

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix- Travail- Patrie

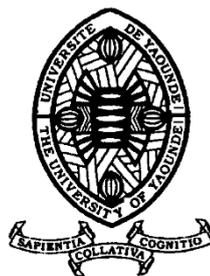
UNIVERSITE DE YAOUNDE I

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN SCIENCE
TECHNOLOGIE ET GEOSCIENCE

UNITE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN PHYSIQUE
ET APPLICATIONS

B.P. BOX 812 YAOUNDE

Email: crfd stg @uy1.uninet.cm



REPUBLIQUE OF CAMEROON

Peace-Work-Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

RESEARCH AND POSTGRADUATE
TRAINING UNIT FOR PHYSICS AND
APPLICATIONS

RESEARCH AND POSTGRADUATE
TRAINING UNIT FOR PHYSICS AND
APPLICATIONS

P.O. BOX 812 YAOUNDE

Email: crfd stg @uy1.uninet.cm

Laboratoire de Mécaniques, Matériaux et Structures

Laboratory of Mechanics, Materials and Structures

MODELISATION DU PROCESSUS DE MIGRATION ASCENSIONNELLE DU PETROLE ET DU CHAUFFAGE DU BATIMENT A PARTIR DU MAZOUT

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme du Doctorat/PhD en Physique

Option : Sciences des Matériaux

par :

SONGONG TSAKEU Steve Christophe

Matricule : 11W0801

Directeur : PR ELIE SIMO

Maître de Conférences

Habilité à Diriger des Recherches de l'Université de Rouen-France





DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE
DEPARTMENT OF PHYSICS

ATTESTATION DE CORRECTION DE LA THÈSE DE DOCTORAT/Ph.D

Nous, Professeur EYEBE FOUDA Jean Sire et Professeur NDJAKA Jean Marie Bienvenu, respectivement Examineur et Président du jury de la Thèse de Doctorat/Ph.D de Monsieur SONGONG TSAKEU Steve Christophe, Matricule 11W0801, préparée sous la direction du Professeur SIMO Elie, intitulée : « Modélisation du processus de migration ascensionnelle du pétrole et du chauffage du bâtiment à partir du mazout », soutenue le Jeudi, 15 Décembre 2022, en vue de l'obtention du grade de Docteur/Ph.D en Physique, Spécialité Mécanique Matériaux et Structure, Option Sciences des Matériaux, attestons que toutes les corrections demandées par le jury de soutenance ont été effectuées. En foi de quoi, la présente attestation lui est délivrée pour servir et valoir ce que de droit.

Fait à Yaoundé le.....17. JUL. 2023.....

Examineur

Pr EYEBE FOUDA
Jean Sire

Le Chef de Département de Physique



Pr NDJAKA Jean-Marie
Bienvenu

Le Président du jury

Pr NDJAKA Jean-Marie
Bienvenu

DEDICACES

A mes parents : TSAKEU CHRISTOPHE ET TEKEM ROSALIE

C'est avec une joie immense et le cœur ému que je dédie cette thèse à mes chers parents, pour leurs affections inépuisables et leurs conseils précieux. Ils n'ont cessé de prier pour moi tout au long de mon parcours scolaire et m'ont toujours encouragé.

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie et célèbre le Seigneur Dieu tout puissant pour les multiples et merveilleuses grâces dont il fait preuve à mon égard durant ce parcours doctoral.

Je tiens à remercier le Professeur SIMO Elie, Directeur de ce travail, pour l'aide qu'il a fournie et les connaissances qu'il a su me transmettre. Je le remercie également pour sa disponibilité et la qualité de ses conseils. Vous n'avez ménagé aucun effort pour superviser au quotidien mes travaux, me conseiller et me faire avancer dans le monde scientifique. Merci Professeur SIMO.

Mes sincères remerciements à l'ensemble du jury de pré- soutenance de cette thèse, pour leurs disponibilités et l'honneur qu'ils m'ont fait en évaluant ce travail et surtout pour leurs critiques et conseils qui m'ont permis d'améliorer la qualité de ce travail.

Je voudrais également remercier le chef de laboratoire des sciences et matériaux Pr. NJAKA Jean-Marie. Merci à vous.

Mes vifs remerciements à tout le corps enseignant du Département de Physique de l'Université de Yaoundé I.

Je n'oublie pas non plus mes camarades de promotion plus particulièrement ABOMO sans lesquels les moments gais auraient été plus rares et les moments difficiles plus durs encore. Je vous remercie pour votre collaboration et vos remarques constructives.

A mes parents TSAKEU Christophe et TEKEM Rosalie, j'adresse mes plus profonds remerciements. Vous avez toujours été présente pour mon éducation en faisant beaucoup de sacrifices pour que je puisse atteindre ce niveau d'étude. Sachez que je vous aime même si je ne le dis pas chaque jour.

Papa DONGMO Jean, tu as toujours été à mes côtés, avec ta présence et ton soutien juste au moment où j'en avais le plus besoin. Je ne sais comment expliquer cela. Mais je sais que cela m'a été d'une aide précieuse. De par ta sagesse et ta culture, tu m'as inculqué les valeurs morales et intellectuelles qui m'ont permis de rester fort tout au long de ce parcours. Je ne t'en remercierai jamais assez.

J'exprime ma gratitude à mes chers parents, à tous mes oncles et tantes. Pour l'indéfectible soutien et le réconfort permanent qu'ils ont su m'apporter tout au long de cette année.

A mes frères et sœurs dont l'affection m'a accompagnée.

Enfin, je tiens à remercier la grande famille IGNAS, qui au travers de leurs enseignements et conseils ont suscité en moi un esprit de persévérance et d'endurance. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

TABLE DES MATIERES

Contents

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DES MATIERES	iv
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES GRANDEURS PHYSIQUE ET UNITE	xiii
RESUME.....	xv
ABSTRACT	xvii
CHAPITRE I : REVUE DE LITTERATURE	5
I. Introduction.....	5
II. Le pétrole	5
II.1 Historique et découverte.....	5
II.2 Formation.....	8
II.2.1 L'accumulation et l'enfouissement de matière organique.....	8
II.3 Classification et caractéristiques des pétroles bruts.....	12
II.4 Transformations et produits dérivés	14
II.5 Le pétrole usage et aspect négatif	16
II.5.1 Les usages	16
II.5.2 Chauffage des bâtiments.....	17
II.5.2.1 Généralité sur le chauffage.....	17
II.5.2.2 Les systèmes de chauffage au mazout.....	22
II.5.3 Les aspects négatifs du pétrole	25
II.6 Impact socio-économique et politique lié à la présence du pétrole	28
II. La croûte terrestre	29
III.1 Structure et organisation de la croûte terrestre.....	29
III.2 Constitution et composition	30
III.3 La tectonique des plaques	31
III.3.1 Une structuration lithologique.....	31
III.4 La dynamique de la lithosphère	32

III.4.1 Les forces mises en jeu.....	32
IV. Les matériaux dans le bâtiment.....	34
IV.1 Généralité.....	34
IV.2 Propriétés des bétons légers	35
V. Le concept de modélisation.....	36
V.1 Les modèles de connaissance, théoriques ou analytiques.....	37
V.2 Les modèles de comportement, systémiques ou empiriques.....	37
V.3 Quelques modèles	38
VI. Conclusion	39
CHAPITRE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES	40
I. Introduction	40
II. Pollution par les produits pétroliers.....	40
II.1 Nature et composition chimique des hydrocarbures pétroliers	41
II.2 Pollution par le pétrole lors de son ascension : les causes de la migration tertiaire.....	44
II.2.1 Les réservoirs naturellement fracturés	44
II.2.1.1 Les fractures dans les roches.....	45
II.2.1.2 Classification des fractures	45
II.3 Le mazout et l'environnement.....	47
II.4 Toxicité des produits pétroliers.....	48
II.4.1 Sur l'environnement	48
II.4.2 Sur les plantes.....	49
II.4.3 sur l'Homme	49
III. Matériel et méthode du processus de migration ascensionnelle du pétrole.....	50
III.1 système pétrolier	50
III.2 Réservoirs et types de pièges.....	50
III.2.1 Les Réservoirs	50
III.2.2 Les types de pièges.....	51
III.2.2.1 les pièges structuraux	51
III.2.2.2 les pièges stratigraphiques	52
III.3 Migration des hydrocarbures	52
III.3.1 La migration primaire.....	53
III.3.2 La migration secondaire.....	53
III.3.3 La dysmigration ou migration tertiaire.....	54
III.4 les différentes échelles d'observation du phénomène de migration	55
III.4.1 Migration des pétroles à l'échelle des pores	55
II.4.2 Migration des hydrocarbures à l'échelle du laboratoire	57

II.4.3 Migration des hydrocarbures aux échelles du réservoir et du bassin	59
III.5 Mécanisme de la migration	62
III.5.1 Tension interfaciale.....	62
III.5.2 la mouillabilité.....	63
III.5.3 Pression capillaire.....	63
III.6 Modélisation physique du processus de migration des pétroles.....	66
III.6.1 Caractéristiques physiques des roches et du pétrole	66
III.6.1.1 Caractéristiques physiques des roches.....	66
a) La densité	68
III.6.2 Diffusion et loi d'écoulement	68
III.6.2.1 La diffusion.....	68
III.6.2.2 Les lois de Fick.....	70
III.6.3 Equation de diffusion	73
a) Cas où k est constant.....	74
b) Cas où k varie.....	74
III.6.4 Forme adimensionnée des équations.....	75
III.6.5 Condition et hypothèse de la modélisation.....	76
IV.1 Processus de chauffage des bâtiments.....	77
IV.2 Le mazout propriété physique et chimique	78
IV.3 Le béton ponce.....	79
IV.4 Les différents modes de transfert thermique.....	80
IV.5 Modélisation physique	82
IV.6 Paramètre du système.....	85
V. Technique numérique	85
V.1 Runge Kutta d'ordre 4	85
V.2 Discrétisation	89
VI. Conclusion	90
CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION	92
I. Résultats et discussions relatifs au processus de migration ascensionnelle du pétrole.....	92
I.1. Etude du profil des courbes obtenues	92
I.2 Etude de l'impact de la variation du coefficient de compressibilité.....	94
I.3 Etude de l'impact de la densité initial du pétrole.....	96
I.4 Etude de l'impact de la variation de la perméabilité.....	97
II. Résultats et discussion relatifs au chauffage des bâtiments à partir du mazout	99
II.1 Impact du type de béton	99

II.2 Impact de la teneur en humide.....	101
II.3 Impact de la température extérieur et de l’humidité sur la puissance fournie.....	103
II.4 Évaluation de la production de gaz à effet de serre au cours du processus de chauffage par le Mazout.....	108
III. CONCLUSION	112
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	113
Bibliographies	117
Liste des publications	126

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1: Les débuts de l'exploitation du pétrole en Pennsylvanie. (Wikipedia)</i>	6
<i>Figure 2: Prix du pétrole en USD/bbl en fonction de sa densité API.</i>	7
<i>Figure 3: Accumulation et enfouissement (Geologie des ressources fossiles, François Fournier)</i>	9
<i>Figure 4:diagramme de Van Krevelen (Geologie des ressources fossiles, François Fournier)</i>	11
<i>Figure 5: les différentes étapes de la maturation (Geologie des ressources fossiles, François Fournier)</i>	12
<i>Figure 6: Une unité de séparation du brut sur l'une des îles artificielles du champ de Kashagan, au Kazakhstan (ROUSSEL MARC – TOTAL)</i>	14
<i>Figure 7: Schéma d'une tour de distillation de pétrole de laquelle sortent plusieurs produits pétroliers.</i>	15
<i>Figure 8: Hypocauste de la villa suburbainede Vieux-la-Romaine, Basse-Normandie, France.(wikipedia)</i>	18
<i>Figure 9: le Braserio, premier modèle de de cheminée (http://www.citedantan.org/)</i>	18
<i>Figure 10: image d'une poêle (wikipedia)</i>	19
<i>Figure 11: premier radiateur (Jef Franklin)</i>	20
<i>Figure 12: Circuit chaudière à gaz moderne (Wikipedia)</i>	20
<i>Figure 13: radiateur électrique en laiton</i>	21
<i>Figure 14: Générateur d'air chaud au mazout (Ressources naturelles canada)</i>	23
<i>Figure 15: Chaudière hydronique au mazout (Ressources naturelles canada)</i>	24
<i>Figure 16: Schéma d'un système de chauffage hydronique (Ressources naturelles canada)</i>	25
<i>Figure 17: Exemple pollution par les produits pétroliers</i>	26
<i>Figure 18: Bilan des forces agissant sur la lithosphère (Forsyth et Uyeda, 1975).</i>	33
<i>Figure 19 : Granulats légers naturels ((Le Hung NGUYEN, 2013)</i>	35
<i>Figure 20 : Granulats légers artificiels (Le Hung NGUYEN, 2013)</i>	36
<i>Figure 21 : Les techniques de modélisations (Husaunndée, 1999)</i>	37
<i>Figure 22: Structure de base des principaux hydrocarbures pétroliers</i>	42

<i>Figure 23: En haut : Styles de fractures observés dans un affleurement pour un réservoir. Au milieu : Croquis des fractures observées sur l'affleurement. En bas : La représentation des fractures dans le modèle de réservoir. (Bentley et al. 2017).</i>	46
<i>Figure 24: Chaîne de transmission des polluants organiques chez les êtres vivants(Harmens et al., 2013)</i>	50
<i>Figure 25: Schémas des pièges structuraux (Magoon et al, 1994)</i>	52
<i>Figure 26: Schémas de pièges stratigraphiques. (Magoon et al, 1994)</i>	52
<i>Figure 27: système pétrolier (ifpenergiesnouvelles.fr)</i>	53
<i>Figure 28: Schéma des différents types de migration. (TISSOT ET WELTE, 1984)</i>	54
<i>Figure 29: Mécanisme de la migration à l'échelle des pores (Berg, 1975).</i>	56
<i>Figure 30: Formation de filaments d'hydrocarbures entre les grains d'une roche (Berg, 1975)</i>	58
<i>Figure 31: Accumulation d'huile sous une roche à forte pression capillaire, puis fuite à travers cette barrière sous la forme de filaments d'hydrocarbures. (Berg, 1975)</i>	58
<i>Figure 32: Schéma d'une expérience représentant une injection d'huile en bas d'un tube rempli de billes de verre saturé en eau. (Catalan et al. 1992).</i>	59
<i>Figure 33: Représentation schématique de la pression de flottabilité dans une accumulation d'hydrocarbures.</i>	60
<i>Figure 34: Communication de pression</i>	61
<i>Figure 35: Hauteur des colonnes d'hydrocarbures en fonction de la pression capillaire et de la différence de densités entre les hydrocarbures et l'eau (exprimée en kg.m^{-3}) (Carruthers, 2003).</i>	62
<i>Figure 36: Angle de contact θ de l'interface huile/eau. (Pegaz-Fiornet, 2011)</i>	63
<i>Figure 37: Exemple illustrant les différents types de transferts de chaleur. (Philippe Marty, 2013)</i>	82
<i>Figure 38: Méthode Runge Kutta d'ordre 4</i>	86
<i>Figure 39: Erreur lors de l'exécution d'un schéma d'Euler explicite</i>	87
<i>Figure 40: Erreur lors de l'exécution d'un schéma d'Euler implicite</i>	88
<i>Figure 41: discrétisation en volumes finies dans le cas monodimensionnel</i>	90
<i>Figure 42: Représentation de la distribution du pétrole en fonction de la distance dans une roche intacte. Nous avons pris une compressibilité $C = 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ et nous considérons un pétrole lourd de masse volumique 20° API ; les distances ici sont exprimées en m.</i>	93
<i>Figure 43: profil temporel de la distribution du pétrole dans une roche intacte réalisé dans les mêmes conditions que celles de la figure (45). Ici le temps est exprimé en mois.</i>	93

- Figure 44: Représentation de la distribution du pétrole en fonction de la distance dans une roche sableuse. Le coefficient de compressibilité $C = 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ et nous considérons un pétrole lourd de masse volumique 20° API ; les distances ici sont exprimées en mètre (m), le temps en mois. _____ 94
- Figure 45: profil temporel de la distribution du pétrole dans une roche sableuse. Le coefficient de compressibilité est $C = 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ et nous considérons un pétrole lourd de masse volumique 20° API ; les distances ici sont exprimées en mètre (m), le temps en mois. _____ 95
- Figure 46: Représentation de la distribution du pétrole en fonction de la distance dans une roche argileuse. Le coefficient compressibilité $C = 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$ et nous considérons un pétrole lourd de masse volumique 20° API ; les distances ici sont exprimées en mètre (m), le temps en mois. _____ 95
- Figure 47: profile temporelle de la distribution du pétrole dans une roche argileuse de coefficient compressibilité $C = 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$. 1. Nous considérons un pétrole lourd de masse volumique 20° API ; les distances ici sont exprimées en mètre (m), le temps en mois et les densités en kg/m^3 . _____ 96
- Figure 48: profil temporelle de la distribution du pétrole dans une roche argileuse de coefficient compressibilité $C = 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ pour 3 types de pétroles : pétrole léger $d = 25^\circ$ (courbe en bleu), pétrole lourd, $d = 20^\circ$ (courbe en vert), pétrole extra-lourd, $d = 9^\circ$ (courbe en rouge). Nous considérons un pétrole lourd de masse volumique 20° API ; les distances ici sont exprimées en mètre (m), le temps en mois et les densités en kg/m^3 . _____ 97
- Figure 49: Représentation de la distribution du pétrole en fonction de la distance dans une roche argileuse de coefficient compressibilité $C = 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$, pour deux valeurs différentes de la perméabilité : $k = 10^{-14} \text{ m}^2$ (courbe en rouge) et $k = 10^{-12} \text{ m}^2$. Nous considérons un pétrole lourd de masse volumique 20° API ; les distances ici sont exprimées en mètre (m), le temps en moi et les densités en kg/m^3 _____ 98
- Figure 50: Température dans le mur en béton normal en fonction de la teneur en humidité. La teneur en humidité initiale sur la surface altérée est de $\omega_0 = 100\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant 10°C . Les courbes sont tracées à des périodes de temps successives. ____ 101
- Figure 51: Température dans le mur en béton de pierre ponce en fonction de la teneur en humidité. Le taux d'humidité initial sur la surface altérée est de $\omega_0 = 100\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant -5°C . _____ 101
- Figure 52: Température dans le mur en béton de pierre ponce en fonction de la teneur en humidité. Le taux d'humidité initial sur la surface altérée est de $\omega_0 = 300\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant -5°C . _____ 102

- Figure 53: Puissance fournie pour le chauffage en fonction de la teneur en humidité. Ici, le mur est en béton normal. Le taux d'humidité initial sur la surface altérée est de $\omega_0 = 100\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant -5°C . _____ 103
- Figure 54: Puissance fournie pour le chauffage en fonction de la teneur en humidité. Ici, le mur est en béton normal. Le taux d'humidité initial sur la surface altérée est de $\omega_0 = 100\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant 10°C . _____ 103
- Figure 55: Puissance fournie pour le chauffage en fonction de la teneur en humidité. Ici, le mur est réalisé en béton normal. Le taux d'humidité initial sur la surface altérée est de $\omega_0 = 100\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant 15°C . _____ 104
- Figure 56: Puissance fournie pour le chauffage en fonction de la teneur en humidité. Ici, le mur est constitué de béton ponce. Le taux d'humidité initial sur la surface altérée est de $\omega_0 = 100\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant 15°C . _____ 105
- Figure 57: changement de la puissance fournie en fonction de la teneur en humidité. Ici, le mur est constitué de béton normal. Le taux d'humidité initial sur la surface altérée est de $\omega_0 = 500\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant -5°C . _____ 105
- Figure 58: Profil spatial de la température du mur en fonction de la teneur en humidité. Ici, le mur est constitué de béton normal. La teneur en humidité initiale sur la surface altérée est de $\omega_0 = 300\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant 0°C . _____ 106
- Figure 59: Profil spatial de la température du mur en fonction de la teneur en humidité. Ici, le mur est constitué de béton ponce. La teneur en humidité initiale sur la surface altérée est de $\omega_0 = 300\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant 0°C . _____ 106

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1: caractéristiques de différents pétroles bruts (Guibet, 1997)</i>	13
<i>Tableau 2: Produit pétrolier issue du raffinage simple et complexe du pétrole.(le mazout : caractéristique et stockage, 2014)</i>	16
<i>Tableau 3: récapitulatif des enveloppes de la Terre interne et de leurs principales caractéristiques (Planète Terre)</i>	30
<i>Tableau 4: Composition chimique des principaux hydrocarbures pétroliers (Fingas 2012)</i>	44
<i>Tableau 5 : Classification des fractures expérimentales et naturelles</i>	46
<i>Tableau 6: Exemples de vitesses de migration d'huile dans un tube rempli de billes de verre saturé en eau (Catalan et al. 1992)).</i>	59
<i>Tableau 7: Exemples de tension interfaciale. (Pegaz-Fiornet, 2011)</i>	63
<i>Tableau 8: Pressions capillaires au mercure pour plusieurs échantillons de roche. (Schowalter, 1979).</i>	65
<i>Tableau 9 : les différentes valeurs de la perméabilité pour différents types de roche</i>	67
<i>Tableau 10: valeurs du coefficient de compressibilité pour certains matériaux et fluide</i>	67
<i>Tableau 11 : Propriétés physique du mazout</i>	79
<i>Tableau 12: Données d'entrée relatives aux différents types de béton</i>	85
<i>Tableau 13: Puissance fournie pour le chauffage. Ici, les murs du bâtiment sont en béton normal. Le taux d'humidité est fixé à 100kg/m³</i>	100
<i>Tableau 14: Puissance fournie pour le chauffage. Ici, les murs du bâtiment sont en béton ponce. Le taux d'humidité est fixé à 100kg/m³</i>	100
<i>Tableau 15: Composition en masse du Mazout</i>	108
<i>Tableau 16: Quantité de CO₂, SO₂ , CO produit lors de la combustion du Mazout</i>	110
<i>Tableau 17: pouvoir calorifique et chaleur de combustion de quelques combustibles.</i>	111

LISTE DES GRANDEURS PHYSIQUE ET UNITE

\emptyset	<i>porosité de la roche [-]</i>
\emptyset_0	<i>porosité initiale de la roche [-]</i>
A	<i>coefficient de sorption [$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{s}^{1/2})$]</i>
b	<i>supplément de conductivité thermique [%]</i>
D_ω	<i>coefficient de diffusivité de l'humidité [m^2/s]</i>
g	<i>accélération de la pesanteur [m/s^2]</i>
h	<i>hauteur d'hydrocarbure piégé [m]</i>
h_c	<i>hauteur critique [m]</i>
J_A	<i>vecteur densité de courant de particules des particules de A (molécule $\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$)</i>
L	<i>épaisseur du mur [m]</i>
P_b	<i>pression de flottabilité [Pa]</i>
P_c	<i>Pa pression capillaire [Pa]</i>
P_{chw}	<i>pressions capillaires hydrocarbures/eau [Pa]</i>
P_{cma}	<i>pressions capillaires mercure/air, [Pa]</i>
P_{hydro}	<i>pression hydrostatique [Pa]</i>
P_m	<i>pression du fluide mouillant [Pa]</i>
P_{nm}	<i>pression du fluide non mouillant [Pa]</i>
Q	<i>le débit volumique filtrant [m^3/s]</i>
r	<i>diamètre du seuil de pore [m]</i>
r_p	<i>rayon de pore de la roche réservoir [m]</i>
r_t	<i>rayon de pore de la roche barrière [m]</i>
S	<i>surface du mur [m^2]</i>
T	<i>température [$^\circ\text{K}$]</i>
t	<i>temps [s]</i>
T_e	<i>temperature externe [$^\circ\text{K}$]</i>
T_i	<i>temperature interne [$^\circ\text{K}$]</i>
T_x	<i>temperature at a given position, x [$^\circ\text{K}$]</i>
x	<i>distance à partir de la surface [m]</i>
γ	<i>tention interfacial [N/m]</i>
γ_{hw}	<i>tension interfacial hydrocarbures/eau [N/m]</i>

γ_{ma}	tension interfacial mercure/air [N/m]
θ	Angle de contact de l'interface huile/eau [°]
θ_{hw}	angles de contact de la roche avec hydrocarbures/eau [°]
θ_{ma}	angles de contact de la roche avec mercure/air. [°]
λ_0	conductivité thermique pour un mur sec [W/m .K]
λ_w	conductivité thermique du mur [W/m .K]
ρ_{eau}	masse volumique de l'eau [kg/m ³]
ρ_{huile}	masse volumique de l'huile [kg/m ³]
ρ_s	densité du mur à l'état sec [Kg/m ³]
Φ	puissance fournie [W]
φ_A	flux de particule A [molécule/s]
ω	teneur en humidité [Kg/m ³]
ω_f	teneur en humidité à saturation [Kg/m ³]
C	coefficient de compressibilité [1/p _a]
c_\emptyset	coefficient de compressibilité la roche [1/p _a]
k	perméabilité de la roche [m ²]
p	pression dans la roche [p _a]
p_0	pression initiale dans la roche [p _a]
v	vitesse [m/s]
z	hauteur verticale [m]
z_0	hauteur initiale [m]
μ	viscosité du fluide [p _a .s]
ρ	densité du pétrole [Kg/m ³]
ρ_0	densité initiale du pétrole [Kg/m ³]
φ	puissance fournie par unité de surface [W/m ²]

RESUME

Le travail dans cette thèse, a consisté en une contribution à l'élaboration d'un modèle physique des processus de migrations ascensionnel du pétrole et du chauffage des bâtiments à partir du mazout.

Pour le premier cas notre analyse a pris en compte la compressibilité des roches et la variabilité du coefficient de perméabilité. Nous avons démontré que le système est gouverné par une équation de diffusion fortement non linéaire. Cette équation a été résolue numériquement à l'aide de l'intégrateur à pas variable Runge-Kutta des quatrième et cinquième ordres DOPRI5. Trois types de roche ont été impliqués dans cette étude : la roche intacte, la roche argileuse et la roche sableuse. Nous avons obtenu que le type de roche, ainsi que le type d'huile, jouent un rôle crucial dans le processus de migration. Ainsi, dans le cas de la roche sableuse, le niveau de pollution atteint par le pétrole est d'environ 1430 m. Cette valeur passe à 1850 m quand on considère plutôt la roche argileuse pour la même période d'observation. En tenant compte du pétrole léger, nous avons atteint une distance d'environ 1200 m, alors que le pétrole extra-lourd a parcouru seulement 1000 m. s'agissant du coefficient de perméabilité, nous avons considéré deux valeurs différentes de la perméabilité : $k = 10^{-14} \text{m}^2$ et $k = 10^{-12} \text{m}^2$; ceux-ci ont montré que le niveau de pénétration des pétroles est aussi fonction de la perméabilité.

Dans le second cas nous avons évalué numériquement l'influence de l'humidité, de la température extérieure et du type de béton sur l'énergie fournie pour le chauffage des bâtiments. Le coefficient de diffusion n'est pas pris comme une constante. Les simulations ont été menées dans une plage de température allant de -5 à 20 °C, ce qui couvre la majorité des conditions thermiques dans lesquelles les personnes vivent dans les zones froides du globe. En conséquence, la consommation d'énergie a augmenté à la fois avec l'augmentation du niveau d'humidité et avec la diminution du niveau de la température extérieure. Par exemple, dans le cas du béton normal, lorsque la température extérieure était $T_1 = 15$ °C, la puissance de chauffage du bâtiment était de 30W/m^2 et lorsqu'elle était $T_1 = -5$ °C, la puissance de chauffage du bâtiment devenait 175W/m^2 . Ceci nous a permis d'affirmer que la présence d'humidité induit des dépenses énergétiques supplémentaires et donc une plus grande quantité de polluant pétrolier. Deux types de béton ont été impliqués dans cette étude, à savoir le béton normal et le béton de pierre ponce. Pour une température extérieure de -5 °C, la puissance de chauffage

nécessaire était de 175W/m^2 dans le cas d'un mur en béton normal. En revanche, nous n'avons besoin que d'environ $87,7\text{W/m}^2$ lorsque le mur était en béton de pierre ponce. La dépense énergétique pour le béton de pierre ponce était la moitié de celle du béton normal. Ceci entraîne une réduction de la quantité de polluant dans le cas de l'usage des murs en béton ponce.

ABSTRACT

The work in this thesis consisted of a contribution to the development of a physical model of the processes of upward migration of oil and the heating of buildings from fuel oil.

According to the first case our analysis has taken into account the compressibility of the rocks and the variability of the permeability coefficient. We have demonstrated that the system is governed by a strongly non-linear equation of diffusion. This equation has been solved numerically using the DOPRI5 fourth-and-fifth-order Runge-Kutta variable step integrator. Three types of rock were involved in this survey, namely intact rock, clay rock and sandy rock. We have obtained that the type of the rock, as well as the type of the oil, plays a crucial role in the migration process. So, in the case of the sandy rock, the maximum distance attainable by the oil is approximately 1430 m. This value turns into 1850 m when we consider rather the clay rock for the same period of observation. Taking into account light oil, we have reached a distance of about 1200 m, whereas extra-heavy oil let us to only 1000 m. Seeking for the impact of the coefficient of permeability, we have considered two different values of the permeability: $k = 10^{-14} \text{m}^2$ and $k = 10^{-12} \text{m}^2$. And a real gap was recorded between the rate of oil diffusion.

