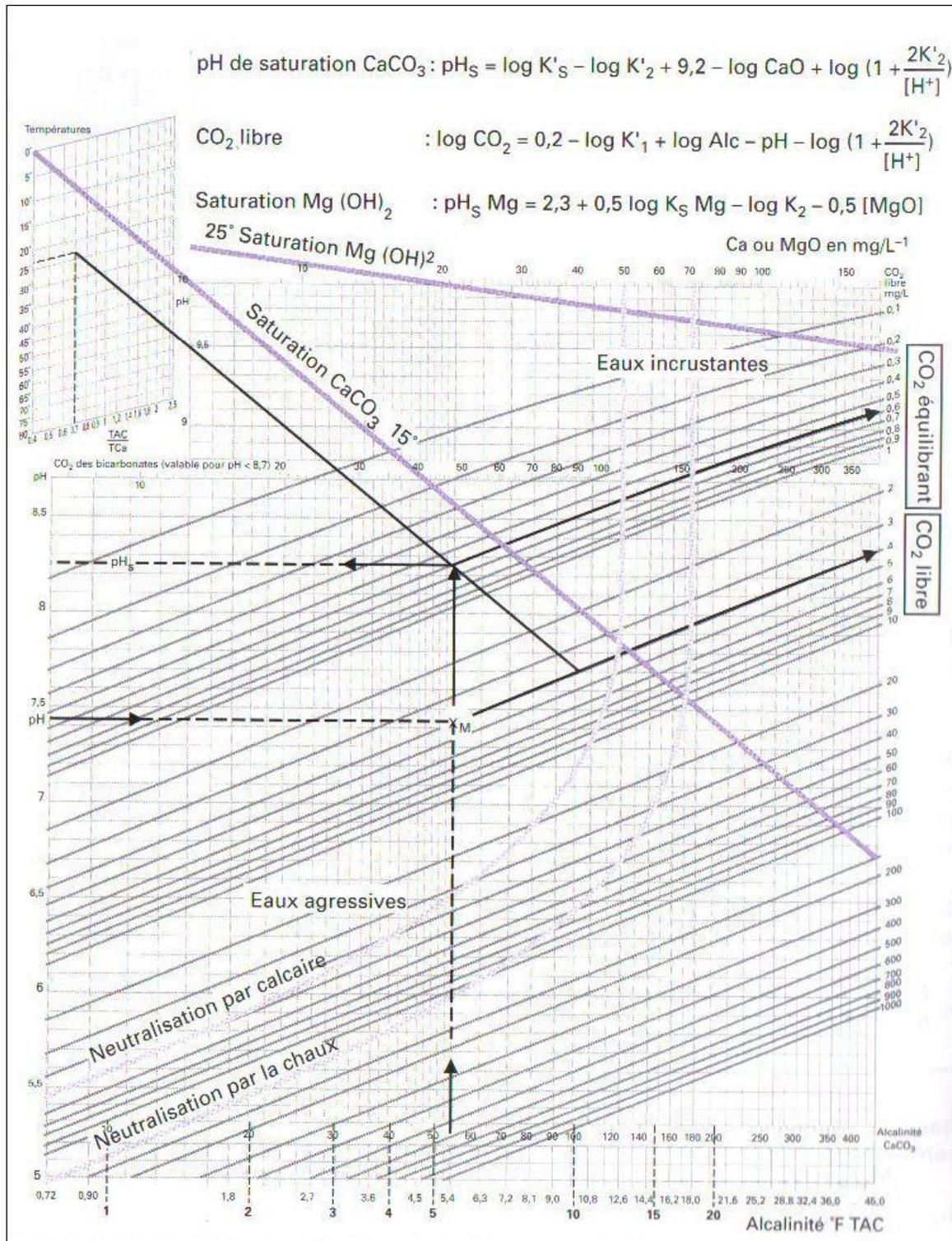


Figure 1 : Graphique carbonique de Hallopeau et Dubin. (BENAMOUR.M, 2007)