Considering the second case we numerically performed the influence of moisture, external temperature and the type of concrete on the energy provided for buildings heating. The coefficient of diffusion is not taken as a constant. A similar technique based on DOPRI5 fourth-and-fifth-order Runge-Kutta variable step integrator has been use. Investigations were conducted in the range of -5 to 20 °C, which cover the majority of thermal conditions in which people live. As a result, energy consumption increased both with the increasing level of moisture content and with the decreasing level of the external temperature. For instance, in the case or normal concrete, when the outside temperature was $T_1 = 15^\circ\text{C}$, the power of building heating was 30W/m^2 and when it was $T_1 = -5^\circ\text{C}$, the power of building heating became 175W/m^2 . We have shown that, the presence of moisture induces additional energy expenditures. Two different types of concrete were involved in this study, namely normal concrete and pumice concrete. For an outdoor temperature of -5°C , the required heating power was 175W/m^2 in the case of a normal concrete wall. On the other hand, we needed only about $87,7 \text{W/m}^2$ when the wall was made of pumice concrete. Showing that energy expenditure for pumice concrete was half that of normal concrete.

INTRODUCTION GENERALE

Les énergies primaires à savoir le soleil, le vent, l'eau et la biomasse sont les principaux facteurs à l'origine du fonctionnement et du développement des sociétés. En effet depuis l'antiquité, l'homme a toujours eu besoin d'énergies pour divers usages. Ceci a été le cas avec les animaux que l'homme a utilisé pour la production d'énergies. Les chevaux ont été utilisés pour le transport des hommes et des biens. Avec le temps, l'homme a appris à dompter les différentes autres sources d'énergies qui étaient à sa disposition. Dans ce sens, nous avons eu les moulins à vent qui fonctionnaient grâce au vent. Les différentes formes d'énergies citées plus haut ont en commun une caractéristique très particulière à savoir qu'elles ne sont pas polluantes.

Le domaine de l'énergie a connu un réel boom avec la découverte, l'exploitation, la production et la transformation du pétrole. Ce dernier de par ses multiples usages est devenu incontournable dans le vécu quotidien des hommes. Le pétrole et ses dérivées se retrouvent dans la quasi-totalité des domaines : la médecine, pharmacie, transport, industrie cosmétique, industrie textile pour ne citer que ceux-là. S'il est vrai que le pétrole de par ses différents usages représente une formidable source d'énergie, il n'en demeure pas moins une source de danger pour l'environnement. L'exploitation des gisements de pétrole donne souvent lieux à des destructions des écosystèmes. L'une des principales conséquences liées à l'exploitation, la production et l'utilisation du pétrole est la pollution qu'elle engendre. Cette pollution peut affecter l'atmosphère, les sols et les sous-sols.

S'agissant des sols et des sous-sols, les chercheurs ont mené plusieurs investigations dans ce sens (Kang et al, 1996 ; Labienec et al, 1996 ; Simo et al, 2019). Ces chercheurs se sont intéressés à la pollution engendrée dans les situations de déversement d'hydrocarbure à la surface de la terre ou dans les mers. Ces déversements peuvent être d'origine naturel à l'occasion d'une catastrophe naturelle ; mais elles peuvent également résulter de l'action des hommes : sabotages des pipes line. Les déversements des hydrocarbures ne sont pas les seules causes de pollution des sols et des sous-sols. Ces derniers peuvent également être contaminés lors de la migration tertiaire du pétrole. En effet, la formation du pétrole comprend deux principales étapes à savoir la diagenèse et la catagenèse. Les transformations de la matière organique au cours de la diagenèse aboutit à la formation du kérogène. Le kérogène ainsi formé sera transformé en pétrole au cours de la catagenèse. Le déplacement du pétrole hors de la roche mère est appelé migration primaire. Lorsque ce dernier migre pour être stocké dans la

roche réservoir, on parle de migration secondaire. Si par contre le pétrole ne trouve aucun obstacle sur son chemin, il poursuit son ascension vers la surface. Ce dernier cas de figure nous intéresse particulièrement. À l'occasion d'une faille ou d'un séisme la roche réservoir peut se fissurer et libérer le pétrole qu'elle contient également. En raison du caractère imprévisible de ces phénomènes, les caractéristiques physiques et chimiques des sols et des sous-sols pourront être affectées dans plusieurs régions du monde. Ceci représente le début d'un long processus de pollution parfois insoupçonné. La pollution sera la présence des produits pétroliers à des endroits où ils ne devraient pas être et ou à des concentrations supérieures aux normes.

S'agissant de la pollution par le pétrole lors de son utilisation et selon un rapport de l'Union européenne (Communication on the State of the Energy Union, 2016), le secteur du chauffage représente environ 35 % de la consommation énergétique annuelle de l'union européen. D'ou notre intérêt pour ce domaine d'utilisation du pétrole. Il y'a lieu d'agir pour réduire la quantité d'énergie impliquée dans ce secteur. Il s'agit de l'un des plus grands défis énergétiques auquel l'humanité est confrontée. Il faudrait donc développer des stratégies menant à l'optimisation du chauffage des bâtiments. Ce faisant, les émissions de polluants dangereux seront réduits. Ce sera une action concrète contribuant à la protection de notre environnement car c'est un fait que l'énergie et l'environnement sont deux concepts liés. Le chauffage des bâtiments fait référence à l'énergie nécessaire pour chauffer les bâtiments, qu'ils soient résidentiels ou dans le secteur des services, comme les écoles, les hôpitaux, les entreprises et les immeubles de bureaux. Environ 60% de l'énergie consommée dans une maison ordinaire sert au chauffage des locaux. Par conséquent, l'un des projets les plus importants pour tout propriétaire d'une maison, outre l'isoler et la rendre plus étanche, sera de choisir son système de chauffage. De véritables percées technologiques ont été enregistrées dans le secteur du chauffage au cours des dernières années et une grande variété de bons produits sont offerts sur le marché. Nous pouvons ainsi opter pour notre maison d'un chauffage au gaz, à l'électricité, au bois ou encore au mazout. Ce dernier modèle de chauffage fera l'objet de notre approche dans la suite de ce travail. Cependant, s'il est vrai qu'un choix judicieux peut contribuer à réduire sensiblement nos coûts de chauffage tout en rendant notre maison plus confortable, il en demeure pas moins que nous devons garder à l'esprit la préservation de l'environnement.

Dans ce travail, nous nous proposons d'effectuer une modélisation du processus de migration ascensionnel du pétrole et du chauffage des bâtiments à partir du mazout.

La problématique de ce travail est l'évaluation de l'impact environnemental des fuites de pétrole hors de la roche mère et lors de son utilisation dans le chauffage des bâtiments.

La pollution des sous-sols et des sols peut se faire par le pétrole relâché par la roche mère ou par la roche réservoir. Le pétrole qui migre de la roche mère ou du réservoir vers la surface du sol comprend le pétrole léger, le pétrole lourd et le pétrole extra-lourd. Il convient de noter que les sols pollués ont des impacts négatifs sur l'environnement et la santé humaine.

Afin d'explorer la pollution au cours du chauffage des bâtiments à partir du mazout. Nous traiterons des questions liées à l'énergie fournie pour le chauffage des bâtiments, plus précisément en période hivernale. En effet, aucune vie ne peut être imaginée dans un bâtiment, pendant cette période, sans énergie. Il est important de s'attaquer à ce problème car la fonction principale d'une maison est d'offrir à ses occupants un environnement de vie et de travail confortable, sûr et attrayant. Nous allons dans ce travail explorer la piste d'un béton différent du béton normal constamment utilisé ; car, la température et la teneur en humidité sont des paramètres importants qui affectent les propriétés thermiques du béton (Taoukil et al, 2013).

Les objectifs spécifiques de travail sont :

- Identifier les causes possibles de la migration des hydrocarbures ;
- Concevoir un modèle physique de migration des hydrocarbures
- Evaluer l'impact des caractéristiques physique des sols et du pétrole sur le phénomène de migration du pétrole ;
- Concevoir un modèle physique du chauffage des bâtiments
- Evaluer l'impact de l'humidité sur le processus de chauffage des bâtiments
- Évaluer l'apport des bétons ponce dans le processus de chauffage des bâtiments ;
- Etablir des pistes de solution aux différentes situations ;

Ce manuscrit présente une synthèse du travail que nous avons effectué au cours de ces dernières années sur les problématiques ci-dessus présentées. Il est divisé en trois chapitres, dont les grandes lignes sont les suivantes.

Le premier chapitre comporte une revue de littérature portant sur la présentation du pétrole dans sa généralité, ses origines en passant par sa formation pour arriver à son exploitation et ses usages. Une autre partie de ce chapitre sera consacrée à la croûte terrestre, sa structure, sa composition et la dynamique qui anime cette partie de la terre. Nous donnerons également une vue d'ensemble sur le chauffage des bâtiments. Nous terminerons ce chapitre par quelques modèles.

Le chapitre deux est consacré au matériel et méthode. Ce chapitre sera divisé en trois grandes parties. La première partie présente les fondements, les causes et les conséquences de

la pollution par les produits pétroliers. La deuxième partie nous permettra de connaître comment le pétrole migre dans le sous-sol. Les différents phénomènes physiques liés à cette migration seront étudiés en détail. Nous donnerons la méthodologie et la méthode permettant la modélisation de la migration des hydrocarbures depuis la roche mère vers la surface de la terre. La troisième partie de ce chapitre sera consacrée au processus de chauffage des bâtiments à partir du mazout. Nous parlerons du mazout, de ses caractéristiques physiques. Nous verrons le béton de pierre ponce. L'ensemble de ces éléments nous permettra de réaliser une modélisation physique du processus de chauffage des bâtiments à partir du mazout. Ceci afin de voir comment le type de béton, l'humidité et la température extérieure peuvent avoir une influence sur la quantité d'énergie nécessaire au chauffage d'une maison et la production de gaz à effet de serre qui en découle.

Le chapitre trois présente les résultats obtenus, les commentaires et des discussions. Il présente, en outre, les profils spatio-temporels de la distribution du pétrole dans les sols d'une part et les profils temporels de la distribution de l'humidité dans les deux types de murs en bétons et pour différentes conditions de température extérieure d'autre part.

La conclusion générale récapitule les principaux résultats de cette étude et fait ressortir les points forts du travail. Elle suggère également, dans leurs grandes lignes des possibilités d'extension et de poursuite des recherches dans ce domaine.

CHAPITRE I : REVUE DE LITTÉRATURE

I. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de faire une revue de littérature sur les thèmes centraux de notre sujet de thèse. Il s'articule autour de trois points : le pétrole ; la croûte terrestre ; et le chauffage des bâtiments. Dans la section pétrole, nous verrons : ses origines et son historique ; les étapes de sa formation ; les différentes transformations et produits dérivés ; les usages et aspect négatif du pétrole ; et enfin l'impact social, économique et politique lié à sa présence. Dans la partie usages nous traiterons le cas particulier du chauffage des bâtiments. La section suivante porte sur la croûte terrestre. Elle nous permet de présenter l'environnement d'évolution des hydrocarbures. Dans cette section, nous présentons : sa structure et son organisation ; la tectonique des plaques et la dynamique de la lithosphère. Nous terminons cette section par la présentation du concept de modélisation

II. Le pétrole

Le centre nationale des ressources textuelles et lexical définit Le pétrole (en latin *petroleum*, du grec *petra*, « roche », et du latin *oleum*, « huile ») comme une huile minérale d'origine naturelle composée d'une multitude de composés organiques, essentiellement des hydrocarbures, piégée dans des formations géologiques particulières. Son exploitation comme source d'énergie fossile est l'un des piliers de l'économie industrielle mondiale. Le pétrole fournit la quasi-totalité des carburants liquides, il est à la base de la pétrochimie. Le pétrole dans son gisement est fréquemment associé à des fractions légères qui se séparent spontanément du liquide à la pression atmosphérique, ainsi que diverses impuretés comme le dioxyde de carbone, le sulfure d'hydrogène. Compte tenu de son importance nous nous proposons ici d'aller à sa découverte, découverte au cours de laquelle nous explorerons les fondements de sa formation, de sa transformation, les produits dérivés, ses différents usages, et pour finir ses enjeux économiques politiques et sociaux.

II.1 Historique et découverte

Le pétrole est connu et utilisé depuis la plus haute Antiquité. Il forme des affleurements (*Source bitumineuse de La Poix*) dans les lieux où il est abondant en sous-sol ; ces affleurements ont été utilisés de nombreuses façons : calfatage des bateaux, ciment pour le pavage des rues, source de chauffage et d'éclairage, et même produit pharmaceutique. Sa

distillation, décrite dès le Moyen Âge, donne un intérêt supplémentaire à ce produit pour les lampes à pétrole. Depuis sa découverte à nos jours le pétrole a connu une grande évolution.

En effet c'est à partir des années 1850 qu'on assiste à une exploitation et une utilisation industrielle du pétrole.

Les années 1855 – 1901 représentent la naissance de l'industrie pétrolière. Durant cette période nous assistons à la naissance de plusieurs unités de distillation du pétrole et la mise sur pieds des premiers puits de pétrole industriel.



Figure 1: Les débuts de l'exploitation du pétrole en Pennsylvanie 1862. (Wikipedia)

C'est ainsi qu'en 1855, George Bissell et Jonathan Eveleth créent la société *Pennsylvania Rock Oil Company* avec pour but la distillation à l'échelle industrielle.

En juillet 1858, le professeur de géologie Georg Christian Konrad Hunäus supervise le premier forage pétrolier en Allemagne sur la commune de Wietze qui exploite le premier puits de pétrole en juin 1859.

De 1901-1945 des champs pétroliers importants ont été découverts dans plusieurs pays dans le monde (Canada, Indonésie, Pérou, Mexique etc ...). Le domaine pétrolier prend une dimension mondiale. C'est ainsi que nous assistons pendant cette période au développement des techniques et des marchés.

Les progrès des techniques d'explorations pétrolières, notamment par des dispositifs d'analyse électrique des sous-sols, expérimentés dans le nord de l'Alsace par les frères Schlumberger à partir de 1927(*Sainson, Stéphane (2010)*), révolutionnent le secteur. Ces recherches conduiront à la technique de la diagraphie, qui permet de détecter les strates productrices pendant le forage. À la même époque, on met au point les techniques de carottage, qui identifient précisément les couches géologiques ; enfin la sismique, en apportant une description de plus en plus précise du sous-sol avant tout forage, et se rend ainsi indispensable.

La prospection directe du pétrole offshore voit commercialement le jour en 2000 par l'emploi de méthodes électromagnétiques spécifiques en complément des méthodes sismiques. (Stéphane Sainson, 2012).

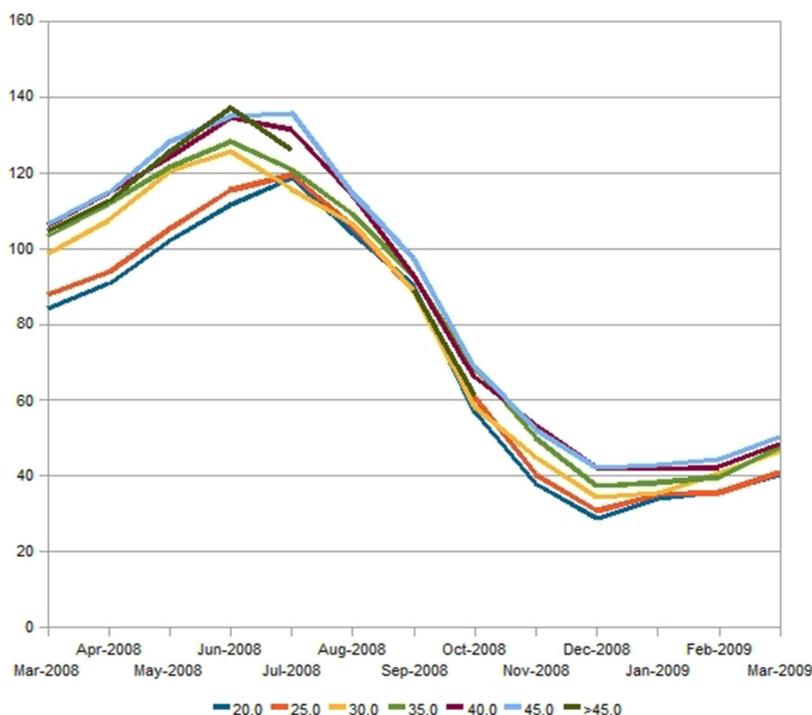


Figure 2: Prix du pétrole en USD/bbl en fonction de sa densité API.
(Chart of oil prices depending on their API density, 2008-2009)

Dans le cadre du développement commercial, la figure (2) ci-dessus montre l'évolution parallèle du prix d'un baril de pétrole en USD, selon sa densité API, dans la période 2008-2009.

De 1945-1973 : c'est l'abondance, la forte croissance économique que connaissent les pays développés entre 1950 et le milieu de 1970 s'appuie sur l'accès à l'énergie bon marché. Sa consommation passe de 1,7 GTep en 1950 à 5,2 GTep en 1970, soit un triplement en 20 ans. Au cours de cette période, le pétrole détrône progressivement le charbon dans les pays où celui-ci se fait rare, pour l'alimentation des centrales électriques et de l'industrie. La population mondiale augmente de 60 % durant ces années, tandis que la production de pétrole est multipliée par sept. À cette époque, le pétrole est encore facile : les nouveaux gisements se trouvent facilement, et un petit nombre de régions productrices suffit à la consommation mondiale.

La période 1973-1985 correspond à la crise pétrolière. Elle marque l'histoire du monde avec les premier et deuxième chocs pétroliers. Le **premier choc pétrolier** est une crise mondiale des prix du pétrole qui débute en 1973 à la suite du pic de production de pétrole des États-Unis et de l'abandon des accords de Bretton-Woods qui a pour effet une forte

concentration de la dévalorisation du dollar et donc des cours du pétrole qui sont libellés en dollars. Le deuxième choc pétrolier est une crise mondiale des prix du pétrole ayant principalement trouvé sa source en Iran. Sous les effets conjugués de la révolution iranienne, de la guerre Iran-Irak et du redémarrage de la demande mondiale à la suite du premier choc pétrolier, le prix du pétrole est multiplié par 2,7 entre le milieu de l'année 1978 et 1981. La seconde crise pétrolière est sans doute encore plus sévère que la précédente en ce qu'elle n'épargne ni les pays nouvellement industrialisés d'Asie ni ceux du Tiers monde.

Les années 1986-2001 sont marquées par la surproduction. On assiste à une nouvelle période de prix relativement bas, qui a suivi le contre-choc pétrolier de 1986, due à la conjonction de plusieurs phénomènes. D'une part, à la suite d'un accord entre les États-Unis et l'Arabie saoudite, les pays du Golfe augmentent massivement leur production. Il s'agissait en partie d'un plan des États-Unis visant à couler l'économie soviétique, pour laquelle le pétrole représentait une source de devises importantes. Les pays du Golfe, contrairement à l'URSS, ont des coûts de production bas, et peuvent donc supporter une baisse du prix du baril. Ce plan fonctionna, et est une cause très importante, quoique méconnue, de l'effondrement soviétique. Cette chute se traduit par la perte de plusieurs millions de barils par jour entre 1990 et 1995, mais fut compensée par une baisse de la demande des mêmes pays. D'autre part, le pétrole des nouvelles régions explorées en réponse aux chocs pétroliers est exploité intensivement, les réserves mondiales s'épuisant à un rythme beaucoup plus rapide que celui des régions traditionnelles.

Le prix du pétrole depuis mi-2014 est divisé par deux au deuxième semestre 2014, s'établissant autour de 50 \$ le baril en décembre, tarif qui se maintient en moyenne tout au long de 2015.

II.2 Formation

Le pétrole, tout comme le charbon, est un produit formé par la décomposition de résidus d'origine organique et ou végétale. Ceux-ci se sont transformés en pétrole, sous l'action combinée des processus chimiques et thermodynamiques sur des millions d'années. L'ensemble des processus conduisant à la formation de ces pétroles peut être subdivisé en 2 principales étapes.

II.2.1 L'accumulation et l'enfouissement de matière organique

L'accumulation de matière organique : il s'agit d'un processus au cours duquel une partie des débris organiques et ou végétaux au lieu d'être recyclées par la biosphère ; s'enfouit dans la terre sous l'effet de la gravité et s'accumule (voir figure 3).

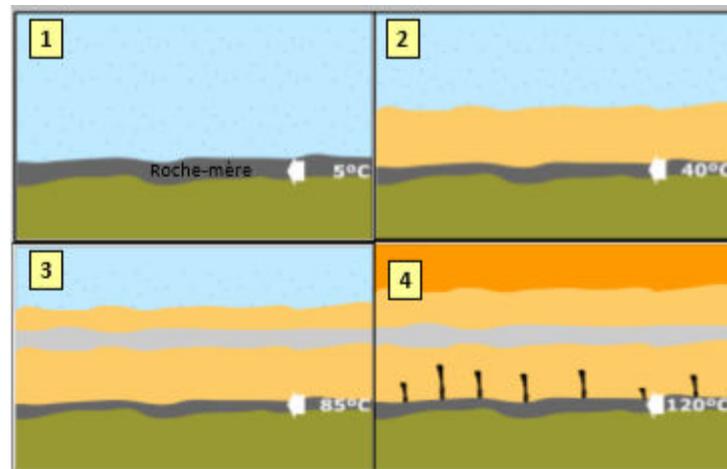


Figure 3: Accumulation et 'enfouissement 2009 (Geologie des ressources fossiles, François Fournier)

Le processus démarre à l'étape une : c'est la phase d'accumulation ; à ce niveau la matière organique est principalement constitué de :

- des protéines : elles constituent une part importante et entrent dans la composition des tissus animaux et des enzymes ;
- Les carbohydrates : ces derniers regroupent les glucides et les polymères. Ils forment une part importante des tissus avec notamment la cellulose et la chitine.
- La cellulose est principalement produite par les végétaux supérieurs et entre pour une large part dans la constitution du bois
- La chitine se trouve principalement chez certains animaux.
- Les lipides : qui regroupent tous les produits organiques insolubles dans l'eau et solubles dans les solvants organiques. Les lipides sont abondants dans les algues, mais s'observent également dans des grains de pollen et les spores. Les études chimiques montrent que les pétroles dérivent principalement des fractions lipides de la matière organique.

En plus de ces constituants de base, on peut signaler aussi

- La lignine, qui forme l'ossature des tissus des plantes supérieures
- Le tannin, qui intègre les tissus corticaux.

En fonction des caractéristiques de la matière organique, on distingue deux principaux types de faciès organiques :

- Les faciès humiques ou détritiques en relation avec les transports aquatiques ou aériens. Le matériel humique est en grande partie formé de débris de végétaux supérieurs, de spores et de pollens. Généralement associés à une sédimentation argilosableuse, ce faciès correspond à des climats humides.
- Les faciès sapropéliques ou authigènes, sont essentiellement aquatiques, marins, saumâtre ou lacustre, et constitués en grande partie d'algues et de matériaux planctoniques. Ils correspondent à des climats subdésertiques.

Tous ces éléments associés aux bactéries constituent la biomasse (c'est à dire les plantons marins et lacustre). Les bactéries et les plantes supérieures terrestres composées de cellulose (50%) et de lignine (15 -25 %), avec le temps vont sédimenter et former des couches de sédiments riches en matière organique : le Kérogène.

L'accumulation des matières organiques peuvent être d'origine marine ou terrestre. Toutefois les débris seront de nature animal et ou végétale. La matière organique ainsi entassé va se trouver enseveli sur une montagne de différentes couches de matériaux : il s'agit de l'enfouissement. Au fur et mesure que se phénomène évolue on observe une augmentation de la pression et de la température. Au cours du processus d'enfouissement les températures varient de 5°C à 120°C ; à la fin de cette phase, avec l'augmentation progressive de la température, de la pression et des bactéries anaérobies, on obtient du kérogène.

En fonction du type de matière organique initialement enfoui dans les profondeurs du sol, nous pouvons obtenir différents kérogènes. Ainsi lorsque nous avons à la base des Algues et bactéries lagustres nous obtiendrons de l'huile uniquement, si par contre à la base nous avons des algues et du plancton marin nous obtiendrons de l'huile plus du gaz et en dernier ressort lorsque nous avons uniquement des végétaux terrestres à la base, nous obtiendrons à la fin du gaz uniquement (voir figure 4).

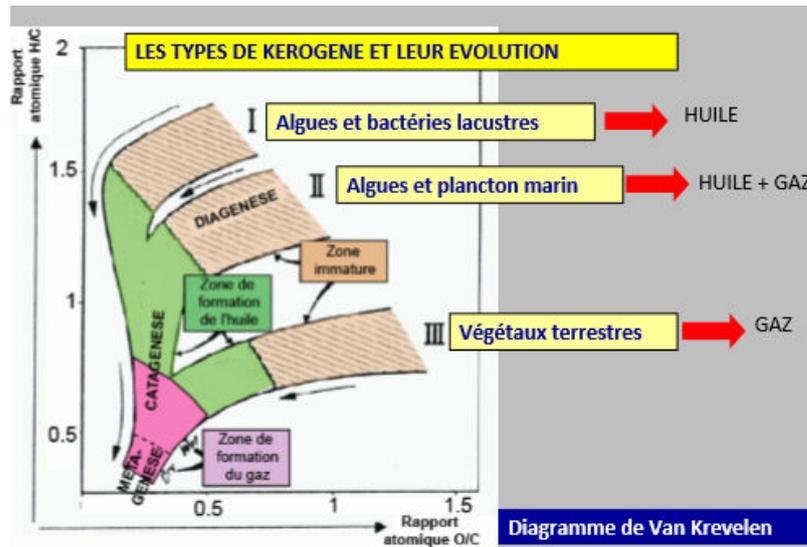


Figure 4: diagramme de Van Krevelen 2009 (Geologie des ressources fossiles, François Fournier)

II.2.2 La maturation

Selon son origine, marine, continentale ou lacustre, le kérogène ne possède pas la même composition. Cependant, une fois dans la roche mère, il subira le même sort quelle que soit sa provenance. La maturation se fait en trois étapes :

Première étape s'appelle la diagenèse. Les processus de diagenèse sont variés et complexes : ils vont de la compaction du sédiment à la cimentation, en passant par des phases de dissolution, de recristallisation ou de remplacement de certains minéraux. Le processus diagenétique qui est principalement responsable du passage de sédiment à la roche est la cimentation. Il s'agit d'un processus relativement simple. Si l'eau qui circule dans un sédiment, par exemple le sable, est sursaturé par rapport à certains minéraux, elle précipite ces minéraux dans les pores du sable. Lesquels minéraux viennent souder l'ensemble des particules du sable ; on obtient alors une roche sédimentaire qu'on appelle grès.

Deuxième étape : la catagenèse, cette seconde étape se déroule à des profondeurs, et à des températures de l'ordre de 60° à 120° C ; il y a craquage thermique. Les composés se scindent en molécules de plus en plus petites au fur et à mesure de l'enfouissement. La formation du pétrole proprement dit a lieu à ce moment dans des conditions dite de fenêtre à huile.

Troisième étape : cette phase ultime du kérogène est appelée métagénèse. C'est le stade de la formation du gaz sec (méthane) par craquage du pétrole. On parle de fenêtre à gaz située à partir de 3000 mètres de profondeur.

Les hydrocarbures sont ainsi formés au terme de l'intervention des deux principaux facteurs : la température et le temps (voir figure 5).

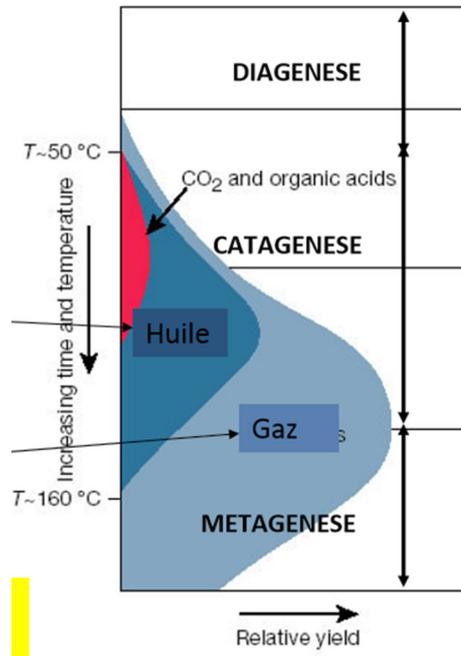


Figure 5: les différentes étapes de la maturation 2009 (Géologie des ressources fossiles, François Fournier)

Il est à noter cependant que le craquage évoqué au cours de la catagenèse peut se faire à deux niveaux. Le craquage du kérogène, appelé également craquage primaire, aboutit à la création d'hydrocarbures, mais aussi de CO₂, d'eau. Une variété spécifique de kérogène peut même se transformer en charbon. Les hydrocarbures créés peuvent à leur tour subir une transformation sous l'effet de la température. Ce craquage, appelé craquage secondaire, produit des hydrocarbures mais aussi du bitume, des asphaltènes ainsi que des gaz inertes et acides. Les composés non-hydrocarbures sont généralement retenus dans la roche et ne migrent pas.

II.3 Classification et caractéristiques des pétroles bruts

Une première subdivision du pétrole brut est opérée sur base de la différence de densité. Cette propriété nous permet de séparer naturellement les différents composants à savoir gaz, essence, fractions légères puis fractions lourdes.

Ainsi on distingue successivement :

- le brut léger (densité de $\pm 0,800$ à $0,830$), comme le pétrole de Libye ou de la Mer du nord, qui donne beaucoup d'essence et de fractions mi-lourdes;
- le brut moyen, qui provient essentiellement du Moyen orient;

- le brut lourd, d'une densité de plus de 0,890 (fioul lourd d'Arabie et du Venezuela), qui donne par distillation atmosphérique jusqu'à 80 % de combustibles résiduels (fiouls lourds).

Du point de vue chimique, le pétrole brut se compose essentiellement de structures hydrocarburées. Les hydrocarbures présents dans le pétrole sont subdivisés en plusieurs groupes :

- les hydrocarbures paraffiniques (hydrocarbures saturés à chaîne ouverte),
- les hydrocarbures naphténiques (hydrocarbures à chaîne cyclique),
- les hydrocarbures aromatiques (hydrocarbures insaturés à chaîne cyclique) et oléfiniques (hydrocarbures insaturés à chaîne ouverte)

Du fait de leur grande disparité dans leur composition, les caractéristiques physico-chimiques des pétroles bruts peuvent être extrêmement différentes selon la zone de production et peuvent même varier d'un gisement à l'autre (Guibet, 1997). Le Tableau (2) présente les principales caractéristiques de quelques pétroles bruts d'origines diverses.

Tableau 1: caractéristiques de différents pétroles bruts (Guibet, 1997)

Caractéristiques	Norn du pétrole brut				
	Arabian Light (Arabie Saoudite)	Salaniya (Arable Saoudite)	Zakum (Abu Dhabi)	Koweit (Koweit)	Kirkuk (Irak)
Densité	0,858	0,888	0,822	0,869	0,849
Viscosité (mm ² /s)	10 (a 21 °C)	37 (a 21 °C)	43 (a 20 °C)	10 (a 38 °C)	13 (a 10 °C)
Point d'écoulement (°C)	-35	-29	-21	-15	-22
Teneur en Soufre (%)	1,79	2,85	1,05	2,52	1,97
Rendement (% vol) :					
Gaz et essences	20	18	28	20	23
Kerosene et gazole	35	27	37	33	32
Residu atmospherique	45	55	35	47	45

Cette classification du pétrole brut est réalisée à partir de l'échelle API qui traduit la viscosité et donc la longueur des chaînes carbonées des composés le constituant. La densité des pétroles bruts constitue une caractéristique très importante car elle peut être utilisée dans l'identification d'une source d'hydrocarbure. Elle s'exprime couramment en degrés (°) API reliés à la densité à 60°F (Bocard, 2006) par la formule :

$$^{\circ}\text{API} = 141,5/d - 131,5 \quad (0.1)$$

Où

d est la densité à 15,6°C

Une autre caractéristique qui intervient dans la classification du pétrole est la teneur en soufre. Les pétroles à faible teneur en soufre sont qualifiés de doux (moins polluants) ou à l'inverse, de soufrés (plus polluants).

II.4 Transformations et produits dérivés

La transformation du pétrole brut est une opération incontournable. Dans une raffinerie (voir figure 6), le brut est transformé en produits finis suivant des processus rigoureux appartenant à trois types principaux d'opérations : séparation, conversion et amélioration.



Figure 6: Une unité de séparation du brut sur l'une des îles artificielles du champ de Kashagan, au Kazakhstan 2014 (ROUSSEL MARC – TOTAL)

La première étape est celle de la séparation des molécules par distillation atmosphérique en fonction de leurs poids moléculaires. Ce procédé consiste à chauffer le pétrole à 350/400 °C pour provoquer l'évaporation. Le chauffage s'effectue à la base d'une tour de distillation (voir figure 7). Les vapeurs de brut remontent dans la tour tandis que les molécules les plus lourdes, ou résidus lourds, restent à la base sans s'évaporer. À mesure que les vapeurs s'élèvent, les molécules se condensent les unes après les autres en liquides, jusqu'aux gaz qui atteignent seuls le haut de la tour, où la température n'est plus que de 150 °C. À différents niveaux de la tour se

trouvent des plateaux qui permettent de récupérer ces liquides de plus en plus légers. Chaque plateau correspond à une fraction de distillation, appelée aussi coupe pétrolière, depuis les bitumes (hydrocarbures très visqueux) jusqu'aux gaz. Les résidus lourds issus de cette distillation renferment encore beaucoup de produits de densité moyenne. On les soumet, dans une autre colonne, à une seconde distillation qui permet de récupérer plus de produits moyens (fiouls lourds et gazole).

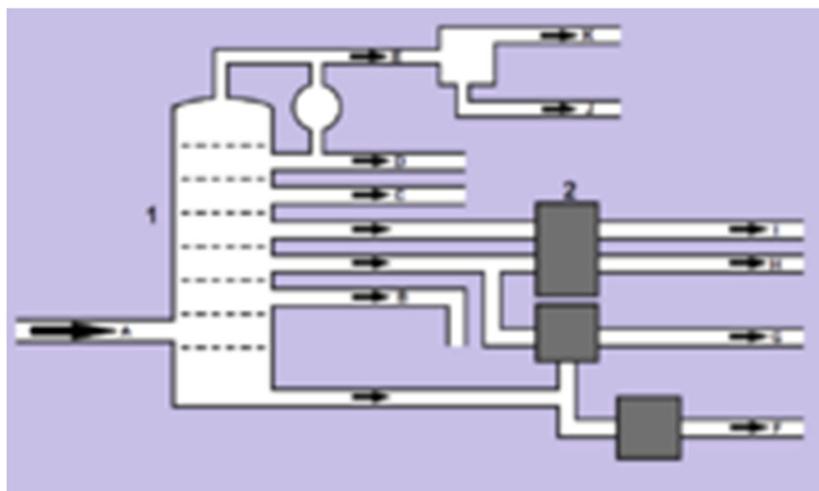


Figure 7: Schéma d'une tour de distillation de pétrole de laquelle sortent plusieurs produits pétroliers 2011.

Légende : 1 - tour de distillation 2 - tour auxiliaire A - pétrole B - huile lubrifiante C - kérosène D - essence E - hydrocarbures gazeux F - mazout G - fioul lourd H - fioul léger I - diesel J - propane-butane K - gaz de raffinage

Après les opérations de séparation, la proportion d'hydrocarbures lourds reste encore trop importante. Pour répondre à la demande en produits légers, on casse ces molécules lourdes en deux ou plusieurs molécules plus légères. Ce procédé de conversion, appliqué à 500 °C, est également appelé craquage catalytique car il fait intervenir un catalyseur. Le tableau (3) ci-dessous donne la composition en pourcentage des Produits pétrolier issue du raffinage simple (sans craquage) et complexe (avec craquage) du pétrole. 75 % des produits lourds soumis à la conversion sont ainsi transformés en gaz, essence et gazole. D'autres procédés permettent d'améliorer ce résultat par des ajouts d'hydrogène (hydrocraquage) ou en employant des méthodes d'extraction du carbone (conversion profonde). Plus une conversion est poussée, plus elle est coûteuse et gourmande en énergie. L'objectif permanent des raffineurs est de trouver l'équilibre entre degré et coût de la conversion.

Notons cependant qu'au cours de ces procédés il y'a formation de nouveau composés pétroliers très polluants pour l'environnement car très soluble dans l'eau tels que les oléfines.

Tableau 2: Produit pétrolier issue du raffinage simple et complexe du pétrole. (le mazout : caractéristique et stockage, 2014)

Raffinage simple (sans craquage)		Raffinage complexe (avec craquage)	
GPL	2 %	GPL	3 %
Naphte	17 %	Naphte	30 %
Kérosène	9 %	Kérosène	9 %
Gasoil	26 %	Gasoil	28 %
Fioul	46 %	Fioul	30 %
			(1,5% de soufre)
	100%		100%

Il vient en fin les procédés d'amélioration qui consistent à réduire fortement ou éliminer les molécules corrosives ou néfastes à l'environnement, en particulier le soufre. Les normes de l'Union européenne (UE) en matière d'émissions de soufre sont strictes : depuis le 1er janvier 2009, l'essence et le gazole contenant plus de 10 ppm (10 mg/kg) de soufre ne doivent pas être utilisés sur le territoire européen.

II.5 Le pétrole usage et aspect négatif

II.5.1 Les usages

Si près de 59% du pétrole mondial (World Oil, 2014) est consommé par le secteur des transports (fret routier, véhicules, navires, avions), il n'est demeuré pas moins également destiné à d'autres usages. Un grand nombre de produits qui nous entourent sont fabriqués à partir de pétrole à l'instar de la plupart des matières plastiques, des solvants ou des cosmétiques. Environ 99% des matières plastiques et une majorité des textiles (nylons, polyesters) sont issus de la pétrochimie (Donnée de Total). La pétrochimie permet aussi de produire des détergents, des caoutchoucs, des adhésifs et même des médicaments.

Les centrales thermiques à fioul produisent environ 5% (Donnée portant sur l'année 2012, AIE) de l'électricité mondiale. Le secteur de la construction routière utilise 90% de la production mondiale de bitume, produit issu des pétroles lourds. Par ailleurs, les engins de travaux publics utilisent fréquemment du gazole. De nombreux engrais et pesticides sont issus de transformations pétrochimiques et les machines agricoles fonctionnent souvent au fioul

domestique (tracteurs, moissonneuses, etc.) tout comme les bateaux de pêche. Il est donc clair le pétrole trouve une application dans tous les domaines la vie. Il arrive cependant que le pétrole se trouve impliqué dans des situations de pollution et de destruction de l'environnement.

Dans le domaine de l'habitat et du bâtiment, les GPL ou Gaz de Pétrole Liquéfié (butane, propane), issus du raffinage du pétrole ou du traitement de gaz naturel, sont utilisés en bouteilles pour la cuisson des aliments ou le chauffage domestique. Dans ce dernier domaine d'application des produits pétroliers, le Mazout est le combustible utilisé.

Le chauffage des bâtiments à partir du mazout est une technique vieille de plusieurs décennies. Nous allons dans la suite voir comment elle a évolué au cours du temps.

II.5.2 Chauffage des bâtiments

II.5.2.1 Généralité sur le chauffage

Le bois étant le combustible le plus accessible pour les premiers habitants de notre planète, c'est donc tout naturellement que le chauffage au bois a été le premier mode de chauffage de l'histoire de l'humanité avec la domestication du feu 450 000 ans avant notre ère.

Les grecs ont ensuite développé le premier chauffage central par le sol. Ce dernier a été perfectionné à l'époque romaine et gallo-romaine. Son nom est l'HYPOCAUSTE. Il a surtout été utilisé dans les thermes romains mais également dans certains palais ou maisons particulières. Le sol est constitué d'une dalle (couche de mortier à base de tuiles (tuileau) et de briques). A proximité ou à l'extérieur, un foyer alimenté en permanence en bois ou charbon de bois d'un côté, était ouvert sur l'hypocauste de l'autre côté. Les fumées chaudes et l'air chaud circulaient alors dans la pièce puis par des tubulures le long des murs (murs chauffants) donnant sur l'extérieur par des cheminées. Le bassin était surélevé par des piliers en brique, dont la hauteur variable - selon les constructions mais fixe permettait de "réguler" la chaleur à atteindre dans le bassin (entre 30 cm et 60 cm). Celui-ci pouvait également fonctionner sans bassin, à la manière d'un plancher chauffant classique.

L'hypocauste est donc le premier plancher chauffant par circulation d'air : sain, économique et écologique

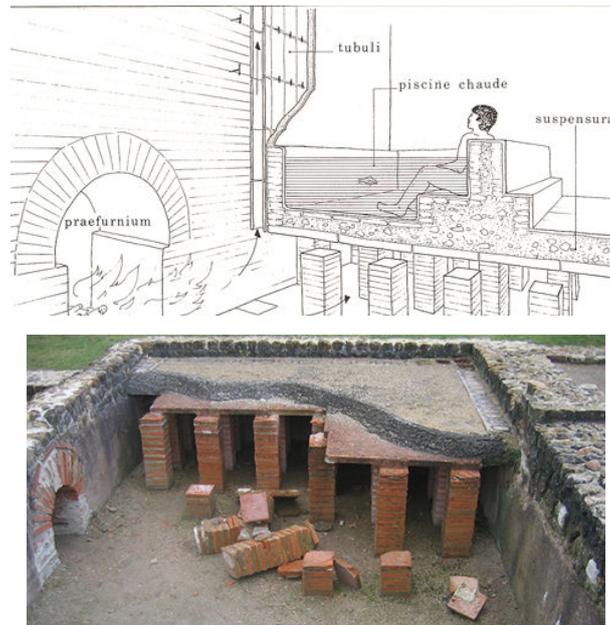


Figure 8: Hypocauste de la villa suburbaine de Vieux-la-Romaine, Basse-Normandie, France 2006. (Wikipédia)

Dans l'antiquité et jusqu'au moyen âge, le brasero est très répandu pour se chauffer en extérieur. Il s'agit d'un contenant (récipient) en métal posé sur un trépieds (ou 4 pieds) (voir figure 9). Il contient des braises ardentes et sera malheureusement la source de nombreux incendies. Ses fumées toxiques rendent difficile son utilisation en intérieur d'où l'arrivée de la cheminée.



Figure 9: le Brasero, premier modèle de de cheminée 2008

(<http://www.citedantan.org/>)

Cependant, la cheminée peine à produire une chaleur constante et crée des appels d'air froids forts désagréables...La chaleur est uniquement localisée autour du foyer et l'évacuation des fumées très incomplète.

Après les cheminées viennent, les premiers poêles en céramique au moyen âge. La chaleur produite au niveau du foyer par combustion du feu de bois, circule à travers des chicanes de briques réfractaires qui la restituent par rayonnement au travers de l'habillage du poêle.

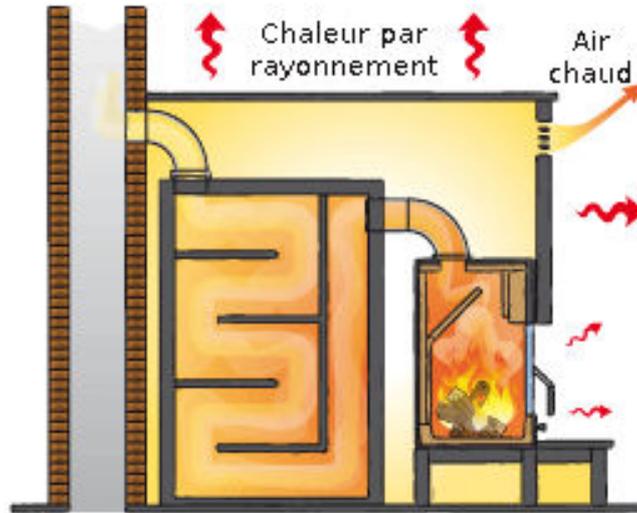


Figure 10: image d'une poêle2008 (Wikipédia)

La révolution industrielle va développer de nouvelles sources d'énergie à savoir le pétrole et l'électricité. Ces derniers vont être à l'origine en plus des systèmes existants qui vont évoluer, de nouveau système de chauffage. Nous pouvons citer entre autres :

- Le chauffage au gaz

Le chauffage au gaz se développe dans les années 1960. L'essor du chauffage central va créer le marché des émetteurs de chaleur (à eau chaude) dans chaque pièce, depuis une production centralisée. Les radiateurs en fonte (voir figure 11), aussi divers qu'esthétiques s'imposent.



Figure 11: premier radiateur 2008 (Jef Franklin)

Le principe du chauffage au gaz veut que le gaz soit brûlé, la chaleur résultante chauffe l'eau dans la chaudière, qui à son tour, via un circuit de tuyaux, chauffe les radiateurs dans la maison. Ces derniers transmettent la chaleur dans les pièces. L'eau se refroidit en traversant le radiateur, puis retourne vers la chaudière, où elle est à nouveau réchauffée. Ce principe de base n'a presque pas changé depuis le premier chauffage à gaz. Car au milieu des années 80, une technique ingénieuse est venue améliorer de manière significative l'efficacité des installations de chauffage : la technique de condensation

La technique de condensation exploite la particularité que les produits de combustion transportent également de la chaleur engendrée lors de la combustion. Ainsi, les chaudières à condensation sont jusqu'à 20 % plus efficaces que les anciens systèmes.

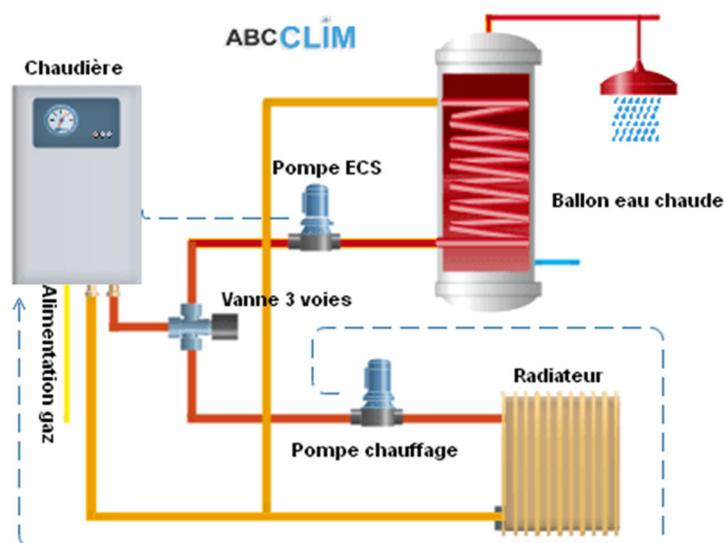


Figure 12: Circuit chaudière à gaz moderne 2008 (Wikipedia)

Les combustibles pouvant être utilisés dans un système de chauffage au gaz sont le gaz naturel ou gaz liquide et le biogaz qui est un gaz propre. Le chauffage au gaz est une méthode éprouvée et appréciée pour se chauffer. Il a les avantages d'être sûr, exige peu d'entretien et de maintenance. Cependant, le gaz est un combustible fossile dont la disponibilité n'est pas infinie ; ce qui rend également l'évolution des prix difficile à prédire. Des points de vue protection de l'environnement et émission de substances polluantes, le chauffage au gaz est supérieur au chauffage au mazout.

- Le chauffage électrique

Un chauffage électrique est un système d'appareil dédié à la production de chaleur par l'électricité. La figure (40) ci-dessous nous présente l'un des tout premiers radiateurs électriques en laiton. Il date de 1912 et est fabriqué en Allemagne.



Figure 13: radiateur électrique en laiton 2008
www.radiateur.design

Dans les années 1960-1970 les convecteurs électriques se développent. Les industriels perfectionneront année après année leurs modèles de radiateurs électriques sur la base des technologies à rayonnement et parfois à accumulation (inertie). Les chocs pétroliers des années 70 entraînent une hausse des cours du pétrole (et du gaz et du fioul) favorisant le chauffage électrique avec le développement simultané des centrales nucléaires (en France).

Tous les systèmes de chauffage électrique utilisent une résistance électrique qui produit la chaleur par l'effet Joule, comme dans le fer à repasser, la bouilloire, le chauffe-eau. Ce dernier transforme 100 % de l'énergie électrique en énergie thermique cependant, son efficacité dépend de la technologie employée, nous avons :

La technologie convecteur, c'est un appareil dans un caisson dont la hauteur de la colonne d'air interne chauffé (par une simple résistance économique) provoque par convection naturelle le mouvement d'air nécessaire à la diffusion de la chaleur produite ainsi qu'au renouvellement de la colonne d'air par effet siphon et à l'aspiration de la couche la plus fraîche proche du sol. Son faible rendement est lié aux stratifications thermique de l'air, un fort gradient vertical (écart de température).

La technologie radiant, appelé aussi radiateur rayonnant ou infrarouge, ils projettent les calories principalement par ondes électromagnétiques, les répartissant dans les directions privilégiées choisies. Ces ondes rencontrant les obstacles qui accueillent alors les calories, les rendent ensuite à l'atmosphère (par réflexion et par absorption).

La technologie par accumulation est intéressante dans les pays disposant d'un tarif « heures creuses », les techniques d'accumulation permettent de concentrer ses consommations en heures creuses du réseau électrique (tarifs très avantageux) et donc de ne pas surcharger le réseau pour les utilisations classiques pendant le reste du temps ;

- Le chauffage au fioul

Le chauffage au fioul est un équipement composé d'une chaudière et d'une cuve dans laquelle est entreposé le stock de fioul, ou mazout. La combustion du fioul dans la chaudière permet de chauffer l'eau qui alimente les canalisations, puis les systèmes de chauffage. Ce dernier cas de chauffage sera observé plus en détails dans la suite de ce travail.

La plupart des systèmes de chauffage au mazout sont à air pulsé ou à eau chaude. Nous allons dans la suite donner un aperçu des composants de ces deux systèmes distincts.

II.5.2.2 Les systèmes de chauffage au mazout

a) Systèmes de chauffage à air pulsé : conception et fonctionnement

La figure (14) est une représentation schématique d'un modèle courant de système de chauffage à air pulsé, alimenté au mazout, lequel est généralement stocké dans un réservoir à l'intérieur de la maison. Ce système est constitué d'un brûleur qui, comme son nom l'indique, brûle le combustible dans la chambre de combustion de l'appareil. En passant à travers un échangeur thermique, les gaz de combustion libèrent de la chaleur avant d'être évacués à l'extérieur par le conduit de raccordement et la cheminée. Un régulateur barométrique de tirage est installé dans le conduit de raccordement et agit en quelque sorte comme une valve. Il sert à isoler le brûleur des variations de pression extérieures à la sortie de la cheminée en tirant au

besoin des quantités variables d'air chauffé de la maison dans le conduit de raccordement. Un ventilateur achemine l'air provenant des conduits de retour d'air froid de la maison et le fait circuler à travers l'échangeur thermique. L'air ainsi réchauffé est ensuite distribué dans le réseau de conduits d'air chaud de la maison. Il faut noter qu'il y a deux circuits de circulation d'air bien distincts. Le premier, soit le circuit de combustion, fournit de l'air au brûleur (notamment l'air qui passe par le régulateur barométrique de tirage) et achemine les gaz chauds de combustion à l'échangeur thermique et au conduit de raccordement, puis à la cheminée et à l'extérieur. Le second circuit fait circuler et réchauffe l'air de la maison. Dans de nombreuses maisons, la quantité d'air aspirée par le régulateur barométrique de tirage est bien supérieure à ce que requiert la combustion et peut représenter jusqu'à 10 ou 15% des pertes de chaleur globales de la maison. Donc, tout ce qui tend à réduire ce débit d'air, sans toutefois compromettre le bon fonctionnement du générateur d'air chaud, permet d'augmenter l'efficacité énergétique et les économies d'énergie.

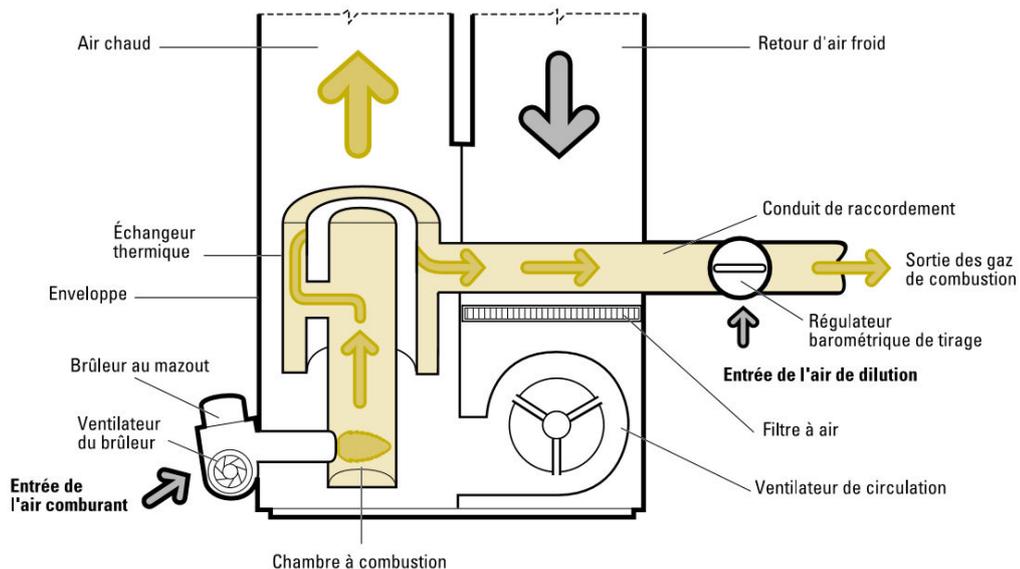


Figure 14: Générateur d'air chaud au mazout 2021 (Ressources naturelles canada)

Pour assurer la combustion dans certains modèles plus récents de générateurs d'air chaud, l'air provient directement de l'extérieur (appareil scellé d'un système à combustion) plutôt que de l'intérieur de la maison. Certaines précautions s'imposent toutefois. En effet, il y a risque de problèmes de démarrage par temps très froid si le mazout, refroidi par l'air extérieur, n'est pas un peu réchauffé avant d'atteindre le brûleur. Un problème similaire se produit lorsque le mazout est stocké dans un réservoir à l'extérieur de la maison plutôt que dans un endroit chauffé. Lorsqu'il fait très froid, le mazout du réservoir se refroidit également et peut devenir

si visqueux (épais) qu'il ne se rend plus au brûleur ; donc, pas de chauffage. Même s'il parvient à se rendre au brûleur, le mazout sera alors si épais que le gicleur du brûleur ne parviendra pas à le pulvériser comme il le devrait, ce qui se traduira par une mauvaise combustion. Si le réservoir est à l'extérieur, envisagez un moyen de chauffer le réservoir ou la conduite d'alimentation en mazout, ou encore, installez un réservoir intérieur plus petit dans la maison pour éviter ces problèmes.

b) Système de chauffage hydronique conception et fonctionnement

Un système de chauffage hydronique fait circuler l'eau chaude pour chauffer la maison ; ses trois principaux composants sont les suivants :

- une chaudière pour chauffer l'eau
- des appareils de chauffage, généralement des plinthes ou des radiateurs dans la plupart des pièces, souvent posés contre un mur extérieur
- une pompe pour faire circuler l'eau de la chaudière aux radiateurs et assurer le retour par la tuyauterie

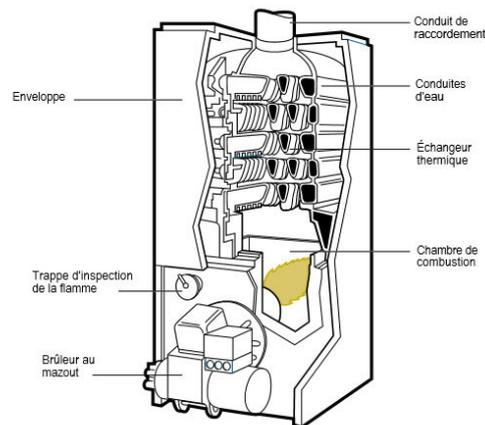


Figure 15: Chaudière hydronique au mazout 2021 (Ressources naturelles canada)

Équipée du même type de brûleur qu'un générateur d'air chaud au mazout, la chaudière au mazout (voir figure 15) est généralement plus compacte, mais plus lourde. Contrairement au générateur d'air pulsé, elle n'a pas de ventilateur ou de filtre. Dans la plupart des chaudières, une pompe de circulation sert à acheminer l'eau dans la tuyauterie qui alimente les radiateurs, tel qu'il est illustré à la figure (16). Le rendement saisonnier des anciens modèles courants de systèmes à eau chaude est semblable à celui des systèmes de chauffage à air pulsé ordinaires, environ 60%.

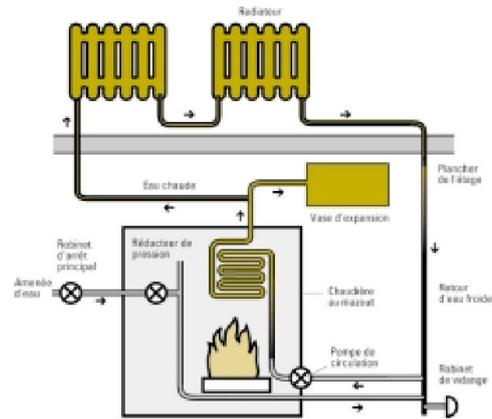


Figure 16: Schéma d'un système de chauffage hydronique 2021 (Ressources naturelles canada)

II.5.3 Les aspects négatifs du pétrole

Le pétrole produit un grand nombre de produit pétroliers et déchets depuis son exploitation jusqu'à ses différents usages. Ces composés de natures différentes ayant des paramètres mal définis, sont cependant déversés dans la nature. En plus des hydrocarbures tels que le gazole constituant majeur des boues à base d'huile, on note les déversements accidentels du pétrole, ainsi que d'une variété d'autres produits et additifs spéciaux qui peuvent exister sur les sites de forage. Ces rejets sont généralement stockés dans des endroits appelés bourbiers. Par ailleurs on enregistre aussi des rejets accidentel et involontaire (Kenhago, 2021). Les rejets accidentels peuvent être le résultat d'une explosion, d'une éruption d'un puits ou des fuites. Très souvent pour des raisons économiques après épuisement du champ de forage, le site est abandonné laissant ainsi les puits, l'équipement de forage, les réservoirs, les fosses, les lignes de collecte et les autres équipements sans nettoyer (figure 17). Ceci représente des dangers pour l'environnement.



a) Déversement de pétrole
(<https://www.schoolmouv.fr>).



b) Delestage d'un Airbus A340-600
(Bobmil42)



c) Dix mille tonnes de pétrole déversées en mer à partir de tankers en 2021 (Itopf)

Figure 17: Exemple pollution par les produits pétroliers

Au fil du temps, la qualité des performances du pipeline diminue en raison de la dégradation structurelle, des fissures causées par la corrosion, des soudures défectueuses ou des dommages accidentels dus à des activités de tiers. Le déversement du pipeline d'Enbridge près de Marshall (Michigan), le 25 juillet 2010, par exemple, a été causé en partie par une défaillance astronomique dans une section du pipeline où des fissures s'étaient formées en raison de la corrosion, puis se sont fusionnées au point où le pipeline s'est rompu. Il y a également les oléoducs qui mal entretenus polluent les sols et les nappes phréatiques. Sur terre, les pipelines souterrains et hors sol transportent de grandes quantités de pétrole brut et de carburants raffinés, en particulier le diesel, l'essence, le fioul lourd et les mélanges.

Après extraction à partir de puits offshore ou terrestres, le pétrole est transporté par divers moyens vers les raffineries et, finalement, vers les consommateurs industriels ou individuels par bateau-citerne (navire-citerne ou pétroliers ; barges-citernes), pipeline, chemin de fer et camion-citerne.

Les produits formés sont stockés dans les raffineries, attendant d'être acheminés vers les stations-services où ils seront stockés puis distribués aux différents consommateurs. Cependant, à force de stocké de façon permanente les produits pétrolier, les cuves de stockage, les canaux d'acheminement et les autres supports connaissent une usure accentuée par l'aspect agressif des carburants, conduisant ainsi à leurs fuites. De plus les réservoirs de stockage ne sont pas toujours étanches et se laisse traverser par les produits pétroliers.

Les avions déversent chaque année environ 50 tonnes de carburéacteur dans les zones intérieures. Cette pollution se produit généralement dans les aéroports lors du ravitaillement en carburant, ou occasionnellement à la suite d'un accident. Cette pollution se produit à partir de deux sources : par le déversement délibéré ou le largage de kérosène en raison des conditions d'urgence à bord d'un avion, ou par la libération de carburant partiellement brûlé dans des moteurs ou des modes de fonctionnement inefficaces. Il est clair que le pétrole depuis son exploitation jusqu'à son utilisation impacte le fonctionnement de la vie sur la terre.

Bien que la majorité des déversements de production de pétrole soit enregistrés dans la mer, des déversements de puits de production de pétrole sur la terre ferme ont été signalés dans les exploitations onshore aux Etats-Unis. Que ce soit dans des pays riches ou des pays pauvres, l'extraction du pétrole reste un risque pour l'environnement et la santé des travailleurs ou des habitants de proximité. L'exploration du pétrole, qu'elle soit off-shore (en mer) ou on-shore, présente par la profondeur et le nombre des trous, un grand danger. Ces puits, qu'ils soient de production ou d'exploration traverse fréquemment des nappes d'eau et il faut absolument assurer l'étanchéité de leur paroi. Ce qui n'est pas toujours le cas. Elle s'accompagne généralement de rejets liquides (eaux extraites du gisement, boues de forage...). Outre cette pollution par les déversements, la pollution par les hydrocarbures peut également être observée à l'occasion des fuites des réservoirs de pétrole situé dans le sous-sol.

Un autre domaine où la pollution par les hydrocarbures est connue est le transport. Les déraillements de trains peuvent être à l'origine des déversements très graves qui se produisent souvent dans des endroits difficiles d'accès. Au Cameroun en 2017, trois wagons-citernes ont

déversé chacun 100.000 litres de carburant après le déraillement d'un train. Le domaine du transport est l'une des sources les plus importantes de production des gaz à effet. Cependant une autre source aussi importante que celui lié au transport est le chauffage des bâtiments à partir du mazout.

Au vu de ces différentes données il est clair que le pétrole a un impact sur l'activité humaine partout dans le monde comme nous allons le voir dans la suite.

II.6 Impact socio-économique et politique lié à la présence du pétrole

Le développement de l'industrie pétrolière a fourni les carburants liquides qui ont permis la deuxième révolution industrielle et a donc considérablement changé le cours de l'Histoire. En ce sens, le pétrole est véritablement le successeur du charbon, qui avait rendu possible la première révolution industrielle. Son utilisation est également source de problème tant sur le plan économique, politique que social.

C'est ainsi qu'en économie, Le pétrole étant le plus gros commerce international de matières de la planète en valeur et en volume, il a un poids important sur les équilibres commerciaux. Les grands pays producteurs disposent de recettes telles que leurs gouvernements ont souvent un excédent public à placer, qui leur donne un poids financier important. Les fluctuations du prix du pétrole ont un impact direct sur le budget des ménages, donc sur la consommation dans les pays développés. Elles influent aussi, en proportion variable, sur le prix d'une grande part des biens et services, car la plupart sont produits en utilisant du pétrole comme matière première ou comme source d'énergie.

La découverte de réserves de pétrole dans un pays est souvent perçue comme bénéfique pour son économie. Toutefois, sur le plan politique, l'afflux soudain de devises est parfois mal géré, il peut encourager la corruption, des ingérences étrangères, des gaspillages et détourner les investissements. L'effet réel est donc souvent plus ambivalent, surtout pour les pays les plus pauvres, au point que l'on parle de malédiction pétrolière.

Sur le plan sociétal, devenu indispensable à la vie quotidienne dans la plupart des pays développés, le pétrole a un impact social important. Des émeutes parfois violentes ont éclaté dans certains pays à la suite de hausses de prix. Dans les pays développés, une hausse du prix du pétrole se traduit par un accroissement du budget consacré à la voiture, mais dans les pays

les plus pauvres, elle signifie moins d'éclairage et moins d'aliments chauds, car le kérosène est souvent la seule source d'énergie domestique disponible.

Pour une meilleure compréhension de ces phénomènes nous nous proposons dans la suite explorer l'environnement dans lequel évolue les pétroles d'une part et d'autre de voir les bétons, principaux matériaux utilisés dans la construction.

II. La croûte terrestre

L'étude de la distribution de la sismicité en profondeur ainsi que l'analyse des trajectoires et des vitesses de propagation des ondes sismiques et des profils d'inversion gravitaire, permettent de caractériser la composition interne de la Terre et de déterminer plusieurs discontinuités majeures en profondeur, témoins d'une variation de densité associée à une variation de température et/ou de composition chimique. De la surface vers le centre, la Terre est ainsi constituée :

- d'une croûte qui compte pour moins de 2% en volume et dont la limite basale se nomme le Moho;
- d'un manteau qui constitue le gros du volume terrestre 81%, principalement composé d'olivine délimité à sa base par la discontinuité de Gutenberg;
- d'un noyau ferreux qui forme 17% du volume terrestre, constitué d'une partie externe liquide et différenciée par la discontinuité de Lehmann d'un noyau interne solide.

III.1 Structure et organisation de la croûte terrestre

La croûte terrestre aussi appelée écorce terrestre est l'enveloppe la plus externe de la Terre interne, en contact direct avec l'atmosphère et l'hydrosphère à la surface, mais aussi la moins épaisse et la moins dense. Elle est distinguée en deux entités de nature différente : la croûte continentale, de composition acide, et la croûte océanique, de composition basique.

La croûte continentale se caractérise par une structuration complexe et une forte hétérogénéité lithologique. Elle est cependant principalement constituée de roches magmatiques et métamorphiques acides, formées essentiellement pendant les épisodes de subduction et de collision continentale. Sa partie superficielle est irrégulièrement constituée de roches sédimentaires et de sols. Les parties profondes de cette croûte peuvent être mises à l'affleurement, à la faveur de la mise en place, puis du démantèlement d'une chaîne de montagnes. La croûte continentale est aussi subdivisée en trois entités, déterminées à partir de

leurs caractéristiques mécaniques : la croûte supérieure (de 0 à 10 km), la croûte moyenne (de 10 à 20 km) et la croûte inférieure (de 20 à 35 km).

La croûte océanique se forme au niveau des dorsales océaniques, par fusion partielle des péridotites du manteau sous-jacent ; le magma remonte vers la surface et cristallise pour donner des roches basiques (basaltes et gabbros essentiellement). Au fur et à mesure qu'elle s'éloigne de la dorsale, la croûte océanique s'épaissit, se refroidit et devient plus dense ; lorsque la densité générale de la lithosphère océanique dépasse celle du manteau asthénosphérique, le processus de subduction s'engage et la lithosphère pénètre dans le manteau où elle est progressivement recyclée (Dercourt *et al.* 2006, p. 294). La croûte océanique peut être exhumée à la faveur d'une subduction, où elle chevauche la croûte continentale, ou d'une collision continentale, où des lambeaux de croûte océanique peuvent être conservés et mis à l'affleurement

III.2 Constitution et composition

La majorité des roches constituant la croûte terrestre sont des silicates qu'on a l'habitude de décrire par leur composition en oxydes, l'oxygène étant l'élément chimique de loin le plus abondant. Au début du XX^e siècle, Frank Wigglesworth Clarke a calculé que 47 % de la croûte terrestre est faite d'oxygène présent principalement sous forme d'oxydes, dont les principaux sont les oxydes de silicium, aluminium, fer, calcium, magnésium, potassium et sodium. Le dioxyde de silicium est le constituant majeur de la croûte sous forme de silicates, les minéraux les plus communs des roches magmatiques et métamorphiques.

L'écorce terrestre est principalement constituée de silicates (il en existe près de 1 000 connus, représentant 95 % des constituants de l'écorce terrestre), de carbonates, d'oxydes et d'hydroxydes métalliques (notamment l'oxyde et l'hydroxyde de fer)⁵. Les silicates les plus souvent rencontrés sont les tectosilicates (le groupe des feldspaths représente près de 60 % de la masse de l'écorce et celui de la silice —quartz essentiellement— 10 à 13 %), les inosilicates (pyroxènes, 10 % de l'écorce et amphibole, 7 %) et les phyllosilicates, parmi lesquels les minéraux argileux (Imke de Pater, Jack J. Lissauer, *Planetary Sciences*, Cambridge University Press, 2010).

Tableau 3: récapitulatif des enveloppes de la Terre interne et de leurs principales caractéristiques (Planète Terre)

Enveloppe	Profondeur km	Densité g/cm ³	Pétrographie dominante	Éléments chimiques
Croûte continentale	0 – 35	2,7 – 3,0	<i>Granite et gneiss</i>	<i>Si et Al</i>
Croûte océanique	0 – 10	2,9 – 3,2	<i>Basalte, gabbro et péridotite</i>	<i>Si, Al et Mg</i>

III.3 La tectonique des plaques

La théorie de la tectonique des plaques est née dans les années 60 (Mc Kenzie et Parker, 1967; Le Pichon, 1968; Morgan, 1968) suite, notamment, à la découverte d'inversions successives du champ magnétique terrestre, fossilisées au sein des roches magmatiques composant le plancher océanique et disposées symétriquement de part et d'autre des dorsales océaniques. Cette découverte argumenta manifestement l'hypothèse d'expansion des fonds océaniques (Vine et Matthews, 1963) et confirma par là même l'hypothèse de la dérive des continents (Wegener, 1912, 1920). La théorie de la tectonique des plaques a permis de proposer une explication commune cohérente à un ensemble d'observations géologiques (chaines de montagnes, expansion océanique) et géophysiques (anomalies magnétiques, renversement du champ magnétique, flux de chaleur).

La lithosphère constitue l'écorce résistante et rigide du globe terrestre. Celle-ci repose sur l'asthénosphère (Barrell, 1914), une enveloppe aisément déformable. Cette dernière n'est pas immobile, mais est au contraire fragmentée en plusieurs plaques, considérées comme des entités rigides, capables de transmettre les contraintes sur de longues distances, se déplaçant continuellement relativement les unes par rapport aux autres dans un référentiel donné. Actuellement, on distingue une douzaine de plaques de tailles variables et de natures différentes.

Structuralement, la lithosphère correspond à la croûte dans son ensemble et à la partie supérieure du manteau nommée manteau lithosphérique. Comparée à la lithosphère océanique, la lithosphère continentale est plus complexe en terme de stratification lithologique (Rudnick et Gao, 2003), d'état thermique et d'activité tectonique.

III.3.1 Une structuration lithologique

Les études pétrochimiques et géophysiques indiquent que la lithosphère océanique se compose d'environ 6-7 km de croûte à composition moyenne de basalte-gabbro et d'une partie mantellique résistante composée de péridotites et dont l'épaisseur varie en fonction de son âge (Sun et McDonough, 1989). La croûte continentale est généralement composée de plusieurs enveloppes :

- une croûte supérieure d'une épaisseur moyenne d'environ 12 km, caractérisée par une composition moyenne de granite-granodiorite, riche en éléments incompatibles

instables (K, Th, U; McLennan et Taylor, 1996) et dont la densité est comprise entre 2660 et 2800 kg.m⁻³ (Christensen et Mooney, 1995);

- une croûte inférieure d'une épaisseur moyenne d'environ 17 km (Rudnick et Fountain, 1995) caractérisée par une composition moyenne de granodiorite-diorite, pauvre en éléments incompatibles et dont la densité varie entre 2800 et 3100 kg.m⁻³;
- une croûte moyenne d'environ 11 km et de composition et de densité intermédiaires est parfois distinguée.

L'épaisseur moyenne de la croûte continentale est ainsi de 40 km (Christensen et Mooney, 1995). Cependant, elle peut s'affiner à l'extrême au niveau des marges en extension (Egée; et Vigner, 2002), ou à l'inverse, atteindre des épaisseurs proches de 70 km au niveau des zones de convergence (Himalaya; Nelson et al., 1996;). De plus, les différents niveaux constitutifs de la croûte sont parfois marqués par une structure interne spatialement très hétérogène. En effet, la composition, l'âge, l'histoire thermique, le degré d'hydratation et la présence de roches dérivées de sédiments ou de matériel océanique, sont variables régionalement au sein d'un même niveau (Kearey et al., 2009). Cette variabilité témoigne d'une histoire généralement complexe mêlant fusion partielle, cristallisation fractionnée, métamorphisme, sédimentation, érosion et déformation.

Le manteau lithosphérique continental a une épaisseur variant également considérablement en fonction du contexte géologique. Sous les marges passives, il passe latéralement au manteau océanique et sous les crâtons il peut atteindre une épaisseur de 350 km (Artemieva et Mooney, 2002). La lithosphère continentale présente donc une structuration multi-couche.

III.4 La dynamique de la lithosphère

III.4.1 Les forces mises en jeu

Les forces agissant sur la lithosphère (voir figure 18) sont susceptibles de l'entraîner en mouvement, forces motrices, ou au contraire de résister au mouvement global, forces résistantes (Forsyth et Uyeda, 1975; Chapple et Tullis, 1977). Elles sont de deux types: – Les forces aux limites : les forces motrices appliquées aux limites de plaques sont la traction du panneau plongeant (Stephanick et Jurdy, 1992) et la poussée à la ride (Turcotte et Schubert, 1982; Richardson, 1992). Les forces résistantes sont, le frottement de l'asthénosphère s'opposant au déplacement de la lithosphère (Wdowinski et al., 1989 ; Russo et Silver, 1996), les forces de frottement à l'interface des plaques (Lallemand, 1999) et la force de résistance à la flexure de

la plaque inférieure. Les forces de volume : les différences latérales d'épaisseur, de température et/ou de densité de la lithosphère créent des gradients d'énergie potentielle de gravitation. Ceux-ci sont interprétables comme des gradients de contrainte horizontale (England et Jackson, 1989).

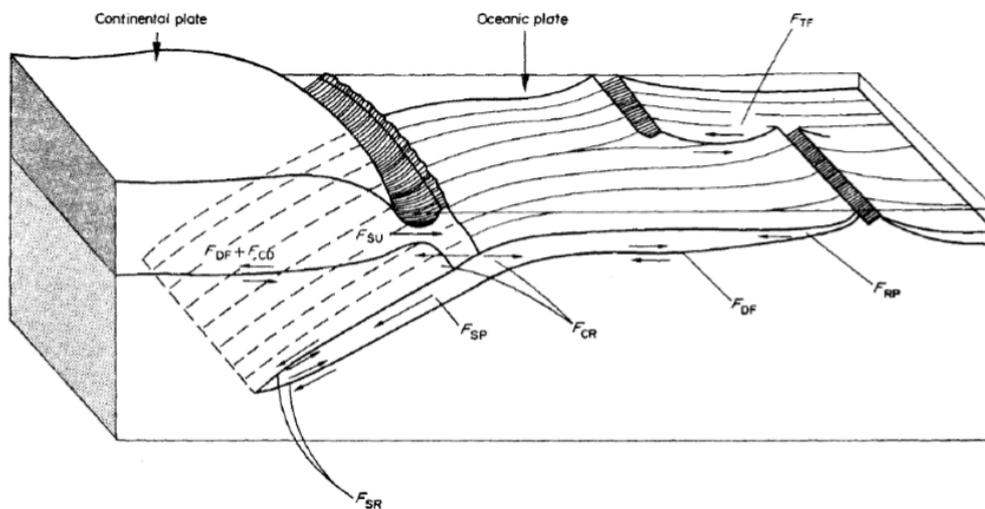


Figure 18: Bilan des forces agissant sur la lithosphère (Forsyth et Uyeda, 1975).

(Abréviations: FRP, poussée à la ride; FTF, force cisailante sur les failles transformantes; FDF et FCD, cisaillement basal provoqué par le déplacement de l'asthénosphère; FSP, traction du panneau plongeant; FSR, résistance à l'enfouissement du panneau plongeant; FCR, résistance à la convergence induite par FSR; FSU, force de succion de la subduction.

III.4.2 Les mouvements résultants

Par le principe de la conservation de la masse, toute génération de matériel lithosphérique aux zones d'accrétion (mouvements convectifs ascendants, entretenus par le refroidissement du noyau terrestre et par la radioactivité interne) est compensée par la disparition de lithosphère par enfouissement dans le domaine asthénosphérique (retombées du matériel refroidi et densifié en surface, au niveau des zones de subduction) et vice versa. Ces mouvements lithosphériques verticaux sont compensés à la surface du globe terrestre par des mouvements horizontaux des plaques lithosphériques. Les plaques tectoniques se déplacent alors en absolu par rapport à un référentiel fixe de type point chaud mais également les unes par rapport aux autres avec des vitesses comprises entre quelques mm.an^{-1} et quelques cm.an^{-1}

(Somoza et Ghidella, 2005, Kreemer, 2009). En fonction du mouvement relatif de deux plaques, trois grands types de frontières sont distingués (voir Figure 18):

- les frontières divergentes actives sur ~55000 km ;
- les frontières transformantes ;
- les frontières convergentes, comprenant à la fois les zones de subduction océanique et continentale (~55000 km) et les zones de collision continentale (~12000 km).

L'ensemble de ces phénomènes ont un impact non négligeable sur le devenir des bassins pétroliers.

IV. Les matériaux dans le bâtiment

IV.1 Généralité

Le principal matériau dans le bâtiment est le béton. Dans la famille des bétons nous avons les bétons ordinaires et les bétons dits léger. Le béton léger est défini par sa masse volumique inférieure ou égale à 2000 kg/m³. Comparé au béton ordinaire de densité normale, qui a une masse volumique entre 2200 et 2600 kg/m³, la masse volumique du béton léger est diminuée par la substitution d'une certaine partie solide du matériau par des poches d'air que nous appellerons vides. Nous distinguons 3 types de béton léger suivant la localisation de ces vides :

- Béton de granulats légers : les vides se trouvent au sein des granulats. Les bétons de granulats légers sont fabriqués comme les bétons courants, mais avec des granulats légers à la place du granulat ordinaire. Les granulats légers sont de différentes natures : schiste expansé, argile expansée, laitiers expansés, pierre ponce, perlite ou vermiculite. Parmi ces granulats, les quatre premiers peuvent être utilisés pour fabriquer le béton de structure.
- Béton cellulaire : les vides se trouvent dans la liant. Les bétons cellulaires ne contiennent que du ciment, de l'eau et du sable. Des bulles d'air sont créées à l'intérieur de la pâte, soit par gâchage avec de la poudre d'aluminium, soit par gâchage avec de l'eau savonneuse. En général, les bétons cellulaires ont une résistance en compression faible (2 à 8 MPa), mais leurs avantages résident dans la masse volumique plus faible (500 à 1000 kg/m³) et des propriétés d'isolation thermique supérieures (conductivité thermique de 0,1 à 0,2 W/mK) à celles des autres bétons.
- Béton caverneux: les vides se situent entre les gros granulats par suppression des granulats fins. Les bétons caverneux sont fabriqués comme les bétons ordinaires mais sans le sable.

Il existe donc de gros vides au sein de la matrice de mortier qui sont responsables de sa faible résistance. On l'utilise principalement dans la confection de murs porteurs de bâtiments domestiques et dans les panneaux de remplissage de cadres de structure.

L'utilisation du béton de granulats légers en structure peut être bénéfique au niveau du coût d'un projet et de la fonctionnalité de la structure ou de l'ouvrage. Même si le coût par mètre cube d'une structure de béton de granulats légers est souvent plus élevé que celui en béton ordinaire, le coût total d'un projet utilisant le béton léger est souvent réduit grâce aux avantages liés au béton de granulats légers par rapport au béton ordinaire :

- La réduction de la charge transmise à la fondation mène à la réduction des dimensions de la fondation et des têtes de pieux, ainsi qu'à la diminution du nombre de pieux et du renforcement.
- La réduction du chargement statique mène à la réduction des dimensions des structures portantes.
- La réduction du chargement statique réduit la force d'inertie sismique.
- Pour le béton précontraint préfabriqué, le béton de granulats légers permet de fabriquer des structures plus longues et plus larges sans augmenter la masse totale.
- L'épaisseur de la structure résistante au feu peut être diminuée grâce à l'isolation thermique du béton de granulats légers, ce qui mène à la réduction du volume de béton.

IV.2 Propriétés des bétons légers

Le granulat léger est défini par sa masse volumique inférieure ou égale à 2000 kg/m³. Selon l'origine des granulats, ils sont classifiés en granulats naturels et granulats artificiels.

Les granulats légers naturels sont presque tous d'origine volcanique, à l'exception des diatomées. On trouve dans cette catégorie la pierre ponce, les diatomites, les cendres volcaniques et le tuf (Figure 19).



Pierre ponce



Diatomite

Figure 19 : Granulats légers naturels ((Le Hung NGUYEN, 2013)

Les granulats artificiels ont subi un procédé industriel qui comprend des modifications thermiques conduisant à l'expansion. Nous pouvons subdiviser ces granulats en deux catégories : les produits artificiels issus de matières premières naturelles et les sous-produits industriels. Les principaux granulats légers qui sont fabriqués à partir des matières premières naturelles sont l'argile expansée, le schiste expansé, la perlite expansée, le laitier expansé... (Figure 20). Ils sont obtenus par l'expansion des matières premières dans un four après chauffage jusqu'au point de fusion (1000 - 1200°C). Pour l'argile expansée et le schiste expansé, la mise en forme des granules est souvent réalisée par moulage ou concassage avant calcination, mais il est également possible d'obtenir les granulats par concassage après expansion des matières premières. Les granules sont chauffés dans un four rotatif afin d'initier la fusion (1000° à 1200°C). Les gaz dégagés au cours de l'élévation de température produisent l'apparition de pores millimétriques puis l'expansion du matériau.



Figure 20 : Granulats légers artificiels (Le Hung NGUYEN, 2013)

V. Le concept de modélisation

Le but de toute modélisation de système est de construire un modèle, c'est-à-dire une représentation de son fonctionnement. Les relations entre les entrées et les sorties du système peuvent être représentées par des équations. Si ces équations sont algébriques, le modèle est dit statique. Si ces équations sont des équations différentielles ou des équations aux différences récurrentes, le modèle est dit dynamique, respectivement à temps continu ou à temps discret. Un modèle est caractérisé par son domaine de validité, c'est-à-dire par le domaine de l'espace des entrées dans lequel l'accord entre les valeurs des sorties du processus calculées par le

modèle, et leurs valeurs mesurées, est considéré comme satisfaisant compte tenu de l'utilisation que l'on fait du modèle. Les techniques de modélisation (Husaunndée, 1999) sont résumées sur la figure 21 ci-dessous.

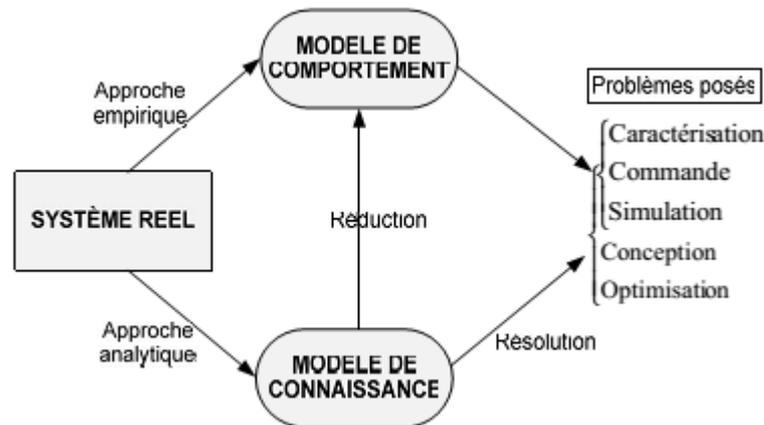


Figure 21 : Les techniques de modélisations (Husaunndée, 1999)

L'analyse de cette figure montre qu'il existe deux grandes approches de modélisation d'un système réel : l'approche empirique qui conduit au modèle de comportement et l'approche analytique qui conduit au modèle de connaissance.

V.1 Les modèles de connaissance, théoriques ou analytiques

Les modèles de connaissance sont construits à partir d'une analyse physique, chimique, biologique ou autre, suivant le type du processus, en appliquant les lois générales, fondées sur des principes qui régissent les phénomènes intervenant au sein des processus étudiés. Ce type de modèle présente l'intérêt d'expliquer la nature des phénomènes qui interviennent dans le processus, et d'en comprendre l'importance relative par une analyse détaillée. Ces modèles sont souvent très lourds à mettre en œuvre. Ils sont les génériques et donc intéressants dans des études de conception et d'optimisation. Dans la pratique, il est toujours souhaitable d'établir un modèle de connaissance des processus que l'on étudie. Néanmoins, il arrive fréquemment que le processus soit trop complexe, ou que les phénomènes qui le régissent soient trop mal connus, pour qu'il soit possible d'établir un modèle de connaissance suffisamment précis pour l'application considérée. On est alors amené à concevoir des modèles purement empiriques, fondés exclusivement sur les résultats de mesures effectuées sur le processus.

V.2 Les modèles de comportement, systémiques ou empiriques

Une analyse globale du comportement entrée – sortie du système est effectuée. Le modèle peut être perçu comme une boîte noire, il est construit essentiellement sur la base de mesures effectuées sur les entrées et les sorties du processus à modéliser. Des méthodes statistiques ou issues de l'automatique

telles que les régressions, les corrélations, l'identification ou le bon sens du modélisateur, sont utilisées pour sélectionner les données d'entrée respectives du problème à étudier. Le principe ici, consiste alors à utiliser, pour représenter les relations entre les entrées et les sorties, des équations paramétrées, et à estimer les paramètres, à partir des mesures disponibles, de manière à obtenir la meilleure précision possible avec le plus petit nombre possible de paramètres ajustables. Ces modèles sont peu génériques et sont utilisés pour caractériser, commander ou simuler un système. Le domaine de validité d'un tel modèle ne peut pas s'étendre au-delà du domaine des entrées qui est représenté dans les mesures utilisées pour l'apprentissage. Leur inconvénient principal réside dans le fait qu'ils n'expliquent en rien le comportement du processus, et que toute évolution du processus nécessite une nouvelle modélisation complète.

V.3 Quelques modèles

Modèle de Darcy

La loi de Darcy telle qu'elle a été formulée par Henry Darcy en 1856 dans l'appendice D de son célèbre ouvrage *Les Fontaines publiques de la ville de Dijon*, exprime le débit Q d'un fluide incompressible qui s'écoule en régime stationnaire au travers d'un milieu poreux de section A et de longueur L sous l'effet d'une différence de charge ΔH .

Initialement globale (valable pour un milieu poreux homogène et un écoulement uniforme), la formulation de la loi de Darcy devint rapidement locale, généralisée à des écoulements tridimensionnels et à des milieux non saturés.

La résolution locale de la loi de Darcy la rend applicable à des corps poreux hétérogènes et à des écoulements non uniformes.

Model de Forcheimer

Forcheimer en 1901 modifia la formule de Darcy en ajoutant un terme quadratique pour la corriger afin qu'elle puisse expliquer les variations observées lors de l'écoulement d'un fluide à haute vitesse (*Forcheimer, 1901*).

Cependant cette théorie s'est avérée être toujours incapable d'expliquer certains cas d'écoulement comme le montre plusieurs auteurs (*Carman, 1973 ; Fand & al, 1987 ; Montillet, 2004*). Les travaux de Martin et AL ont montré le décalage entre la théorie de Forcheimer et la réalité observée, figure (1) (*Martin et AL, 1990*). C'est ainsi qu'en 2004 Barea et Conway proposèrent un nouveau modèle pour l'écoulement des fluides à travers des milieux poreux.

Modèle de Barea & Conway

Dans ce modèle, Barea et Conway supposèrent que k , la perméabilité du milieu considéré n'était plus une constante comme dans les cas de Darcy et Forcheimer [Barre et Conway, 2004].

Le modèle Barea et Conway présente plusieurs avantages du fait qu'il permet de rendre compte de l'écoulement des fluides lorsque la vitesse est élevée dans plusieurs cas décrits comme difficile par plusieurs auteurs (*Ergun, 1952*). Il permet par ailleurs de vérifier le modèle empirique de Darcy.

VI. Conclusion

Dans cette partie nous avons fait ressortir des informations relatives dans un premier temps au pétrole, ensuite nous nous sommes intéressés à la croûte terrestre et nous avons fini par le concept de modélisation. C'est ainsi que nous avons vu les origines, formations, les transformations, les produits dérivés, les différents usages, en particulier lors du chauffage des bâtiments et nous avons terminé par l'impact du pétrole sur le vécu quotidien. S'agissant de la croûte terrestre, sa description tant sur le plan structurel que sur le plan organisationnel nous a permis d'avoir un bon aperçu du milieu dans lequel les pétroles évoluent. Nous avons terminé ce chapitre par la présentation du concept de modélisation et quelques modèles de la littérature. Pour la migration du pétrole les modèles de Darcy, Forcheimer et Conway- Barre ont été présentés. Partant de ces modèles nous proposons dans la suite de ce travail de modéliser la migration du pétrole en tenant compte de la teneur en hydrocarbure du milieu d'autre part de modéliser le processus de transfert thermique au cours du chauffage d'un bâtiment en tenant compte de l'humidité.

CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODES

I. Introduction

Ce chapitre vise l'élaboration d'une part d'un modèle conceptuel de migration des hydrocarbures et d'autre la modélisation du chauffage des bâtiments à partir du mazout. Le chapitre est divisé en trois parties. La première partie dédiée à l'origine de la pollution par les produits pétroliers nous permet de faire ressortir notre intérêt pour ce travail. Dans cette partie nous parlons de la composition chimique et la nature des hydrocarbures, des causes de la pollution par les pétroles au cours de leur migration et pendant le chauffage des bâtiments, et de l'impact de la pollution par les produits pétrolier sur l'environnement et sur l'homme. La deuxième partie de ce chapitre est intitulé : matériel et méthode du processus ascensionnel du pétrole. Dans cette partie nous présentons tour à tour, les différentes étapes du processus de migration du pétrole ainsi que les mécanismes y afférent, les propriétés physiques des roches et du pétrole et pour finir nous un proposerons un modèle de migration des hydrocarbures. La troisième partie de ce chapitre est consacré au matériel et méthode du processus ce chauffage des bâtiments à partir du mazout. Nous parlerons du mazout, des modes de transfert thermique et nous ferons une modélisation du chauffage des bâtiments à partir du mazout. Nous terminerons ce chapitre par la présentation des méthodes numériques utilisées dans ce travail.

II. Pollution par les produits pétroliers

Le pétrole brut est parmi les mélanges les plus complexes des composés organiques qui se produisent sur la terre. Les progrès récents de la spectrométrie de masse à ultra-haute résolution ont permis d'identifier plus de 17 000 composants chimiques distincts (Hassanshahian et Cappello, 2013).

Un site est pollué quand il présente un risque pérenne, réel et potentiel pour la santé humaine et/ou l'environnement, du fait d'une pollution des milieux résultant d'une activité actuelle ou ancienne. La pollution a des effets importants sur la santé et la biosphère, comme en témoigne l'exposition aux polluants et le réchauffement climatique qui transforme le climat de la Terre et son écosystème.

En 2012 selon l'OMS, plus de 7 millions de personnes sont mortes prématurément à cause de la pollution de l'air extérieur et domestique ; l'Asie et le Pacifique étant les régions les plus touchées. La pollution par le pétrole est généralement due à diverses activités telles que l'extraction et le raffinage du pétrole (Hill et Ghoshal, 2002), la sidérurgie, la manipulation et

le stockage des goudrons et du bitume, ainsi que des phénomènes de pyrolyse-pyrosynthèse de la matière organique (combustibles fossiles, bois ...). Les usines d'incinération des déchets, le transport routier par émission de gaz d'échappement] est également responsable des contaminations des hydrocarbures dans l'environnement (Krein et Schorer, 2000). Nous nous intéressons ici à la pollution naturelle par les pétroles ayant échappé à la roche réservoir et la pollution par le pétrole au cours de son utilisation au quotidien pour le chauffage de des bâtiments. Pour ce faire nous commençons par présenter ici leurs natures et compositions afin de pouvoir identifier les composés toxiques.

II.1 Nature et composition chimique des hydrocarbures pétroliers

La caractérisation des pétroles bruts peut se faire de deux façons :

- par des méthodes globales fondées sur une distillation, suivie de mesures de densité, de viscosité et autres paramètres sur diverses fractions. Ces méthodes fournissent des indications utiles pour le raffinage et la valorisation des pétroles.
- Par des méthodes fondées sur des fractionnements par solubilité, chromatographie liquide par exemple suivie d'analyse des fractions par des méthodes physiques : chromatographies en phase gazeuse ou encore spectrométrie de masse. Elles permettent d'identifier les diverses familles de composés présents.

L'application de ces méthodes nous donne que les hydrocarbures sont des composés organiques principalement constitués d'atome de carbone et d'hydrogène. Ils possèdent une formule brute de type C_nH_m , où n et m sont 2 entiers naturels. Les hydrocarbures sont souvent classés selon leur nature. On distingue ainsi les hydrocarbures saturés et insaturés (voir figure 22). Ceux-ci peuvent être linéaires, ramifiés ou cycliques. Leur structure moléculaire varie et influe sur leurs propriétés. Plus le nombre de carbone est important, plus la masse volumique, le point de fusion et le point d'ébullition seront d'une manière générale, élevés (Tarayre, 2012). Le tableau 5 donne la composition chimique des principaux hydrocarbures pétroliers.

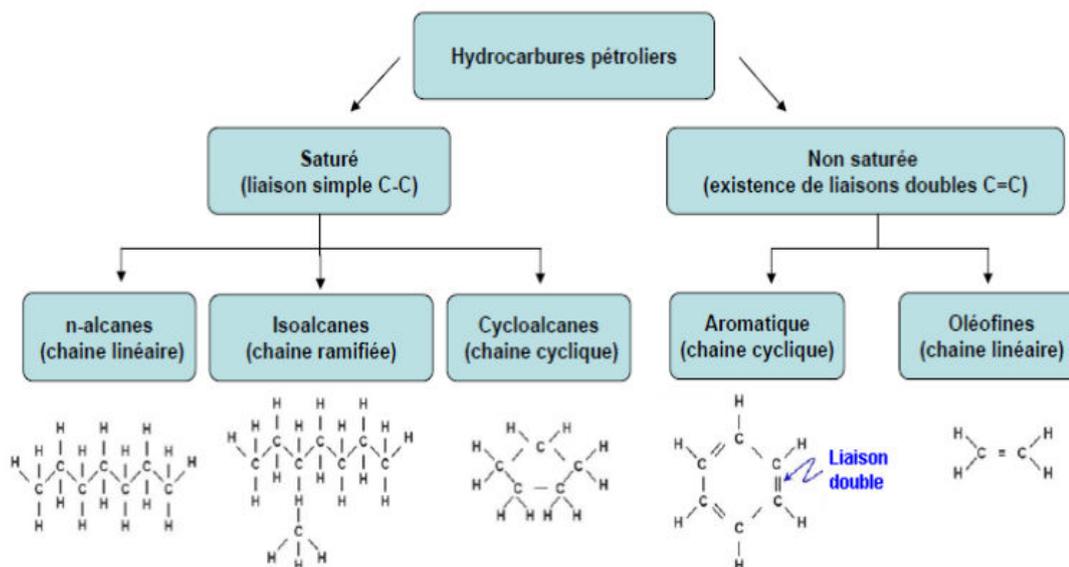


Figure 22: Structure de base des principaux hydrocarbures pétroliers
(Colombane et al, 2010)

S'agissant de leur composition, les hydrocarbures sont composés principalement de :

- Hydrocarbures aliphatiques, ce sont des composés à chaînes ouvertes linéaires ou ramifiées de formule générale $C_nH_{(2n+2)}$. Parmi les hydrocarbures saturés on distingue :
 - Les alcanes linéaires : 7 à 40 atomes de carbone. Ils constituent une des classes les plus nombreuses (10 à 40 % des hydrocarbures totaux d'un pétrole brut).
 - Les alcanes ramifiés : les plus abondants sont les iso-alcanes (groupement méthyle en position 2). Les autres composés ramifiés antéiso (groupement méthyle en position 3) ou polyramifiés tels que les isoprénoïdes (exemple : pristane, phytane) sont beaucoup moins abondants. Ces composés se trouvent dans le pétrole brut à des proportions presque égales à celles des n-alcanes.
 - Les cycloalcanes contiennent des composés cycliques saturés et le plus souvent substitués. Quelques dérivés polycycliques sont également présents ; certains d'entre eux, à savoir les stéranes et les triterpanes sont caractéristiques d'un pétrole brut. Les cycloalcanes peuvent représenter entre 30 et 50% des hydrocarbures totaux présent dans un pétrole brut. Les hydrocarbures aliphatiques insaturés sont constitués d'alcènes et d'alcynes. Ils sont dits insaturés car leurs chaînes ne portent pas autant d'atomes d'hydrogène que possible. Les alcènes, de formule générale C_nH_{2n} , sont principalement issus du craquage du pétrole brut. Les alcynes qui ont pour formule générale C_nH_{2n-2} constituent la troisième grande famille des

hydrocarbures aliphatiques. Les hydrocarbures insaturés ressemblent aux alcanes, du fait de leurs molécules apolaires et ils réagissent avec l'oxygène. En revanche, les hydrocarbures insaturés sont très réactifs et sont à la base de nombreuses réactions organiques : halogénéation (bromation), addition, hydrogénation, ozonolyse, polymérisation etc.

- Hydrocarbures aromatiques, ils sont répartis en deux familles d'hydrocarbures insaturés : les hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM), à savoir le benzène, toluène, éthylbenzène, xylène (BTEX), et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). L'agence de protection de l'environnement des États-Unis (US-EPA) a retenu 16 HAP en tant que polluants prioritaires pour leur étude et leur élimination dans l'environnement du fait de leur potentiel toxique, cancérigène et mutagène. Ils sont donc reconnus comme étant toxiques pour les organismes vivants (Gruyer et al., 2015). Seuls les HAP sont susceptibles d'interagir avec l'eau dans l'environnement en raison de leurs propriétés physico-chimiques (tableau 4), plus particulièrement leur solubilité plus élevée que celle des composés aliphatiques et des naphthènes qui sont insolubles (Pimsee, 2014).

- Composés polaires, ils sont constitués des résines et des asphaltènes.

Les résines sont les plus petits et constituent un groupe hétérogène de composés aromatiques (acides naphthéniques, les cétones, les quinones et les phénols). La principale caractéristique des résines est leur polarité élevée. Ce qui les rend solubles dans l'eau et est à l'origine de leur biodisponibilité et de leur toxicité pour les organismes lors de déversement d'hydrocarbures en milieu aquatique (Melbye et al., 2009). Les asphaltènes, constitués de molécules polycycliques à haut poids moléculaire, sont définis selon leur solubilité. Ils précipitent suite à l'addition dans le pétrole, d'un excès de nalcane. Ils sont solubles dans les solvants aromatiques (toluène ou le benzène). Bien que ces produits soient souvent présents en faible quantité, ils ont une influence considérable sur les propriétés physico-chimiques du pétrole brut. Les asphaltènes contiennent entre 10^5 et 10^6 molécules de différentes formes et tailles, et il n'est pas possible de décrire simplement leur structure chimique. Les asphaltènes sont donc constitués de plusieurs centaines de composés qui ont des solubilités similaires, mais qui peuvent avoir des structures, tailles et formes différentes (Tharanivasan et al., 2012). Leur capacité à flocculer, à s'adsorber sur des surfaces et à former des dépôts solides est à l'origine de nombreux problèmes aussi bien du point de vue exploitation des gisements, que du raffinage. Ce sont des hydrocarbures aromatiques polynucléaires qui contiennent, en plus des chaînes n-alcanes, des alcanes cycliques et des hétéroatomes, tels que le soufre, l'azote et l'oxygène, et des traces de métaux

(vanadium, nickel, fer). Ils représentent la fraction des hydrocarbures la plus stable et jouent un rôle important dans la stabilisation de l'émulsion des hydrocarbures (Gruyer et al., 2015).

D'autres constituants mineurs sont également présents dans les hydrocarbures pétroliers, comme des métaux et des composés polaires qui contiennent de l'azote, du soufre ou de l'oxygène.

Tableau 4: Composition chimique des principaux hydrocarbures pétroliers (Fingas 2012)

Groupe	Composés	Unité	Essence	Diesel	Pétrole brut		Mazout Intermédiaire	Mazout lourd N°6
					Léger	Lourd		
Alcanes	Totaux	%	50-60	65-95	55-90	25-80	25-35	20-30
	Alcanes non cycliques		45-55	35-45	40-85	20-60	10-25	10-20
	Cycloalcanes		5	25-50	5-35	0-10	0-5	0-5
Alcènes	5-10		0-10	-	-	-	-	
Aromatiques	Totaux		25-40	5-25	10-35	15-40	30-50	30-50
	BTEX		15-25	0,5-2,	0,1-2,5	0,01-2,0	0,05-1,0	0,001-1,0
	HAP		-	0-5	10-35	15-40	30-50	30-50
Composés polaires	Totaux		-	0-2	1-15	5-40	15-25	10-30
	Résines		-	0-2	0-10	2-25	10-25	10-20
	Asphaltènes		-	-	0-10	0-20	5-10	5-20
Métaux		Ppm	-	-	30-250	100-500	100-1000	100-2000
Soufre		%	0,02	0,1-0,5	0-2	0-5	0,5-2	2-4

Nous constatons d'après ce tableau que les pétroles bruts et le mazout contiennent les fractions les plus élevées de HAP, par rapport à l'essence et au diesel. Ceci est tout le contraire quant aux fractions de BTEX.

Les BTEX, les HAP, les composés contenant du soufre, les résines et les métaux représentent ici les principaux contaminants contenus dans les pétroles bruts.

II.2 Pollution par le pétrole lors de son ascension : les causes de la migration tertiaire

II.2.1 Les réservoirs naturellement fracturés

Dans le domaine de l'exploitation pétrolière, un réservoir naturellement fracturé est un réservoir qui contient des fractures résultant de processus géologiques naturels, par opposition à celles qui résultent de différences de contraintes artificielles introduites dans la roche dans le cadre d'une opération de stimulation du réservoir ou de forage (Aguilera, 1998). Dans cette études les effets des fractures naturelles sur un réservoir peuvent être positifs : dans ce cas elles empêchent la remonté du pétrole vers la surface, neutres ou négatifs : dans ce cas elles favorisent la migration des hydrocarbures vers la surface. Dans cette partie le concept de fracture naturelle dans les formations pétrolières sera tout d'abord introduit, puis une vue d'ensemble des

classifications existantes pour les réservoirs naturellement fracturés d'un point de vue géologique et technique sera fournie.

II.2.1.1 Les fractures dans les roches

Une fracture naturelle, également appelée simplement " fracture " dans ce travail sauf mention contraire, est définie comme une discontinuité plane macroscopique dans une roche (Nelson, 2001) formée en raison de contraintes diagénétiques déformationnelles ou physiques (tectonique des plaques. La diagenèse comprend tous les processus physiques, chimiques et/ou biologiques qui transforment les sédiments déposés en roche sédimentaire (Ali et al., 2010 ; Haile et al., 2017). Les changements chimiques (par exemple, la dissolution, la précipitation des calcites, etc.) qui se produisent pendant la diagenèse sont plus fréquents dans les réservoirs de carbonates. Étant donné que les fractures peuvent se former dans un réservoir avant, pendant et/ou après l'accumulation d'hydrocarbures, ces processus continuent de modifier les propriétés des fractures avec le temps.

Les fractures sont de nature multi-échelle et leurs longueurs peuvent aller de quelques micromètres (micro-fissures) observées dans les carottes à plusieurs kilomètres (fractures/failles régionales) dans les bassins et sont donc détectables sur les données sismiques (Hardebol et al., 2015 ; Bisdom et al., 2016). Les fractures peuvent être ouvertes, partiellement fermées ou complètement fermées. Les fractures fermées créent des barrières à l'écoulement ou aussi facilité l'écoulement. Ces barrières de perméabilité pourraient conduire à bloquer le pétrole dans la roche réservoir. Les fractures ouvertes pourraient avoir un effet positif sur la production en fournissant une voie d'écoulement et un soutien de pression au producteur, mais un effet négatif sur l'environnement demeure néanmoins.

II.2.1.2 Classification des fractures

Différentes classifications géologiques des fractures existent dans la littérature (Stearns et Friedman, 1969 ; Tiab et Donaldson, 2016). Les classifications géologiques sont basées sur les modèles de fractures qui sont observés dans les expériences de laboratoire et les affleurements. Ces classifications nous peuvent aider à comprendre et de prédire les comportements des fractures pendant la migration tertiaire du pétrole. La figure (23) montre différents styles de fractures observées à partir d'affleurement relatif à un réservoir carbonaté du Crétacé inférieur.

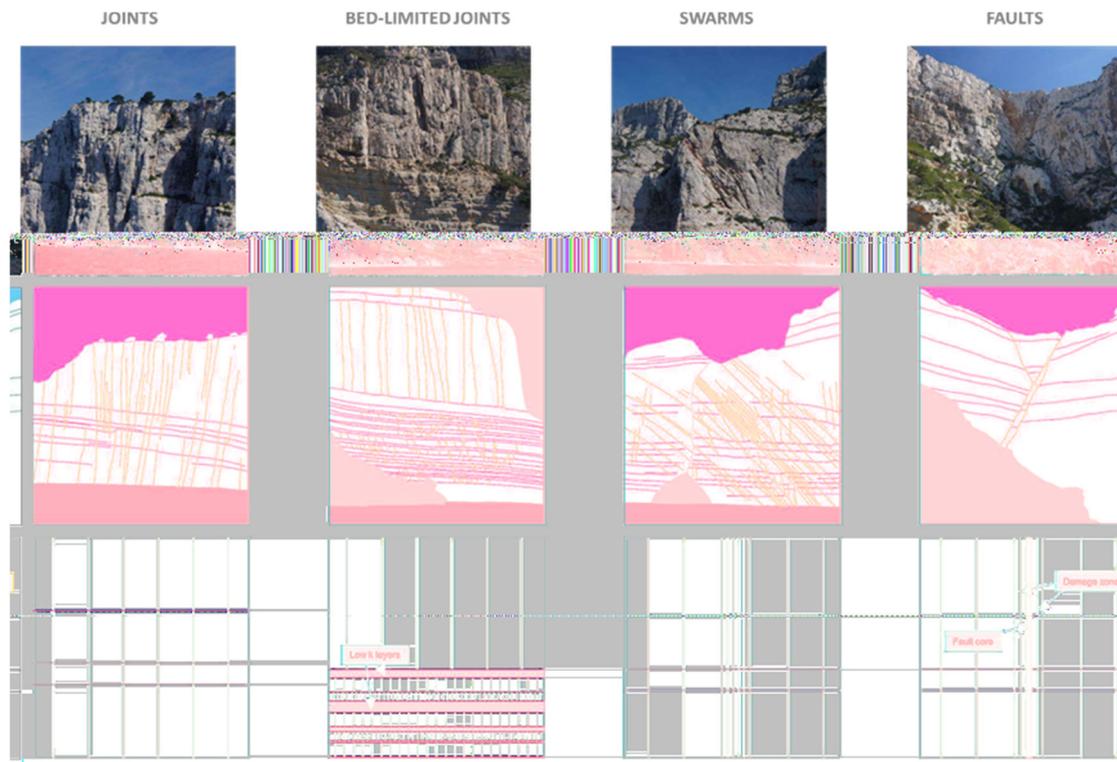


Figure 23: En haut : Styles de fractures observés dans un affleurement pour un réservoir. Au milieu : Croquis des fractures observées sur l'affleurement. En bas : La représentation des fractures dans le modèle de réservoir. (Bentley et al. 2017).

Stearns et Friedman (1969) et Nelson (2001) ont classé les fractures sur la base des conditions de contrainte/déformation dans des expériences de laboratoire contrôlées et des fractures observées dans les affleurements. Il s'agit de fractures de cisaillement, d'extension et de tension (voir tableau 5). Elles sont résumées brièvement comme suit :

Tableau 5 : Classification des fractures expérimentales et naturelles (Nelson, 2001).

Classification expérimentale des fractures	Classification des fractures naturelles
1. Fractures de cisaillement	1. Fractures tectoniques (dues aux forces de surface)
2. Fractures d'extension	2. Fractures régionales (dues à des forces de surface ou à des forces corporelles)
3. Fractures en traction	3. Fractures contractiles (dues aux forces du corps)
	4. Fractures liées à la surface (dues aux forces du corps)

Les fractures observées dans les expériences de laboratoire ont des corrélations avec les fractures naturelles observées dans les affleurements (Bratton et al., 2006). Ces fractures

naturelles ont été classées sur la base de leur origine géologique en fractures tectoniques, régionales et diagénétiques comme suit :

- Fractures tectoniques. L'origine des fractures tectoniques, de même que leur orientation, leur distribution et leur morphologie, sont liées à des événements tectoniques locaux. Les réseaux de fractures qui en résultent sont spatialement associés aux failles et aux plis. Les fractures liées aux failles sont principalement observées dans les affleurements comme des fractures de cisaillement qui se sont formées parallèlement aux failles.
- Fractures régionales. L'origine des fractures régionales est liée à la tectonique des plaques à grande échelle (failles et/ou plissements). Ces fractures se forment sur une grande surface de la croûte terrestre. Elles se produisent perpendiculairement aux surfaces du litage principal et sont généralement de longues fractures dont l'orientation change relativement peu sur leur longueur. Lorsque les fractures régionales sont superposées aux fractures tectoniques, on peut assister à une migration tertiaire très poussée.
- Les fractures diagénétiques : elles se forment en raison de changements diagénétiques dans la roche et résultent de mécanismes de réduction du volume global au sein de la roche et non de forces externes. Les exemples les plus courants sont les fractures de contraction thermique et les fractures causées par des changements de phase minérale.

II.3 Le mazout et l'environnement

Le chauffage au mazout est un mode de chauffage des plus efficaces. Il a la capacité d'offrir une **source de chaleur rapide et confortable par grand froid**. En effet, le mazout chauffant à très haute température, on atteint rapidement les températures désirées.

Cependant, Le mazout fait partie des combustibles les plus polluants au monde pour se chauffer. La combustion d'un kilo de fioul nécessite 11,2 m³ d'air ou 2,3 m³ d'oxygène. De plus, les gaz nocifs que sa combustion génère sont aussi bien dangereux pour la santé que pour l'environnement comme nous le verrons dans la suite de ce travail. Il produit:

- du dioxyde de carbone (CO₂) en grande quantité (environ 300 g de CO₂ pour 1kWh d'énergie produite) ;
- du soufre, qui, une fois mélangé à l'oxygène de l'air, se transforme en dioxyde de soufre (SO₂) ;

- de l'oxyde d'azote et différentes particules fines.
- Enfin, une combustion incomplète produit du monoxyde de carbone (CO).

Tous ces éléments sont responsables des problèmes écologiques que nous rencontrons actuellement. L'effet de serre a par exemple grandement contribué au phénomène de réchauffement climatique dont les conséquences sont les dérèglements des saisons, la déforestation et les bouleversements de la vie animale. Par ailleurs, les gaz et la fumée qu'il produit sont nocifs pour l'Homme. Le monoxyde de carbone est par exemple à l'origine de nombreuses morts par intoxication chaque année dans l'Hexagone.

Outre la production de gaz toxiques lors de sa combustion, le fioul est également un gros polluant des sols. Les fuites au niveau des cuves mal conçues ou mal entretenues tuent les plantes tandis que les terrains contaminés sont stériles ou non adaptés à la culture.

L'infiltration du fioul dans les sols pollue de même la nappe phréatique. Le mazout qui se déverse dans les cours d'eau naturels détruit leur faune rendant les poissons et les autres produits halieutiques impropres à la consommation.

Enfin, son mode d'extraction cause également des dégâts considérables sur l'environnement comme nous avons pu le voir dans la partie précédente de ce chapitre. De plus, malgré les normes établies et les précautions mises en place lors de son extraction, le pétrole brut risque toujours de se déverser dans la nature.

II.4 Toxicité des produits pétroliers

II.4.1 Sur l'environnement

Les hydrocarbures pétroliers sont des contaminants environnementaux omniprésents. Ils constituent une classe des produits chimiques organiques dangereux. Les impacts de la pollution par les hydrocarbures sont multiples et les aspects les plus évidents sont les grandes catastrophes (Bouderhem et Khelil, 2017). Nous avons les déversements d'hydrocarbures causés par des accidents liés à des catastrophes naturel affectant les roches réservoirs et entraînant des pollutions lourdes de conséquences suite à l'importance des dommages réels ou potentiels pour l'environnement. Les hydrocarbures sont des composés organiques volatils. Leur présence dans l'atmosphère sous forme de gaz contribue à la production d'ozone dans la troposphère par réaction photochimique. Dans les sols, la toxicité des HAP est directement

fonction de la quantité de polluants et de leur biodisponibilité. En fait, de par leur très faible solubilité, les HAP ont tendance à s'adsorber sur la matière organique du sol et à migrer progressivement dans les micro-agrégats, diminuant leur accessibilité aux micro-organismes et aux plantes (Alexander, 2000). Les effets écotoxiques de la pollution par les HAP se traduisent par des altérations biologiques tant aux niveaux moléculaires que populationnels sur des organismes divers. Il s'agit des bactéries (Maliszewska-Kordybach et al., 2007), des champignons (Chiapusio et al., 2007), des protozoaires (Sverdrup et al., 2002), des vers de terre, des arthropodes (Eom et al., 2007) et des plantes (Técher, 2011).

II.4.2 Sur les plantes

La pollution des plantes par des HAP (phytotoxicité) peut être observée à différents niveaux, de l'inhibition de la germination à la limitation de la production de biomasse (Ouvrard et al., 2014). Plusieurs auteurs ont montré que les HAP ont des effets au niveau de la croissance et du fonctionnement des plantes supérieures ; ceci à travers la diminution de la germination, des retards de croissance et de rendement (Chaîneau et al., 1996), l'apparition des chloroses, des diminutions de l'activité photosynthétique et des stress hydriques (Reilley et al., 1996 ; Norini, 2007). En contact avec les hydrocarbures, la longueur des racines ainsi que le nombre de racines secondaires sont réduits. Toutefois, l'intensité des symptômes varie selon l'espèce végétale, le polluant et son exposition (Dupuy, 2014).

II.4.3 sur l'Homme

Une fois présents dans les différentes composantes de l'environnement, les hydrocarbures peuvent passer dans la chaîne alimentaire et se révéler à la fois cancérigène, mutagènes et reprotoxiques lorsqu'ils sont soit inhalés, ingérés ou même absorbés par les êtres vivants (Qiu et al., 1997 ; Mekhalif, 2009). L'homme peut assimiler les hydrocarbures par trois voies (voir figure 24):

- par voie digestive, en ingérant des aliments qui contiennent des hydrocarbures ;
- par voie respiratoire, en respirant des poussières qui en contiennent ;
- par voie cutanée, en touchant des matériaux qui en contiennent.

La structure moléculaire de certains types d'hydrocarbures leur confère la possibilité d'être transformés dans l'organisme en composés extrêmement toxiques, appelés époxydes. Les époxydes réagissent très facilement avec l'ADN, ce qui peut entraîner des mutations génétiques

conduisant parfois à des cancers. Certains hydrocarbures peuvent également affecter la reproduction ou le développement fœtal. Ces effets ont été démontrés en expérimentation animale, mais le risque existe également pour l'Homme.

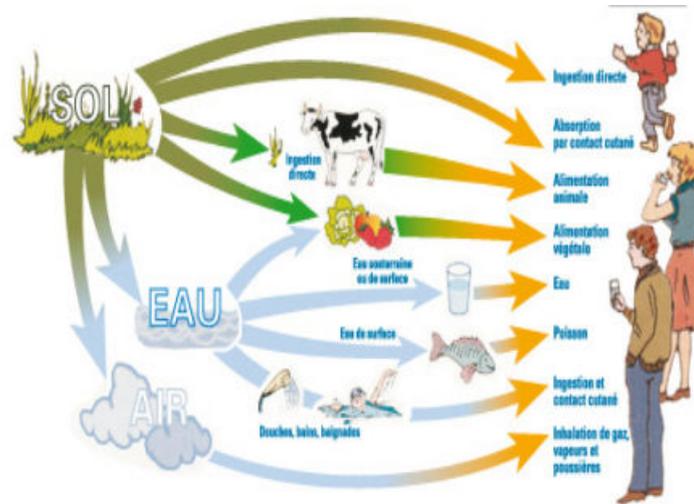


Figure 24: Chaîne de transmission des polluants organiques chez les êtres vivants (Harmens et al., 2013)

III. Matériel et méthode du processus de migration ascensionnelle du pétrole

III.1 système pétrolier

Un système pétrolier est un système regroupant des éléments et des processus géologiques propices à l'accumulation des hydrocarbures (Magoon et Dow, 1994 ; Burrus (1997) ; Gluyas et Swarbrick (2004). Un système pétrolier est ensemble constitué principalement de fluides et de roches. Ces roches et ces fluides présentent des caractéristiques physiques nécessaires à la compréhension du phénomène physique étudié ici. Ainsi après avoir vu les réservoirs et les types de pièges dans lesquelles nous pouvons trouver du pétrole ; nous décrivons le processus de migration du pétrole brute. Nous abordons ensuite la notion d'écoulements en milieu poreux à travers les notions de diffusion et de loi d'écoulement, tout ceci afin d'établir l'équation de diffusion du pétrole dans la roche au cours de son processus d'ascension.

III.2 Réservoirs et types de pièges

III.2.1 Les Réservoirs

Le pétrole formé migré et s'entasse dans des réservoirs. On entend par réservoir un aménagement du sous-sol renfermant une accumulation naturelle d'hydrocarbures, limitée par une barrière de roches imperméables (généralement des argiles ou des évaporites). Les

réservoirs sont des structures rocheuses poreuse et perméable. Il s'agit très souvent de structure en grès ou en carbonate. Un réservoir est caractérisé par :

- sa porosité ; c'est le rapport entre le volume des pores et le volume total du milieu. Elle caractérise la capacité de stockage de la roche.
- sa perméabilité ; aptitude d'une roche à laisser circuler à travers ses pores un fluide dont elle est saturée. Cette aptitude varie en fonction de la direction de l'écoulement.

L'état de remplissage d'un réservoir est décrit par les saturations. Il s'agit du rapport entre le volume d'eau, d'huile et de gaz et le volume de pores. Le réservoir est généralement stratifié en couches lithologiques de quelques mètres ou dizaines de mètres d'épaisseur qui correspondent à un raffinement local des couches stratigraphiques du bassin. Un gisement est constitué d'un ou de plusieurs réservoirs superposés ou proches latéralement. Certains gisements sont constitués de plusieurs dizaines ou même plusieurs centaines de réservoirs.

III.2.2 Les types de pièges

Il ne saurait y avoir de gisements d'hydrocarbures si le pétrole formé ne rencontre une barrière au cours de sa migration qui l'arrête et le force à s'accumuler. Ces espaces sont appelées pièges de pétroles. Il s'agit des espaces présentant une disposition susceptible de retenir les hydrocarbures pour former un gisement. En fonction leur géométrie et de leur système de fermeture on distingue types de pièges

III.2.2.1 les pièges structuraux

Ils présentent une géométrie fermée, causée par des déformations des roches. Les pièges anticlinaux et les pièges contre failles sont les plus connus. Le premier cas constitue 75 à 80% des gisements reconnus dans le monde. Ils sont également les plus fréquents et les plus efficaces. Dans le premier cas, les hydrocarbures s'accumulent sous l'anticlinal jusqu'à ce qu'ils atteignent un point de fuite (par débordement) pour continuer ensuite à migrer. Dans le deuxième cas, les fluides circulant dans une couche perméable sont coincés sous des couches imperméables dans un système formé par le déplacement des couches à la faveur d'une faille (voir figure 25).

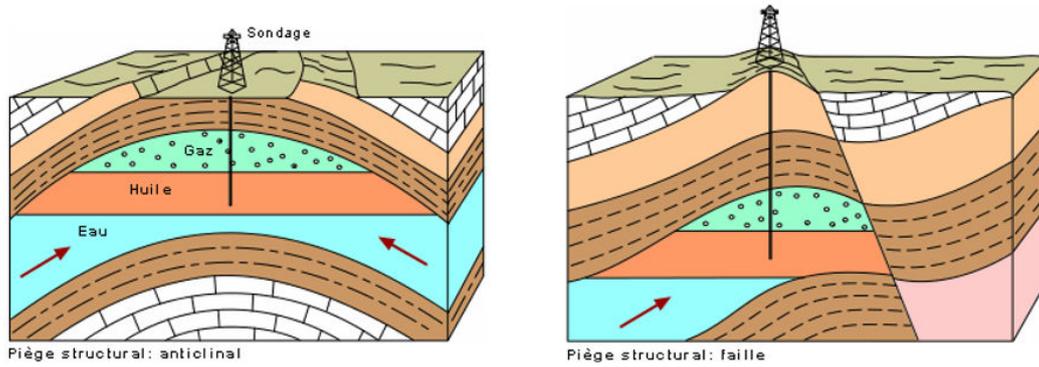


Figure 25: Schémas des pièges structuraux (Magoon et al, 1994)

III.2.2.2 les pièges stratigraphiques

Ils ne possèdent pas de géométrie fermée. La migration se trouve bloquée par une variation latérale de couche de roche, qui évolue vers une roche imperméable permettant la formation d'accumulations d'hydrocarbures (Voir figure 26).

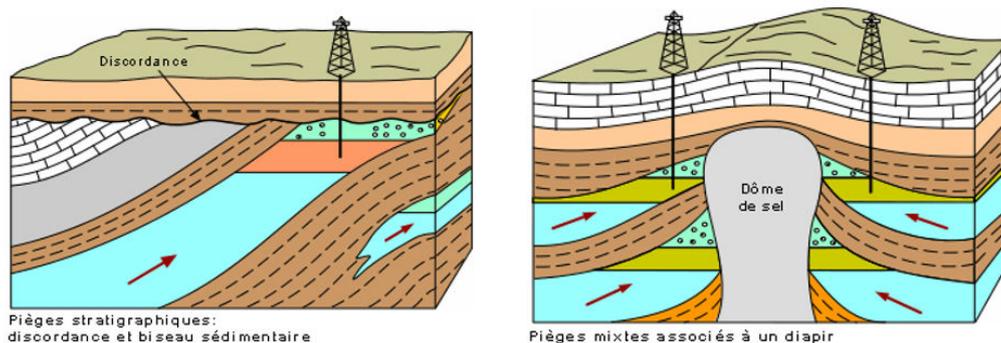


Figure 26: Schémas de pièges stratigraphiques. (Magoon et al, 1994)

La plupart des plus grands gisements sont logés dans des pièges anticlinaux (pièges structuraux). On trouve aussi des pièges sur faille ou mixtes anticlinal-faille, des pièges formés par la traversée des couches par un dôme salin, ou encore créés par un récif corallien fossilisé. Il existe également des pièges diagénétiques c'est-à-dire des pièges stratigraphiques ayant pris naissance pendant le dépôt ou la diagénèse de la roche réservoir.

III.3 Migration des hydrocarbures

À la fin de la maturation le pétrole va chercher migrer vers la surface. Nous distinguons trois causes principales de cette migration : la surpression à l'intérieur de roche mère, le

compactage par les couches superficielles ou encore les phénomènes naturels tels que les mouvements des plaques tectoniques. Cette migration se fait en deux phases principales à savoir : la migration primaire et la migration secondaire ; une troisième est également possible et est appelée dysmigration notons que cette migration est celle qui nous intéresse plus dans ce travail.

III.3.1 La migration primaire

Il s'agit d'un processus au cours duquel le pétrole est expulsé de la roche mère. En effet, la roche mère (roche sédimentaire très peu perméable) continuant de s'enfoncer dans le sol, se tasse continuellement sous le poids des couches supérieures (*voir figure 27*). Cela a pour effet d'augmenter la pression. Des fissures finissent par se créer au sein de la roche réservoir et les hydrocarbures s'en échappent. L'expulsion des hydrocarbures de la roche mère dépend de la quantité de matière présente dans la roche mère et de la distribution spatiale de ce dernier dans la roche mère. Cependant l'expulsion se produit lorsqu'une certaine saturation en pétrole est atteinte soit environ 20%.

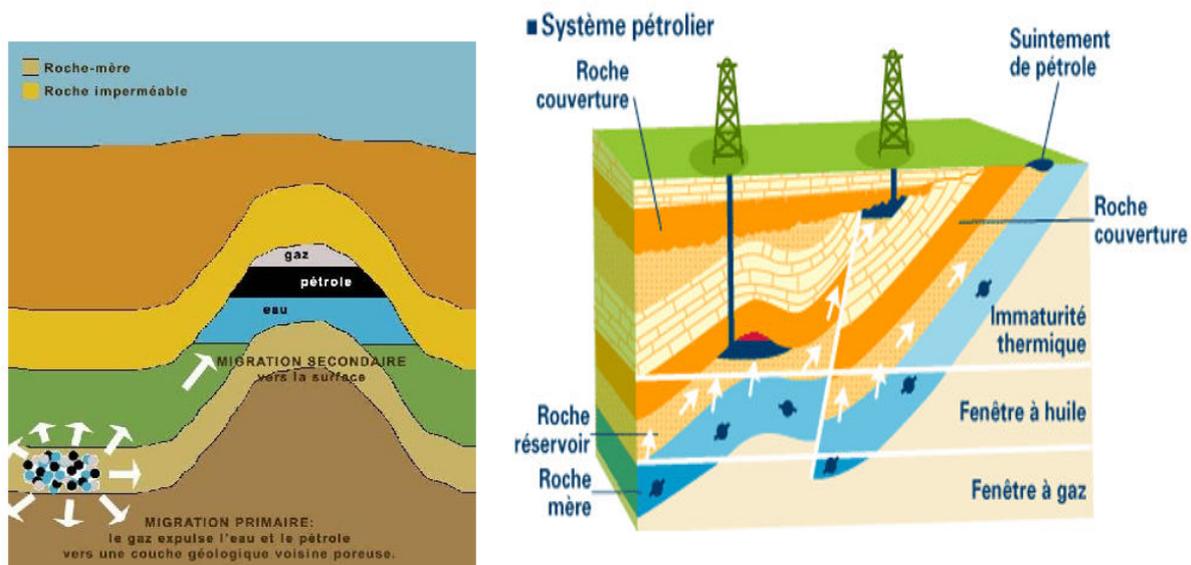


Figure 27: système pétrolier (ifpenergiesnouvelles.fr)

III.3.2 La migration secondaire

Les hydrocarbures issus de la roche mère peuvent être bloqués par une barrière au cours de leur migration, ils s'accumulent en amont de celle-ci pour former un gisement. En effet, l'action combinée de la pression du fluide, de la gravité et d'un gradient de pression capillaire sur les hydrocarbures vont pousser ces derniers à migrer et s'accumuler sous une roche

couverture. Cette seconde étape constitue la migration secondaire. La figure 28 illustre de manière schématique les différents types de migration.

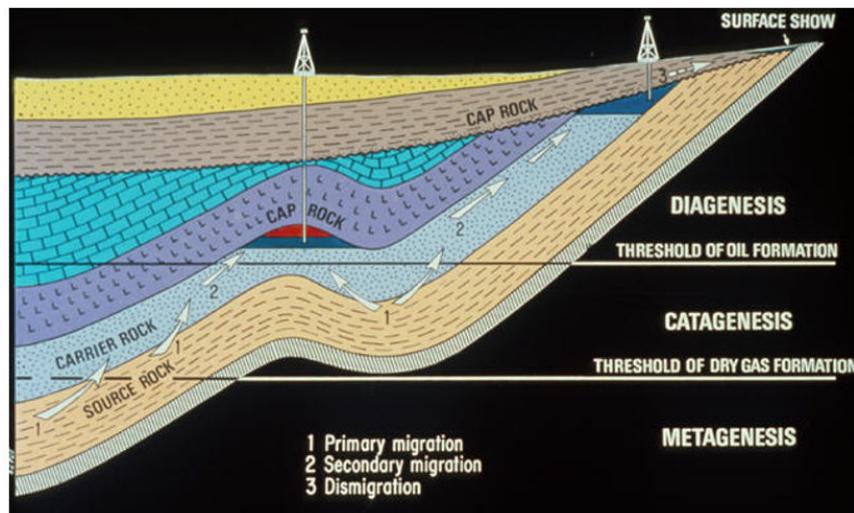


Figure 28: Schéma des différents types de migration. (TISSOT ET WELTE, 1984)

Il arrive cependant parfois que les hydrocarbures arrivent au bout d'un certain temps à traverser la roche couverture pour gagner d'autres zones d'accumulation ou parvenir en surface. On parle alors de migration tertiaire ou de dysmigration ; nous nous intéressons particulièrement à ce cas, car ce phénomène peut avoir des conséquences néfastes pour l'environnement.

III.3.3 La dysmigration ou migration tertiaire

Comme nous l'avons indiqué précédemment, la migration tertiaire est la fuite des hydrocarbures depuis les pièges. Elle est imputée aux fuites capillaires, aux fuites hydrauliques et à la diffusion moléculaire (Sylta, 2004) mais aussi aux phénomènes naturels affectant les roches couvertures et les roches réservoirs. Les fuites dans les roches couvertures sont possibles lorsque les processus moteurs (la flottabilité, les gradients de pression, la diffusion moléculaire) excèdent les facteurs résistants (la pression capillaire ou la perméabilité) de la roche couverture (Thomas and Clouse, 1995; Burrus, 1997). Dans une accumulation normalement pressurée, une couverture argileuse atteint son maximum d'efficacité lorsque la pression engendrée par la colonne d'hydrocarbures devient équivalente à la pression capillaire d'entrée dans les argiles qui la constituent. Pour une accumulation en surpression (la différence entre la pression du fluide et la pression hydrostatique), la direction et l'intensité des circulations de fluide sont contrôlées par le champ de pression globale et

la flottabilité engendrée par la colonne d'hydrocarbures joue un rôle mineur. La vitesse de fuite est alors contrôlée par le coefficient de perméabilité, la viscosité du fluide et le gradient de pression (Watts, 1987; Schlomer and Krooss, 1997).

Nous avons également vu plus haut que ces phénomènes de fuite des pétroles peuvent trouver leurs origines dans les conséquences des phénomènes liés à la tectonique des plaques pouvant entraîner des fractures de la roche couverture. Nous pouvons citer entre autre parmi ses conséquences, les séismes qu'ils soient sous-marin au terrestre, les tremblements de terre, les failles et autres.

Les mécanismes de la migration des hydrocarbures dans un bassin sédimentaire ne sont cependant pas totalement maîtrisés et certains points sont toujours discutés (Hantschel et Kauerauf, 2009). Nous allons dans la suite présenter les principes de la migration à l'échelle du pore, à l'échelle du laboratoire, puis à l'échelle grandeur nature.

III.4 les différentes échelles d'observation du phénomène de migration

III.4.1 Migration des pétroles à l'échelle des pores

Dans ce paragraphe, nous allons expliquer de quelle manière les gouttes d'huile arrivent à se faufiler au travers des pores d'une roche mouillable à l'eau. Pour qu'une goutte d'huile se déplace à travers une roche, elle doit se déformer afin de traverser les pores de la roche, précédemment saturés en eau (voir figure 29). La pression capillaire présente sur cette figure est la différence de pression observée de part et d'autre de l'interface séparant l'eau et l'huile. Cette dernière dépend comme nous l'avons vu plus haut du rayon d'accès moyen aux pores R , de la tension interfaciale γ et de la mouillabilité θ de la roche. Elle peut être exprimée par la formule

$$P_c = \frac{2\gamma\cos(\theta)}{R} \quad (1.1)$$

La pression capillaire exerce une résistance à la migration des hydrocarbures qui elle a pour moteur la force de flottabilité (Berg, 1975). Ceci dit la poussée d'Archimède (force que subit un corps plongé dans un fluide liquide ou gaz soumis à un champ de gravité) est verticale, orientée vers le haut et son intensité est égale au poids du volume de fluide déplacé. Ainsi on définit la flottabilité à partir de la poussée d'Archimède : c'est la poussée verticale, dirigée de bas en haut, qu'un fluide exerce sur un objet immergé ; elle agit donc dans la direction opposée

à la gravité. Dans le contexte actuel, la pression de flottabilité provient du contraste de densités entre l'huile et l'eau. Elle est définie par :

$$Pa = (\rho_{eau} - \rho_{huile})gh \quad (1.2)$$

où :

- ρ_{eau} , ρ_{huile} (kg/m^3) sont respectivement les densités de l'eau et de l'huile,
- g (m/s^2) est l'accélération due à la pesanteur,
- h (m) est la hauteur d'hydrocarbures piégés. A l'échelle du pore, cette hauteur correspond à celle d'une goutte d'huile, à une échelle un peu moins fine, elle correspond à celle d'un filament d'hydrocarbures.

Dans le mécanisme présenté par Berg, on se place dans un milieu idéalisé, plausible à l'échelle du pore. Une gouttelette d'huile est soumise aux forces capillaires et de flottabilité dans un environnement hydrostatique. Pour expliquer ces mécanismes, on introduit les notations suivantes :

- soit r_p (m) le rayon de pore de la roche réservoir,
- soit r_t (m) le rayon de pore de la roche barrière (rayon de l'interstice entre deux grains de la roche barrière).

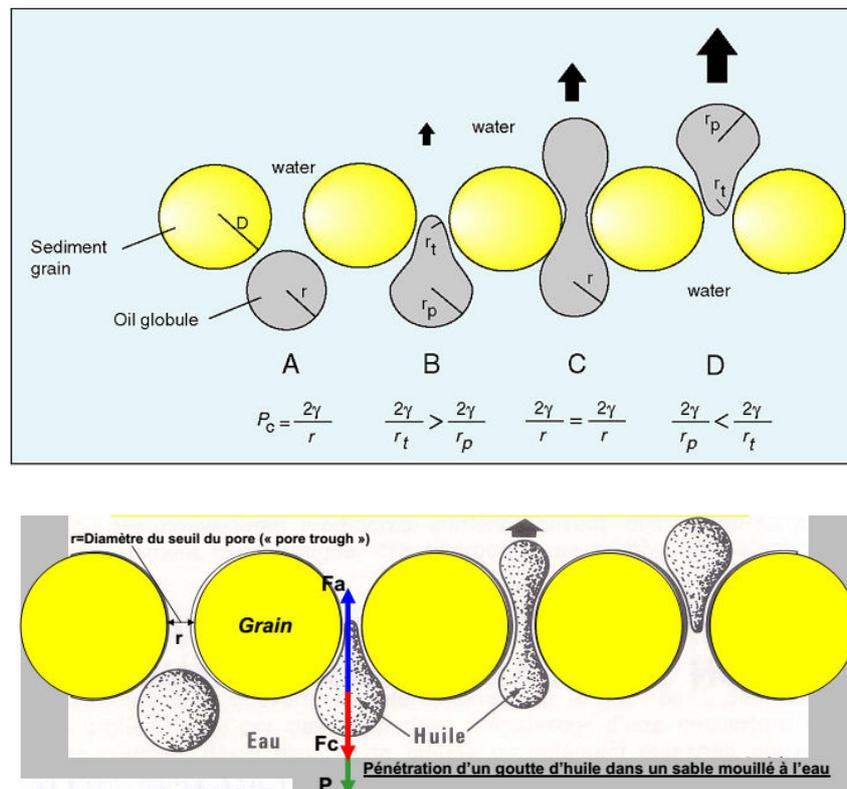


Figure 29: Mécanisme de la migration à l'échelle des pores (Berg, 1975).

Dans la première situation (A), la goutte d'huile est à l'équilibre dans le pore. La flottabilité n'est pas suffisante pour déformer la goutte afin qu'elle passe dans l'interstice entre les deux grains. Dans la deuxième situation (B) la goutte est déformée et est entrée dans l'interstice. La pression capillaire est plus grande dans l'interstice que dans le pore car le rayon de l'interstice r_t est plus petit que le rayon de pore r_p . Le gradient de pression capillaire s'oppose à la flottabilité. Dans la troisième situation (C) les deux rayons r_t et r_p sont égaux, les pressions capillaires dans le pore et dans l'interstice sont égales; la goutte d'huile peut bouger facilement avec la flottabilité. Dans la quatrième situation (D) la goutte d'huile est déformée et le rayon r_p est plus grand que le rayon r_t mais contrairement au cas B, le gradient de pression capillaire est dans la même direction que la flottabilité ; la goutte peut migrer dans un autre pore.

Dans le modèle idéalisé proposé par Berg, pour qu'une goutte d'huile migre vers un autre pore, la flottabilité doit être suffisante pour vaincre le gradient de pression capillaire. La hauteur critique, h_c , pour laquelle cette condition se réalise, est donnée par :

$$h_c = \frac{2\gamma\left(\frac{1}{r_t} - \frac{1}{r_p}\right)}{g(\rho_{eau} - \rho_{huile})} \quad (1.3)$$

Ainsi, une goutte d'huile devra se déformer et grandir jusqu'à ce que la hauteur d'huile critique soit atteinte. C'est uniquement à cette condition qu'elle pourra traverser la barrière.

La condition de migration est la suivante

$$gz_0 = (\rho_w - \rho_o) > 2\gamma/r$$

r ici représente le diamètre du seuil de pore

II.4.2 Migration des hydrocarbures à l'échelle du laboratoire

La vue présentée dans le paragraphe précédent n'est pas applicable à un milieu poreux réel. On estime que lorsque plusieurs gouttes d'huile se retrouvent face à une barrière capillaire qu'elles ne peuvent traverser, elles s'agglutinent entre elles et forment un filament ou une chaîne. Ce filament peut se développer jusqu'à ce qu'il atteigne la hauteur nécessaire pour passer la barrière. Les figures 30 et 31 illustrent de manière schématique ce mécanisme :

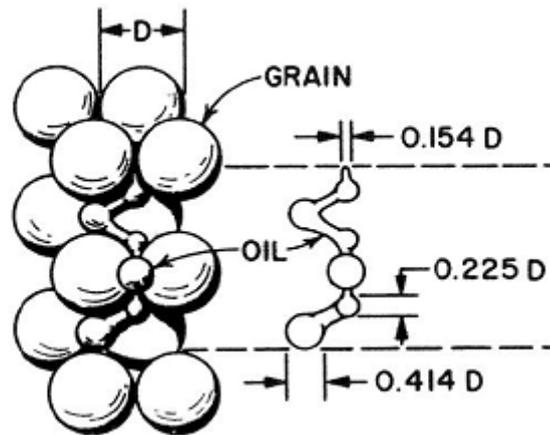


Figure 30: Formation de filaments d'hydrocarbures entre les grains d'une roche (Berg, 1975).

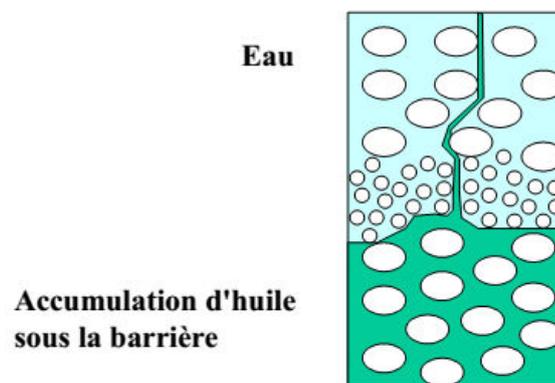


Figure 31: Accumulation d'huile sous une roche à forte pression capillaire, puis fuite à travers cette barrière sous la forme de filaments d'hydrocarbures. (Berg, 1975)

De nombreuses expériences ont été faites pour comprendre la physique de ce phénomène (Lenormand, 1981 ; Auradou et al., 1999 ; Flekkøy et al., 2002). La longueur d'un filament dépend notamment du type de la roche (de sa porosité ou du diamètre de ses grains) et de la densité de l'huile. La figure 32 ci-dessous montre les résultats d'une expérience faite à partir d'un tube rempli de billes de verre et d'eau (Catalan et al, 1992). Le tube est mis à la verticale et de l'huile est injectée par le bas. Des filaments de gouttelettes d'huile se forment et vont jusqu'au toit du tube. Un tableau récapitulatif donne les vitesses de migration en fonction du diamètre des billes de verre et de la densité de l'huile (voir tableau 6). L'utilisation de billes de verre pour représenter les grains composant une roche peut aboutir à avoir des tailles de pores très éloignées de la réalité. (Luo et al. 2008) ont également présenté des expériences similaires, permettant de mieux comprendre les mécanismes de la migration voire de quantifier les pertes potentielles d'hydrocarbures.

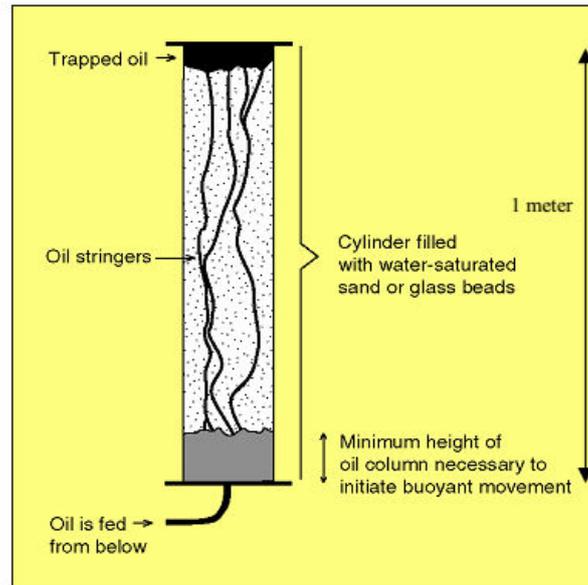


Figure 32: Schéma d'une expérience représentant une injection d'huile en bas d'un tube rempli de billes de verre saturé en eau. (Catalan et al. 1992).

Tableau 6: Exemples de vitesses de migration d'huile dans un tube rempli de billes de verre saturé en eau (Catalan et al. 1992).

Orientation de la colonne	Diamètre des billes (mm)	Densité de l'huile (g/cm ³)	Vitesse de migration (cm/h)
Verticale	0.720	0.761	49.2
Inclinée	0.720	0.761	39.6
Verticale	0.720	0.884	12.3
Verticale	0.250	0.761	0.014

Il est admis que les hydrocarbures migrent sous la forme de ces filaments déconnectés les uns des autres à une plus grande échelle (Berg, 1975 ; England et al., 1987 ; Schowalter, 1979 ; Sylta, 2004), même si les observations directes à cette échelle sont difficiles.

II.4.3 Migration des hydrocarbures aux échelles du réservoir et du bassin

A l'échelle du réservoir ou du bassin, il est pratiquement impossible de faire des expériences, seules des observations et des interprétations des phénomènes géologiques peuvent aider à comprendre les mécanismes de la migration et à estimer la pertinence des hypothèses proposées (Sylvie Pegaz-Fiornet, 2011). Les observations géologiques disponibles

sont par exemple les affleurements mettant en évidence des strates rocheuses avec des traces d'hydrocarbures, mais aussi les nombreuses données recueillies au cours de l'exploitation des gisements (contrôles aux puits, carottes, épaisseurs des couches sédimentaires, pendages, faciès...).

A cette échelle, au sein d'une accumulation, la pression de flottabilité P_b est définie de la même manière qu'à l'échelle des pores par la formule suivante :

$$P_a = (\rho_{eau} - \rho_{huile})gh \quad (1.4)$$

où h correspond à la hauteur d'hydrocarbures piégés .

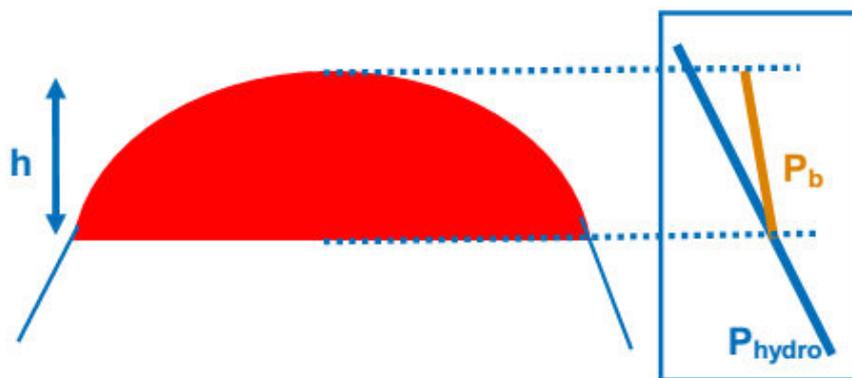


Figure 33: Représentation schématique de la pression de flottabilité dans une accumulation d'hydrocarbures.

Ici :

- P_{hydro} : pression hydrostatique
- P_b : pression de flottabilité
- h : hauteur d'hydrocarbures piégés

Vue l'épaisseur des couches considérées (quelques mètres à l'échelle du réservoir, plusieurs centaines de mètres à l'échelle du bassin), la stratigraphie est souvent simplifiée et les données de pressions d'entrée capillaires doivent être moyennées. Pour les bassins, malgré cette approximation, on doit retrouver les roches couvertures et les zones de drainage. On rappelle qu'on peut définir des régions de drainage et de barrière en s'appuyant sur les propriétés de porosité et de perméabilité des couches. Dans les régions de drainage, sous l'effet de la flottabilité, des filaments d'huile vont migrer vers la surface. Selon le mécanisme de snapoffs, ces filaments seront déconnectés par endroit (Carruthers, 1998). Donc, pendant cette

étape, la phase d'huile n'est pas continue. Lorsque l'huile rencontre une barrière capillaire qu'elle ne peut vaincre, elle va s'accumuler sous cette résistance. Les filaments d'huile vont se connecter les uns aux autres et former une zone d'accumulation, la phase d'huile va devenir continue et une pression significative va se créer (voir Figure 34).

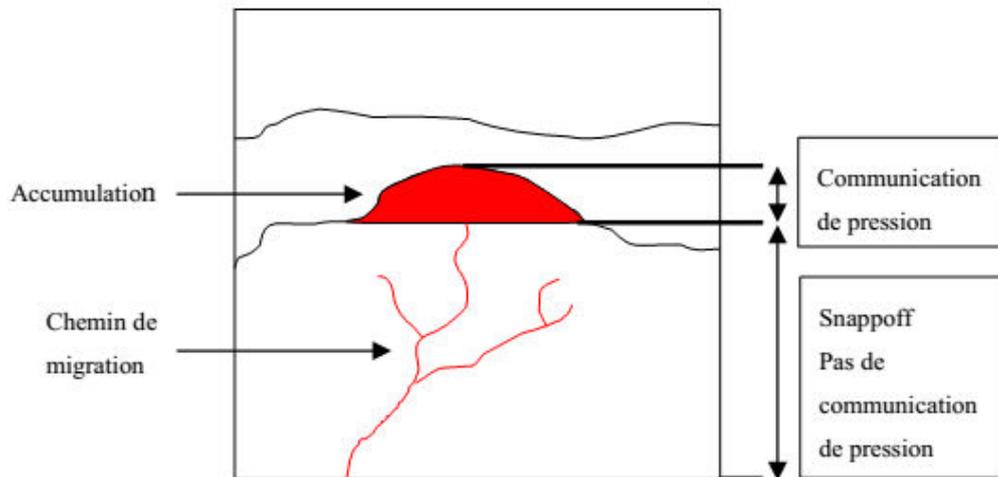


Figure 34: Communication de pression (Carruthers, 1998)

Lorsque la pression de la zone d'accumulation augmente et qu'elle devient supérieure à celle exercée par la barrière capillaire, la flottabilité est alors plus forte que la force capillaire, le système n'est plus à son équilibre capillaire (Carruthers, 2003). La hauteur d'huile pour vaincre la barrière capillaire a été atteinte. Dans le cas où la pression de flottabilité existant dans une zone d'accumulation ne suffit pas pour traverser une barrière capillaire (la hauteur d'huile n'est pas suffisamment grande), il est possible que le milieu sous cette barrière soit complètement saturé en huile et qu'il rentre en surpression. La pression augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne la pression minimale capable de traverser la barrière. En pratique, cette surpression ne peut dépasser une valeur maximale fixée par le seuil de fracturation des roches couvertures. Au-delà de ce seuil, de nouveaux chemins de fuite peuvent s'ouvrir temporairement entraînant ainsi les fluides et ceci indépendamment des pressions capillaires observées dans ces barrières. Il est généralement difficile de savoir si une couche va être en état de surpression ou bien de fracturation car ce dernier mécanisme est peu contrôlable et est lié aux faiblesses initiales de la roche. Ce phénomène cependant peut avoir de l'importance pour la migration tertiaire (Aydin, 2000) que nous verrons plus tard.

L'évaluation de la hauteur d'hydrocarbures piégeables dans les zones d'accumulation étant l'un des principaux intérêts du pétrolier, on peut à partir des pressions d'entrée capillaires des roches couverture obtenir une approximation utile de cette hauteur, de

la même manière qu'au paragraphe précédent. La figure 35 donne la hauteur des colonnes d'hydrocarbures en fonction de la pression d'entrée capillaire et des contrastes de densités entre les hydrocarbures et l'eau.

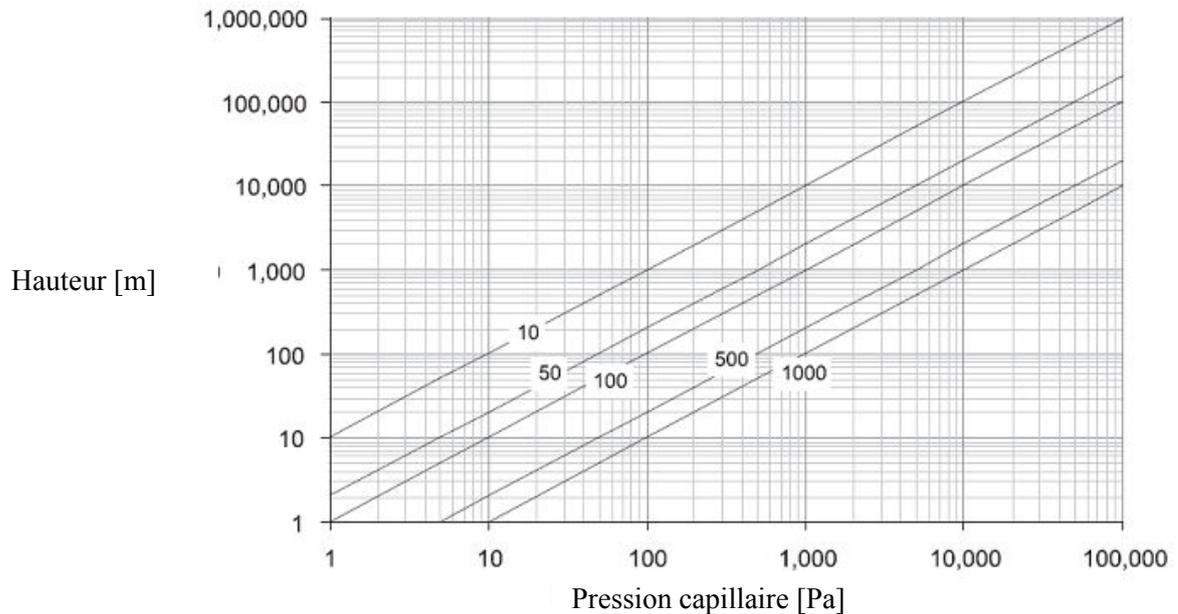


Figure 35: Hauteur des colonnes d'hydrocarbures en fonction de la pression capillaire et de la différence de densités entre les hydrocarbures et l'eau (exprimée en kg.m^{-3}) (Carruthers, 2003).

Comme nous venons de le voir il existe plusieurs positions d'observation de la migration du pétrole. Nous allons dans la suite présenter les mécanismes intervenant au cours ce phénomène.

III.5 Mécanisme de la migration

Il existe plusieurs modèles de migration pour différentes échelles considérées. Cependant la migration est principalement gouvernée par les phénomènes de flottabilité et de capillarité. La capillarité peut être caractérisée dans un milieu grâce à la pression capillaire. La pression capillaire dépend elle-même de deux paramètres : la tension inter faciale et la mouillabilité.

III.5.1 Tension interfaciale

Lorsque deux phases fluides sont mises en présence, elles sont généralement séparées par une mince couche. Dans cette couche, les propriétés thermodynamiques du

système varie très rapidement mais de manière continue. On considère du point de vue mécanique que les deux fluides sont séparés par une membrane sans épaisseur et uniformément tendue. L'excès de tension dû à la répartition dissymétrique de matière dans la couche est appelée tension interfaciale. On la note γ , elle peut également être définie comme le travail requis par unité de surface pour agrandir l'interface entre deux fluides immiscibles. Cette grandeur s'exprime en N/m ou dynes/cm. Le tableau 7 donne quelques exemples de valeurs de tension interfaciale pour des couples de fluides usuels.

Tableau 7: Exemples de tension interfaciale. (Pegaz-Fiornet, 2011)

Fluides	Conditions	Tension interfaciale (dynes/cm)
eau/air	Ambiantes	72
mercure/air	Ambiantes	480
huile/eau	Réservoir	15 à 40
huile/gaz	Réservoir	0 à 15
gaz/eau	Réservoir	35 à 60

III.5.2 la mouillabilité

On peut définir la mouillabilité comme la tendance d'un fluide à s'étaler ou à adhérer sur une surface solide en présence d'autres fluides immiscibles. Elle correspond également au travail nécessaire pour séparer un fluide mouillant d'un solide, elle est exprimée mathématiquement par un angle θ qui est l'angle de contact de l'interface entre deux fluides immiscibles (huile et eau) (Figure 36).

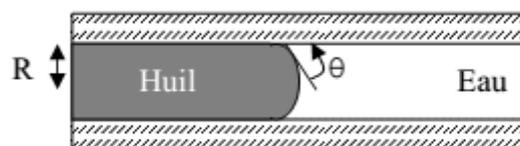


Figure 36: Angle de contact θ de l'interface huile/eau. (Pegaz-Fiornet, 2011)

III.5.3 Pression capillaire

Dans un système idéalisé, comme un tube cylindrique à l'intérieur duquel deux fluides immiscibles sont en contact, on observe une différence de pression de part et d'autre de l'interface séparant les deux fluides. Cette différence est appelée pression capillaire, la pression

du fluide non mouillant étant supérieure à celle du fluide mouillant. La pression capillaire s'exprime en Pa ou en bars.

$$P_c = P_{nm} - P_m$$

où

P_c est la pression capillaire,

P_{nm} la pression du fluide non mouillant,

P_m la pression du fluide mouillant.

La pression capillaire dépend du rayon du tube R , de la tension interfaciale γ caractérisant les deux fluides, et de l'angle de contact θ caractérisant l'affinité du solide avec le fluide mouillant, de la manière suivante :

$$P_c = \frac{2\gamma\cos\theta}{R} \quad (1.5)$$

où,

γ est la tension interfaciale,

θ est l'angle de mouillabilité,

R est le rayon du tube.

Puisque un milieu poreux naturel est généralement plus complexe qu'un simple tube, il peut être assimilé à un réseau de capillaires. La pression capillaire dans ce cas dépend alors aussi du rayon moyen R des pores, de la tension interfaciale et d'un angle de mouillabilité θ moyenné (Purcell, 1949 ; Schowalter, 1979). Le déplacement d'un fluide par un autre peut se faire soit en mode drainage, où le fluide non mouillant déplace le fluide mouillant, soit en mode imbibition ; dans le cas du couple eau/huile, l'eau déplace l'huile. Pour mesurer la pression capillaire d'une roche, une première technique consiste à estimer le rayon de pore, à l'aide de différentes méthodes (lame mince, microscope électronique) mais ces dernières ne sont pas adaptées aux roches de faible porosité. C'est pourquoi, on utilise d'autres techniques en laboratoire. Nous détaillons uniquement les mesures en mode drainage car c'est le seul utilisé en modélisation de bassin sédimentaire. En laboratoire, la mesure de pression capillaire en drainage est effectuée par augmentation de la pression du fluide non mouillant par rapport à celle du fluide mouillant. Il existe différentes procédures expérimentales :

- l'injection de mercure, dont le principe est d'injecter du mercure (fluide non mouillant) dans un échantillon de roche carotté sous une pression augmentant progressivement;

- la centrifugation, qui utilise la différence de densité entre deux fluides pour créer un déplacement dans un milieu poreux en rotation.

Le tableau (8) donne les pressions capillaires au mercure obtenues après une expérience d'injection de mercure sur différents échantillons de roches.

Tableau 8: Pressions capillaires au mercure pour plusieurs échantillons de roche. (Schowalter, 1979).

Lithologie	Porosité (%)	Perméabilité (mD)	Pression capillaire au mercure (Mpa)
Sable et argile interstratifiés	7.0	0.64	9.30
	5.4	0.36	9.30
	6.8	0.56	7.92
	6.2	0.22	5.51
Grès cimentés	5.4	0.12	1.65
	5.6	0.16	1.31
Craie	18.5	2.32	1.17
	21.4	2.00	0.89
	17.3	0.46	1.10
	24.5	5.66	0.55
Grès	17.9	0.32	1.72
	18.2	0.42	1.65
	17.9	0.31	1.65
	18.1	0.53	1.31

Les pressions capillaires hydrocarbures/eau sont déduites des pressions capillaires au mercure à l'aide de l'équation suivante (Purcell, 1949) :

$$P_{c_{hw}} = \frac{\gamma_{hw} \cos(\theta_{hw})}{\gamma_{ma} \cos(\theta_{ma})} P_{c_{ma}} \quad (1.6)$$

où :

$P_{c_{hw}}$ et $P_{c_{ma}}$ sont respectivement les pressions capillaires hydrocarbures/eau et mercure/air,

γ_{hw} et γ_{ma} sont respectivement les tensions interfaciales hydrocarbures/eau et mercure/air,

θ_{hw} et θ_{ma} sont respectivement les angles de contact de la roche avec hydrocarbures/eau et mercure/air.

Maintenant que nous avons pu voir les mécanismes intervenant dans la migration du pétrole, nous allons établir une équation physique de description de ce phénomène.

III.6 Modélisation physique du processus de migration des pétroles

III.6.1 Caractéristiques physiques des roches et du pétrole

III.6.1.1 Caractéristiques physiques des roches

a) La porosité

Un des paramètres très important dans l'étude de la diffusion est La porosité. C'est le pourcentage d'une roche ou de sédiments constitués d'espaces vides ou d'ouvertures. Elle est d'une importance cruciale pour les individus intervenant dans le secteur du pétrole ; car une couche de roche sédimentaire est un bon réservoir de pétrole si elle présente une porosité suffisante pour retenir le pétrole. Un milieu poreux est ainsi caractérisé par : sa porosité ϕ , sa perméabilité, son aire spécifique, la forme de ses pores et sa connectivité, c'est-à-dire le nombre moyen de liens ou canaux entre les pores. Certains chercheurs ont établi des relations entre la perméabilité et la porosité (*Jun Feng Wang, 2008*). La porosité ϕ représente la proportion relative volumique des pores dans le matériau ; elle est définie par la relation suivante :

$$\phi = \frac{V_{\text{pores}}}{V_{\text{pores}} + V_{\text{matrice}}} \quad (1.7)$$

b) La perméabilité

La perméabilité désigne la capacité d'une roche à laisser passer les fluides à travers ses pores et ses fractures. Il s'agit d'une indication du niveau d'interconnexion des ouvertures d'une roche. Il s'agit également d'un paramètre très important dans les gisements de pétrole car une roche sédimentaire pour être un bon réservoir doit avoir une bonne perméabilité pour permettre au pétrole de s'écouler vers les puits. Dans un milieu il est caractérisé par un coefficient de perméabilité intrinsèque note κ et un coefficient de perméabilité ou conductivité hydraulique K et on a :

$$K = \frac{\kappa}{\eta} \rho g \quad (1.8)$$

Le tableau (9) suivant nous renseigne sur quelques valeurs de la perméabilité en fonction de la roche considéré (*Zimmerman, 2003*).

Tableau 9 : les différentes valeurs de la perméabilité pour différents types de roche (Zimmerman, 2003)

Rock Type	k (Darcies)	k (m ²)
Coarse gravel	$10^3 - 10^4$	$10^{-9} - 10^{-8}$
Sands, gravels	$10^0 - 10^3$	$10^{-12} - 10^{-9}$
Fine sand, silt	$10^{-4} - 10^0$	$10^{-16} - 10^{-12}$
Clay, shales	$10^{-9} - 10^{-6}$	$10^{-21} - 10^{-18}$
Limestones	$10^0 - 10^2$	$10^{-12} - 10^{-10}$
Sandstones	$10^{-5} - 10^1$	$10^{-17} - 10^{-11}$
Weathered chalk	$10^0 - 10^2$	$10^{-12} - 10^{-10}$
Unweathered chalk	$10^{-9} - 10^{-1}$	$10^{-21} - 10^{-13}$
Granite, gneiss	$10^{-8} - 10^{-4}$	$10^{-20} - 10^{-16}$

c) La compressibilité des roches

La **compressibilité** est une caractéristique d'un corps quantifiant sa variation relative de volume sous l'effet d'une pression appliquée. Sous l'effet d'une compression les corps ont tendance à s'échauffer. On définit donc une compressibilité isotherme, pour un corps restant à température constante, et une compressibilité isentropique (ou adiabatique), pour un corps restant à entropie constante. Les deux coefficients ainsi définis sont reliés aux capacités thermiques du corps par la relation de Reech. La compressibilité des gaz est très élevée, elle est faible pour les liquides et très faible pour les solides usuels.

Tableau 10: valeurs du coefficient de compressibilité pour certains matériaux et fluide

Rock (or fluid) Type	c (1 /Pa)
Clay	$10^{-6} - 10^{-8}$
Sand	$10^{-7} - 10^{-9}$
Gravel	$10^{-8} - 10^{-10}$
Intact rock	$10^{-9} - 10^{-11}$
Jointed rock	$10^{-10} - 10^{-12}$
Water	5×10^{-10}
Oil	10^{-9}

Le coefficient de compressibilité isotherme, que l'on note va noter ici c_f est défini par la relation :

$$\left. \begin{aligned} c_f &= -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} \\ \text{ou encore, en fonction de la masse volumique :} \\ c_f &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right) T \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

III.6.1.2 Caractéristiques physiques des pétroles

a) La densité

La densité ou masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. Elle s'exprime en kg.m^{-3} . La densité d'une phase hydrocarbure dépend de la pression, de la température et de sa composition. Il existe différentes méthodes de calcul : à partir du GOR (gas/oil ratio) pour la densité de l'huile, à partir du CGR (condensate/gas ratio) pour la densité des gaz (England et al., 1987), avec la méthode de Standing-Katz (1942) ou encore à partir de celle d'Alani-Kennedy (1960). La densité de l'eau, dépend, elle, de la pression, de la température et de la salinité (Schowalter, 1979).

b) La viscosité

La viscosité d'un fluide est définie comme la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière. La viscosité dynamique correspond à la contrainte de cisaillement qui accompagne l'existence d'un gradient de vitesse d'écoulement dans la matière. Elle s'exprime en Pa.s, en poiseuille (avec $1 \text{ Pl} = 1 \text{ Pa.s}$) ou bien encore en poise (avec $1 \text{ Po} = 0,1 \text{ Pl} = 0,1 \text{ Pa.s}$).

La viscosité est due aux forces attractives entre les molécules. Lorsqu'elle augmente, la capacité du fluide à s'écouler diminue. Pour un liquide, la viscosité tend à diminuer lorsque la température augmente. La viscosité dépend généralement de la température et de la composition de la phase mais elle peut aussi dépendre de la pression. De façon général le gaz est beaucoup moins visqueux que l'eau et l'huile. Ce contraste favorise la migration du gaz par rapport à celle de l'huile (Ungerer et al., 1990).

III.6.2 Diffusion et loi d'écoulement

III.6.2.1 La diffusion

Le déplacement des atomes, ions ou molécules dans un milieu, que celui-ci soit solide (cristallin ou amorphe), liquide ou gazeux, est appelé de manière générale migration. Au sens

large la diffusion désigne des transferts obéissants aux lois de Fick (*Adolf Fick, 1855*), c'est-à-dire dont la résultante macroscopique vérifie l'équation de diffusion. Elle intervient par exemple dans des procédés d'amélioration des caractéristiques mécaniques (traitements de surface comme la nitruration ou cémentation), la résistance à la corrosion et les procédés d'assemblage par brassage. Suivant les domaines considérés il existe plusieurs types de diffusion :

En chimie nous avons la diffusion chimique : elle désigne la tendance naturelle d'un système à rendre uniforme le potentiel chimique de chacune des espèces chimiques qu'il comporte ; c'est un phénomène de transport irréversible qui se traduit par la migration d'espèces chimiques dans un milieu. Sous l'effet de l'agitation thermique, on observe un déplacement des constituants liés aux gradients de concentration, de température et de pression.

En physique, la diffusion désigne deux phénomènes distincts.

- Diffusion ou diffraction des ondes, propagation des ondes (notamment de la lumière) lorsque celles-ci rencontrent un obstacle. Des exemples dans ce domaine sont la diffusion des particules : interaction entre deux particules lorsque l'une est projetée sur l'autre ;
- La diffusion caractérisée par une équation de diffusion avec une dérivée première en temps. Les domaines d'application dans ce cas sont nombreux. Nous pouvons citer
 - Conduction thermique, transfert de chaleur entre deux régions d'un même milieu ou entre deux milieux en contact sans déplacement appréciable de matière ;
 - Frottement fluide, diffusion de quantité de mouvement ;
 - Diffusion de la matière, migration d'espèces chimiques dans un milieu ;

Ce dernier cas fera l'objet de notre étude tout au long de ce travail au cours duquel nous essayerons de comprendre comment ce phénomène se produit dans le cas du pétrole.

Au cours des années les travaux liés à la diffusion de la matière ont été portés par deux savants à savoir Adolf Fick et Henry Darcy.

Adolf Fick énonça en 1855 une loi par analogie avec l'équation de la chaleur introduite par Joseph Fourier en 1822 (*Joseph Fourier, 1822*). Cette loi établit une relation entre le flux et le gradient d'une quantité et permet d'expliquer la conduction thermique, le rayonnement dans un milieu opaque, la perméation et bien d'autres phénomènes.

Henry Darcy a établi en 1856 la loi qui porte son nom, après qu'il eut réalisé diverses expérimentations visant à déterminer les lois régissant l'écoulement de l'eau à travers le sable. Cette loi expérimentale de Darcy ou loi de Darcy est une loi physique qui exprime le débit d'un

fluide incompressible filtrant au travers d'un milieu poreux supposé isotrope à l'échelle de travail. La circulation de ce fluide entre deux points est déterminée par la conductivité hydraulique ou le coefficient de perméabilité du substrat et par le gradient de pression du fluide. Dans le cas d'un cours d'eau ou d'un réservoir alimentant une nappe, ce gradient est lié à la hauteur de l'eau. La seconde moitié du XX^e siècle verra se développer les méthodes de changement d'échelle permettant d'écrire des lois macroscopiques à partir de la description du milieu à petite échelle.

De ce qui précède nous pouvons dire qu'il existe un lien entre la loi de Fick et la loi de Darcy. Ce lien réside au niveau de l'échelle de travail et du type de substrat considéré.

III.6.2.2 Les lois de Fick

Elles sont au nombre de deux

a) Première loi de Fick

Elle énonce que : « le flux de diffusion est proportionnel au gradient de concentration. » Cette loi est inspirée de la loi de Fourier sur la conduction de la chaleur. Elle peut être vue comme une définition du « vecteur densité de courant » qui vérifie la seconde loi de Fick, en ce sens qu'elle *ne contient pas la physique* du phénomène de diffusion.

Mathématiquement, cette loi s'exprime de la manière suivante :

- soit un milieu B dans lequel se trouve une espèce chimique A ,
- soit une surface S ;
- soit $C_A(x, y, z, t)$ la concentration de A en un point donné ;
- on appelle \vec{J}_A (molécule $s^{-1}m^{-2}$) le vecteur densité de courant de particules » des particules de A ;
- la première loi de Fick s'écrit :

$$\vec{J}_A = -D_{AB} \cdot \overrightarrow{grad} C_A \quad (1.10)$$

Elle est également notée, avec l'opérateur nabla :

$$\vec{J}_A = -D_{AB} \cdot \vec{\nabla} C_A \quad (1.11)$$

La grandeur D_{AB} est le coefficient de diffusion de A dans le milieu B considéré ; il dépend de la température, du milieu et de A .

Ce vecteur donne accès au flux de particules de A à travers une surface S quelconque, c'est-à-dire le nombre de particules de A traversant cette surface par unité de temps : si on note φ_A ce flux, on a

$$\varphi_A = \iint_S j_A \cdot d\vec{S} \quad (1.12)$$

Cette formule représente la première loi de Fick.

b) Seconde loi de Fick

Elle est encore appelée loi de conservation des espèces. Elle stipule que l'opposé de la variation par unité de temps de la quantité de particules i dans un volume donné V est égale au flux sortant du vecteur densité de courant de particules \vec{j}_i à travers la surface fermée S délimitant le volume V . On obtient ainsi en utilisant le théorème de Green-Ostrogradsky l'équation suivante.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V C_i \cdot dV = \iint_S j_A \cdot d\vec{S} = \iiint_V \text{div} \vec{j}_i \cdot dv \quad (1.13)$$

Soit :

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_i = 0 \quad (1.14)$$

À une dimension, l'équation devient :

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial j_i}{\partial x} = 0 \quad (1.15)$$

Nous obtenons ainsi la deuxième loi de Fick connue encore sous le nom d'équation de conservation de la masse.

c) Loi de Darcy

Il existe plusieurs lois d'écoulement cependant celle que nous utiliserons sera celle de Darcy. La loi de Darcy telle qu'elle a été formulée par Henry Darcy en 1856 dans l'appendice

D de son célèbre ouvrage Les Fontaines publiques de la ville de Dijon, exprime le débit Q d'un fluide incompressible qui s'écoule en régime stationnaire au travers d'un milieu poreux de section A et de longueur L sous l'effet d'une différence de charge ΔH .

$$Q = KA \frac{\Delta H}{L} \quad (1.16)$$

avec :

- Q : le débit volumique (m^3/s) filtrant.
- K : la conductivité hydraulique ou « coefficient de perméabilité » du milieu poreux (m/s), qui dépend à la fois des propriétés du milieu poreux et de la viscosité du fluide.
- A : la surface de la section étudiée (m^2)
- $\Delta H/L$: Le gradient hydraulique ($i = \Delta H/L$), où ΔH est la différence des hauteurs piézométriques en amont et en aval de l'échantillon, L est la longueur de l'échantillon.

Initialement globale (valable pour un milieu poreux homogène et un écoulement uniforme), la formulation de la loi de Darcy devint rapidement locale, généralisée à des écoulements tridimensionnels et à des milieux non saturés. Pour un milieu non saturé, la conductivité dépend de la teneur en eau. La loi de Darcy devient :

$$\vec{q} = K(h)\vec{\nabla}H \quad (1.17)$$

où

- $\vec{\nabla}H$ Représente la charge totale ou potentiel total de l'eau par unité de poids ($m=J/N$). La charge totale est égale à la somme des charges matricielles et gravitationnelles
- $K(h)$ est un tenseur donnant la conductivité hydraulique du milieu poreux en fonction de la charge matricielle;
- \vec{q} est la vitesse de Darcy ou de filtration (vecteur flux volumique de fluide) ($m^3/m^2/s=m/s$).

La résolution locale de la loi de Darcy la rend applicable à des corps poreux hétérogènes et à des écoulements non uniformes.

III.6.3 Equation de diffusion

Nous nous proposons de ressortir les équations traduisant la diffusion du pétrole au travers des médias en fonction de la densité du fluide ρ . Pour ce faire nous avons besoin de :

- Equation de continuité :

$$\frac{\partial \phi \rho}{\partial t} = - \operatorname{div} \rho v \quad (1.18)$$

- Loi de compressibilité isotherme qui établit un lien entre la pression du fluide et la variation du volume :

$$c = - \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right) T \quad (1.19)$$

L'intégration de cette équation nous donne :

$$\rho = \rho_0 e^{[C(P-P_0)]} \quad (1.20)$$

En faisant un développement limité de Taylor on obtient :

$$\rho = \rho_0 \left[1 + c(p - p_0) + \frac{1}{2} c(p - p_0)^2 + \varepsilon \right] \quad (1.21)$$

Le tableau 11 ci-dessous nous permet de voir comment varie le coefficient de compressibilité isotherme en fonction la matière considérée. Nous constatons d'après ce graphe que ce coefficient augmente avec la densité ρ du matériau considéré.

- Une loi d'écoulement : il s'agit d'une fonction qui exprime la vitesse d'écoulement en fonction des variations de pression dans le milieu considéré.

Nous utilisons ici le model de Darcy dans lequel la loi d'écoulement utilisée est la loi fondamentale de Darcy donnée par la formule (1.16). En substituant (1.16) dans (1.18) il vient que :

$$\frac{\partial \phi \rho}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (1.22)$$

Par ailleurs en dérivant l'équation (1.21) par la variable x on obtient :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{\rho_{0C}} \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (1.23)$$

Lorsque nous substituons l'expression de la variation de pression (1.22) dans l'équation (1.23) on obtient :

$$\phi \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{\mu C \rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \rho \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) \quad (1.24)$$

Cette équation représente la forme générale de l'équation de diffusion en fonction de la densité. Examinons cette équation dans les deux cas suivants.

a) Cas où k est constant

En considérant le cas où la perméabilité dans le milieu est constante on obtient l'équation suivante

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{k}{2\phi\mu C\rho_0} \frac{\partial^2 \rho^2}{\partial x^2} \quad (1.25)$$

C'est le modèle le plus simple de diffusion. Cette équation peut être résolue analytiquement.

b) Cas où k varie

Nous considérons dans ce cas que nous sommes dans un milieu où la perméabilité k du milieu considéré dépend de la densité du fluide qui circule à l'intérieur. Supposons que k est une fonction linéaire de la densité (Greer, 2016).

$$k = a\rho + b \quad (1.26)$$

Les constantes a et b sont approximées par les valeurs suivantes :

$$a = 3,5 \cdot 10^{-8} \quad (1.27)$$

$$b = 5,1 \cdot 10^{-7} \quad (1.28)$$

L'équation à résoudre devient

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{2\phi\mu C\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \left[(a\rho + b) \frac{\partial}{\partial x} (\rho^2) \right] \quad (1.29)$$

x ici mesure la hauteur de pénétration du pétrole dans le sol. Ce modèle simule l'écoulement du pétrole dans le sol. Nous constatons d'après cette équation qu'il sera difficile voire même impossible d'apporter une solution analytique à cette équation de diffusion, car c'est une équation différentielle fortement non linéaire.

III.6.4 Forme adimensionnée des équations

L'adimensionnement est la suppression partielle ou totale des unités d'une équation par une substitution appropriée de variables, dans le but de simplifier la représentation paramétrique du problème physique.

Il s'agit d'une étape particulièrement importante dans la phase de résolution numérique des équations que nous avons obtenues. Cette étape a pour but de réduire les temps de simulation. Pour y arriver on ramène les valeurs des différentes variables présentes dans l'équation à résoudre à des valeurs minimales comprises le plus souvent entre 1 et 0,1.

Forme adimensionnée de l'équation de diffusion avec k constant

Pour cette équation nous allons poser :

$$\begin{cases} \rho = \rho_1 \bar{\rho} \\ t = t_0 \bar{t} \\ x = x_0 \bar{x} \end{cases} \quad (1.30)$$

En substituant les expressions de (1.30) dans (1.25) on obtient l'équation adimensionnée suivante

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \bar{t}} = A \frac{\partial^2 \bar{\rho}^2}{\partial \bar{x}^2} \quad (1.31)$$

Avec :

$$A = \frac{t_0 \rho_1 k}{2x_0^2 \phi \mu C \rho_0} \quad (1.32)$$

Le principe de cette équation veut que nous considérons un pétrole avec une densité initiale ρ_0 qui migré vers la surface de la terre à partir de l'instant initial et de voir comment cette densité évolue en fonction du temps et de la distance parcourue.

forme adimensionnée de l'équation de diffusion pour k différent d'une constante

Nous utilisons ici les mêmes transformations de l'équation (1.30), auxquelles nous ajoutons :

$$\begin{cases} a = a_0 \bar{a} \\ b = b_0 \bar{b} \end{cases} \quad (1.33)$$

On obtient l'équation adimensionnée sous la forme :

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \bar{t}} = B \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left[(C \bar{a} \bar{\rho} + b_0 \bar{b}) \frac{\partial \bar{\rho}^2}{\partial \bar{x}} \right] \quad (1.34)$$

Avec :

$$\begin{cases} B = \frac{t_0 \rho_1}{2x_0^2 \phi \mu C \rho_0} \\ C = a_0 \rho_1 \end{cases} \quad (1.35)$$

III.6.5 Condition et hypothèse de la modélisation

Afin de pouvoir résoudre l'équation différentielle de diffusion du pétrole, un ensemble des conditions et hypothèses sont nécessaires. Les conditions initiales et des conditions aux limites concernant le domaine spatial qui doit être défini. Les conditions initiales précisent le domaine d'écoulement et la densité du pétrole au début de la simulation. Les conditions aux limites décrivent les interactions entre le système et la zone environnante.

Généralement, lors de la résolution des équations de transport, trois types de conditions aux limites sont utilisées : celle de Dirichlet (première espèce ; c'est-à-dire, Concentration donnée), celle de Neumann (deuxième espèce; c'est-à-dire, Flux massique nul) et celle de Cauchy (troisième espèce; c'est-à-dire, Flux cédant donné).

Pour ces travaux, le principe consiste à supposer que dans un premier temps les sols et les sous-sols sont sains et ne contiennent aucune molécule de pétrole en leur sein. Ensuite, qu'un hydrocarbure de densité initiale ρ_0 engage sa migration verticalement ($x=0$) vers la surface du sol, à l'instant initial depuis une roche réservoir ou depuis la roche mère. Notre variable principale étant la densité du pétrole dans le sol. Les équations seront donc assorties de la condition initiale :

$$\rho(x, 0) = 0 \text{ pour } 0 < x < s \quad \text{Où } s \text{ est la surface du sol}$$

Et la condition aux limites

$$\rho(0, t) = 0 \text{ pour } t > 0$$

IV. Matériel et méthode du processus de chauffage des bâtiments à partir du mazout

Dans cette seconde partie nous abordons ici le problème de l'utilisation inefficace de l'énergie. Nous limitons notre attention à la problématique du chauffage des bâtiments. Une grande partie de la consommation mondiale d'énergie est attribuée au chauffage des bâtiments pendant la période hivernale. Le chauffage des bâtiments fait référence à l'énergie nécessaire pour chauffer les bâtiments, qu'ils soient résidentiels ou dans le secteur des services, comme les écoles, les hôpitaux, les entreprises et les immeubles de bureaux

Nous analysons les effets de la teneur en humidité et de la température extérieure sur la quantité d'énergie nécessaire au chauffage des bâtiments. La piste d'un béton différent du béton normal constamment utilisé est également explorée dans cette partie. En effet, la température et la teneur en humidité sont des paramètres importants qui affectent les propriétés thermiques du béton (Taoukil D., al, 2013).

En définitive cette partie de notre travail sera organisé comme suit : nous commencerons par présenter les processus de chauffage, nous verrons le cas particulier du principe du chauffage par le mazout. Ensuite, nous verrons le mode de transfert de la chaleur dans les murs en béton. Enfin, nous parlerons des deux types de béton en particulier le béton de pierre ponce, et nous ferons la modélisation et la résolution physique du processus de chauffage des bâtiments.

IV.1 Processus de chauffage des bâtiments

Le chauffage est l'action de transmettre de l'énergie thermique à un objet, un matériau ou à l'air ambiant. On distingue le chauffage à des fins de confort thermique domestique (chauffage des locaux, chauffage de l'eau) et le chauffage à des fins industrielles (chauffage de pièces mécaniques, de processus industriels,). Le chauffage fonctionne à partir d'une source d'énergie. Les sources d'énergie peuvent être d'origine fossile (fioul, charbon, gaz naturel, GPL,), nucléaires ou renouvelables (bois énergie, énergie solaire, géothermie, barrages hydrauliques,).

Le chauffage peut être individuel ou collectif. Dans le Chauffage individuel, l'installation est pour une maison, un appartement ou un immeuble. Dans le Chauffage collectif l'installation couvre les besoins de plusieurs maisons, appartements ou immeubles.

Le chauffage peut être central ou décentralisé. On parle de chauffage central lorsque l'on chauffe plusieurs pièces d'un immeuble ou d'une maison à partir d'un seul point de cet immeuble grâce à un générateur de chaleur. Contrairement au chauffage central, dans un chauffage

décentralisé, les fonctions de génération et d'émission sont assurées conjointement au sein de chaque appareil. Il n'y a pas de fluide caloporteur, pas de réseau permettant d'acheminer ce fluide et donc pas de fonction de distribution.

Dans tous les cas le confort thermique est assuré principalement par le chauffage des locaux et volumes de vie ainsi que par le chauffage de l'eau. Le chauffage à des fins de confort est utilisé pour maintenir ou améliorer les conditions d'une ambiance agréable pour les êtres vivants, dans les espaces clos constituant les lieux de vie. Ainsi, l'objectif du chauffage est d'améliorer le confort thermique d'un espace à vivre. Pour y parvenir, un système de chauffage est nécessaire. Ce dernier consomme de l'énergie sous une forme et la restitue sous forme de chaleur.

Un système de chauffage comprend nécessairement :

- une source de chaleur : la source de chaleur se trouve nécessairement à une température supérieure à la température de l'objet, du matériau ou l'espace à chauffer
- un émetteur de chaleur : l'émetteur de chaleur permet l'échange de l'énergie thermique entre la source de chaleur et l'objet, le matériau ou l'espace à chauffer. Cet émetteur peut être statique comme un radiateur, un convecteur, un plancher chauffant ou dynamique comme un ventilo-convecteur, une centrale de traitement d'air, un aérotherme. Dans le premier cas, l'émetteur transmet sa chaleur par convection et/ou rayonnement. Dans le deuxième cas, c'est un ventilateur qui pulse l'air au travers d'une batterie chaude et qui transmet la chaleur au milieu ambiant par recyclage et mouvement d'air.

Un système de chauffage peut aussi comprendre :

- un système de stockage de la chaleur ;
- un ou plusieurs systèmes de transport de la chaleur : le transport de la chaleur est réalisé le plus souvent au moyen d'un fluide présentant une capacité calorifique élevée, appelé fluide caloporteur.

Ces systèmes de chauffage ont vu le jour à partir de la domestication du feu et ont évolué jusqu'à nos jours.

IV.2 Le mazout propriété physique et chimique

L'industrie pétrolière produit plusieurs qualités de mazout ainsi nous pouvons avoir le mazout n° 1, le mazout n° 2. Cependant une seule normalement sert au chauffage résidentiel. Il s'agit du mazout no 2, qui doit satisfaire aux normes de l'industrie et des administrations

publiques quant à sa densité, à sa viscosité, à sa teneur en soufre et à sa puissance calorifique.

Le mazout n°2 est le plus utilisé puisqu'il convient à différents types d'appareils très courants sur le marché dont tous les systèmes de chauffage central à eau chaude et à air chaud. Le mazout n°2 est combustible liquide à température ambiante et dégageant une odeur caractéristique. Ces propriétés physique et chimique sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 11 : Propriétés physique du mazout

Point de fusion	-40 à 6°C
Point d'ébullition	141 à 462°C
Point éclair	Vase clos: >40°C
Limite inférieure et supérieure d'explosion (d'inflammation)	Seuil minimal: 0,5% Seuil maximal: 5%
Densité relative	0,879
Température d'auto-inflammation	225°C (437°F)
Viscosité	Cinématique (40°C): 0,015 cm ² /s (1,5 cSt)
Chaleur de combustion	-42,8 kJ/g

IV.3 Le béton ponce

Le béton est un matériau composite aggloméré, constitué de granulats durs de diverses dimensions collées entre eux par un liant. Il est formé à partir d'un mélange d'agrégat (sable plus granulats) et de la pâte composée : de ciment, d'eau et d'adjuvant. Dans ce travail nous nous intéressons particulièrement au béton de pierre ponce.

En effet contrairement au béton classique, le béton de pierre ponce sont fait à base de pierre ponce.

La pierre ponce, est une roche volcanique très poreuse et de faible densité (masse volumique sèche environ 841 kg/m³ pour le sable et 651 kg/m³ pour le gravillon) ce qui en fait un matériau léger lui permettant de flotter à la surface de l'eau. La pierre ponce est formée à des températures de l'ordre de 500 à 600 °C. La pierre ponce est un matériau 100% naturel et recyclable qui permet de fabriquer des blocs bétons plus légers avec une meilleure résistance thermique. Elle dispose de qualités naturelles reconnues ; roche volcanique, la pierre ponce est un matériau léger d'aspect clair et uniforme, poreux, inerte, non gélif et incombustible. Elle garantit une bonne résistance thermique et une bonne isolation phonique.

La lave projetée en l'air se refroidit très vite et la chute de pression entraîne un dégazage qui forme des bulles, d'où la porosité et la faible densité de la pierre. La ville romaine de Pompéi est couverte de ponce de phonolite. la masse volumique moyenne de la pierre ponce est de 910 kg/m^3 , soit inférieure à celle de l'eau, ce qui lui permet de flotter sur l'eau.

Le béton possède deux comportements : l'état frais et l'état durci. Nous nous intéressons ici à son comportement à l'état durci. La caractérisation d'un béton peut se faire sur plusieurs plans à savoir : sa résistance à la compression, sa perméabilité sa durabilité, sa résistance à l'abrasion, sa conductivité thermique. D'une manière générale, lorsque la température augmente, la conductivité thermique du béton diminue. Ce comportement met en évidence la détérioration de la microstructure : les microfissures limitent les transferts de chaleur. La teneur e eau, le type de granulat, le type de ciment et la formulation du béton sont les principaux paramètres de cette variation. Nous allons analyser dans ce travail le comportement de ces deux bétons pendant le chauffage d'une maison afin de ressortir les avantages liés à l'utilisation de la pierre ponce.

IV.4 Les différents modes de transfert thermique

Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y'a échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes. Cette situation se rencontre dans de nombreuses situations industrielles (moteurs thermiques ou même électriques, centrales électriques au fuel au gaz, ou encore en électronique) ou domestique (chauffage de l'habitat). Un transfert d'énergie donne lieu `à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froid. Il existe trois modes essentiels de transferts de chaleur: la conduction, le rayonnement et la convection.

- La conduction :

Considérons pour l'instant un corps solide au sein duquel la température varie. L'agitation moléculaire élevée de la zone chaude communiquera de l'énergie cinétique aux zones plus froides par un phénomène appelé conduction de la chaleur. La conduction est un phénomène de diffusion qui permet donc à la chaleur (mais aussi au froid) de se propager à l'intérieur d'un corps solide. Il en est de même pour un liquide ou un gaz mais pour eux, la convection est un autre mode de transfert de chaleur possible avec un effet considérable. Notons enfin que la conduction de la chaleur n'est pas possible dans le vide puisqu'il n'y a pas de support moléculaire pour cela.

- Le rayonnement

La chaleur du soleil frappe pourtant notre planète alors qu'il n'y a aucun support solide, liquide ou gazeux au-delà de l'atmosphère terrestre. Ceci signifie donc que l'énergie thermique peut tout de même traverser le vide. Ce mode de transfert s'appelle le rayonnement. Il correspond à un flux d'ondes électromagnétiques émises par tout corps, quelle que soit sa température. Comme on l'imagine, le rayonnement électromagnétique est d'autant plus élevé que sa température est grande. Comme pour la conduction, ce sont les interactions entre atomes et molécules qui sont à l'origine de ce rayonnement. Elles peuvent le générer, ce qui diminue leur énergie, ou encore l'absorber, ce qui l'augmente. De par sa nature, le rayonnement n'intervient que dans les milieux transparents (gaz, verre, vide) ou semi-opaque (gaz + fumées de CO₂, gaz + vapeur d'eau).

- La convection

Un débit ou une circulation de liquide ou de gaz peut transporter avec lui une certaine quantité d'énergie thermique. Ce transport de chaleur porte le nom de convection thermique. Ce transport de l'énergie par un écoulement est analogue au transport d'autres quantités scalaires (non vectorielles): transport d'une concentration de sel par de l'eau, transport de l'humidité par l'air et bien d'autre. On retiendra donc que dans la convection, la chaleur se sert du fluide comme véhicule pour se déplacer. Il existe deux types de transferts convectifs :

- ✓ La convection forcée dans laquelle l'écoulement du fluide est forcé par un dispositif mécanique quelconque (pompe ou gravité pour un liquide, ventilateur pour de l'air) ;
- ✓ La convection naturelle : lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un fluide, le fluide chaud, qui aura une masse volumique plus faible que le fluide froid aura tendance à monter sous l'effet de la poussée d'Archimède. Il y aura ainsi circulation naturelle du fluide sous l'effet de la chaleur qui, par ailleurs, sera transportée avec lui: on parle de convection naturelle.

Si l'on prend l'exemple d'un chauffage domestique, l'eau chaude qui arrive dans les radiateurs circule par convection forcée, entretenue par le circulateur (petite pompe située dans la chaufferie) tandis que l'air des pièces de la maison circule par convection naturelle depuis le radiateur autour duquel il s'échauffe jusqu'au plafond vers lequel il s'élève avant de redescendre pour former un circuit fermé.

Dans beaucoup de situations, il y a coexistence de 2 ou même 3 des modes de transferts thermiques décrits précédemment (voir figure 37). Fort heureusement, il est fréquent qu'un mode soit prépondérant et simplifie l'analyse. Dans ce travail effectivement nous considérons uniquement le mode transfert de chaleur par conduction. Les autres modes transfert sont négligeables.

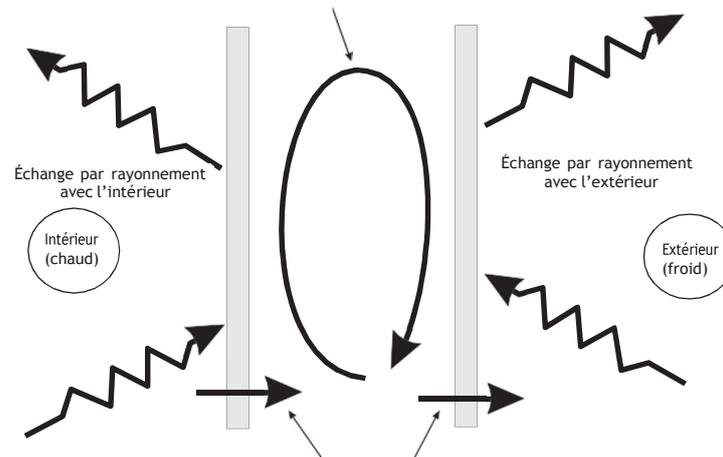


Figure 37: Exemple illustrant les différents types de transferts de chaleur. (Philippe Marty, 2013)

IV.5 Modélisation physique

La formulation mathématique du transfert de masse au niveau macroscopique dans les milieux poreux est généralement basée sur des équations de diffusion. Celles-ci ont d'abord été établies par Philip et de Vries (1957). Plus tard, une base plus fondamentale pour ces équations a été donnée par Whitaker (1977) et Bear et Bachmat (1990). Dans le contexte de la physique du bâtiment également, on considère que le transport de liquide dans les matériaux de construction est basé sur un phénomène de diffusion. En supposant qu'il n'y a pas de génération ou d'absorption de l'humidité par le système, l'équation non linéaire du transport de l'humidité dans un tel milieu poreux est donnée comme suit

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \nabla \cdot [D_{\omega} \nabla \omega] \quad (2.1)$$

Où, ω représente la teneur en humidité, D_{ω} est la diffusivité de l'humidité et t , la durée du processus (Carmeliet J. et al 2007 ; Simo E. et al, 2017). Le coefficient de diffusivité est un paramètre clé qui mesure la vitesse de pénétration de l'humidité dans le mur. Une fois que la surface d'imbibition du mur est entièrement humide, un processus capillaire d'aspiration a lieu. Dans ce travail, le coefficient de diffusivité n'est pas considéré comme une entité constante, et l'équation suivante est utilisée (Kunzel H., 1986) :

$$D_{\omega} = 3.8 \left(\frac{A}{\omega_f} \right)^2 1000^{\frac{\omega}{\omega_f} - 1} \quad (2.2)$$

Ici, le paramètre A représente le coefficient de sorption, ω_f représente la teneur en humidité à la saturation capillaire. Dans les conditions d'utilisation quotidienne, le béton ne peut pas être considéré comme étant à l'abri de l'humidité. Les caractéristiques physiques du béton sont modifiées par la présence durable d'humidité. C'est précisément le cas du coefficient de conductivité thermique, comme nous l'avons mentionné précédemment, qui doit être corrigé dans de telles circonstances. Cammerer et ses collègues (Cammerer J., 1985) ont démontré que le coefficient de conductivité thermique est naturellement dépendant de l'humidité. L'expression de celle-ci étant donnée comme suit

$$\lambda_{\omega} = \lambda_0 \left[1 + \frac{b\omega}{\rho_x} \right] \quad (2.3)$$

λ_{ω} est la conductivité thermique du matériau humide ; λ_0 se réfère à la conductivité thermique du matériau de construction sec et à ρ_s la densité apparente du matériau de construction sec. Le paramètre b représente le supplément de conductivité thermique. Ce dernier indique de combien de pour cent le coefficient de conductivité thermique augmente le pourcentage de masse d'humidité (Kunzel H., 1986). La conductivité thermique reflète la capacité du béton à transférer la chaleur. Des valeurs extrêmement basses de ce coefficient sont liées à une bonne isolation des matériaux de construction. En ce sens, les économies d'énergie sont optimales car la perte d'énergie est négligeable. La conduction thermique dans le matériau est décrite par la loi de Fourier et est donnée par :

$$\varphi = -\lambda_{\omega} \nabla T \quad (2.4)$$

Dans cette notation, φ représente la densité du flux thermique local et T la température du béton. Nous pouvons maintenant déduire de cette relation (2.4) la puissance fournie pour le chauffage du bâtiment :

$$\Phi = \frac{\lambda_{\omega} S (T_i - T_e)}{L} \quad (2.5)$$

Ici, Φ représente la puissance fournie pour le chauffage, S est la section du mur, L est l'épaisseur du mur ; T_i est la température sur la face intérieure du mur ; T_e est la température sur la face extérieure du mur. Ainsi, la température du mur du bâtiment à la position x sur une surface altérée est donnée par :

$$T_x = T_e + \frac{x\Phi}{\lambda_\omega} \quad (2.6)$$

Le point clé à souligner dans ce travail est que la conductivité thermique du béton dépend de l'humidité. Ainsi, quel sera l'impact de l'humidité dans le processus de chauffage du bâtiment ? Nous abordons cette question en termes de quantité d'énergie dépensée pour le chauffage. Chaque valeur calculée de la teneur en humidité, ω est associée à la conductivité thermique exprimée par la formule (2.6) ci-dessus. Notons qu'un pic de consommation d'énergie est observé dans les ménages et dans les autres bâtiments pendant la période hivernale pour les besoins de chauffage.

Par ailleurs comme on peut le constater, la solution analytique du traitement de ce modèle est difficile du fait que l'équation de diffusion non linéaire (2.1) régissant notre système n'a pas de solution analytique évidente. Ceci étant nous avons opté pour un calcul numérique. Ces équations pourraient être résolues par calcul en utilisant des méthodes d'analyse numérique. Il convient de rappeler que seule une analyse numérique assez stable peut conduire à des solutions physiquement acceptables. Une méthode numérique est dite stable si les erreurs numériques, par exemple celles générées par l'arrondi, ne sont pas amplifiées, et que la solution approchée reste bornée. Il est intéressant de noter que la notion de stabilité met en évidence la relation entre la solution exacte du problème discret et la solution effectivement calculée qui inclut les erreurs d'arrondi et d'itération.

De nos jours, tous les outils mathématiques nécessaires à l'étude de la stabilité sont disponibles dans le cas des problèmes linéaires à coefficients constants. La technique la plus populaire est, sans conteste, la célèbre méthode de Von Neumann (Crank J. et al 1947; Charney J. et al 1950; Hairer E. et al 1987). D'autre part, les problèmes non linéaires sont plus difficiles à analyser et peuvent nécessiter une forme de stabilité plus forte. Il est donc important de résoudre ce problème en utilisant une technique appropriée. Dans ce sens, la méthode Runge Kutta utilisant DOPRI5 comme intégrateur (Atkinson K.A., 1998 ; Schatzman M., 2002) est introduite pour décrire avec précision la diffusion non linéaire de l'humidité dans les matériaux de construction poreux tels que le béton. La base de la méthode est de discrétiser la partie spatiale de l'opérateur et de garder la partie temporelle telle quelle. Cette approche permet d'augmenter la précision de l'approximation dans le temps et dans l'espace indépendamment et facilement. Nous choisissons l'approximation des volumes finis pour la discrétisation spatiale où l'opérateur est intégré sur les volumes de référence. Comme méthode numérique pour les équations différentielles, nous utilisons la méthode Runge-Kutta d'ordres 4-5 introduite par

Dormand et Prince (Dormand-Prince Method, 1986) qui a été implémentée comme code Fortran par Hairer et Norsett . Ce solveur nous permet de contrôler l'erreur locale en variant le pas de temps. Avec l'entrée des données nécessaires, le modèle calcule la teneur en humidité résultante et la puissance fournie pour le chauffage.

IV.6 Paramètre du système

Le tableau (12) ci-dessous représente les données d'entrée utilisées pour le processus de calcul selon Kunzel et Cammerer (Kunzel H. 1986 ; Cammerer J. 1985). Nos recherches numériques se sont concentrées sur deux types différents de béton comme matériau de construction, à savoir le béton normal et le béton de pierre ponce.

Tableau 12: Données d'entrée relatives aux différents types de béton

Type de béton	densité de masse	conductivité thermique [$W/m.K$]	supplément d'humidité [%]	saturation en eau libre	coefficient d'absorption d'eau
Béton normal	2300	1.40	8	128	0.228
Béton ponce	1550	0.70	4	277	0.166

V. Technique numérique

Il est question pour nous dans cette partie de présenter la méthode que nous avons utilisée pour nos calculs. Ainsi dans le souci d'avoir des résultats aussi précis que possible nous nous sommes proposé d'utiliser comme nous l'avons dit plus haut la méthode de Runge Kutta d'ordre 4-5. Le langage de programmation utilisé est le fortran, l'intégrateur étant le code DOPPRIS 5.

V.1 Runge Kutta d'ordre 4

La méthode de Runge Kutta d'ordre 4 contrairement à la méthode de Runge Kutta d'ordre 2 est une méthode de calcul qui tente de fournir une meilleure estimation à l'aide d'une moyenne de 4 estimations, ce principe est schématisé sur la figure (38). Elle est utilisée dans la résolution numérique des équations différentielles ordinaires du premier ordre qui sont de type :

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = f(t, y(t)), & 0 \leq t \leq T \\ y(0) = y_0 \end{cases} \quad (3.1)$$

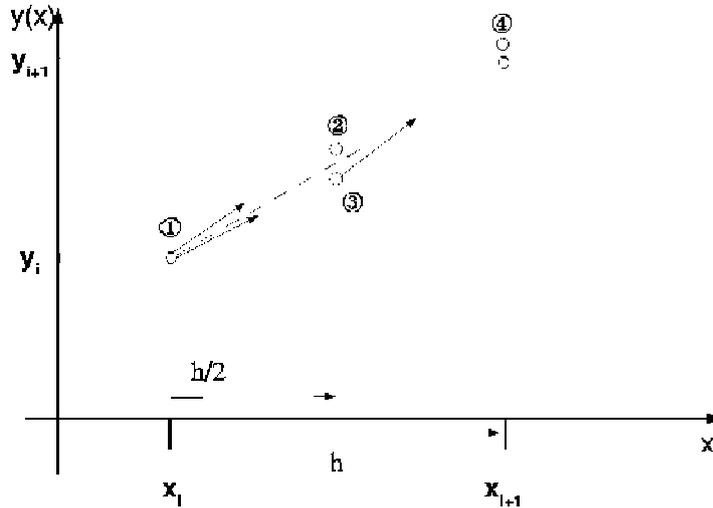


Figure 38: Méthode Runge Kutta d'ordre 4

Cette méthode de calcul trouve son fondement dans la formule d'intégration de Simpson donnée par l'expression suivante :

$$p(x) = f(a) \frac{(x-m)(x-b)}{(a-m)(a-b)} + f(m) \frac{(x-a)(x-b)}{(m-a)(m-b)} + f(b) \frac{(x-a)(x-b)}{(b-a)(b-m)} \quad (3.2)$$

Nous pouvons remplacer $f(t, y(t))$ par un polynôme du second degré (parabole) qui passe par les points extrêmes (t_n, y_n) , (t_{n+1}, y_{n+1}) et le point milieu $(\frac{t_{n+1} + t_n}{2}, \frac{y_{n+1} + y_n}{2})$. Par la suite nous approchons l'intégrale de f sur l'intervalle $[a, b]$, par l'intégrale de p sur ce même intervalle. On obtient l'expression suivante :

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^b p(x) dx = \frac{b-a}{6} \left[f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right] \quad (3.3)$$

Lorsque nous substituons dans l'équation (3.3) les valeurs de a, b, c respectivement par (t_n, y_n) , (t_{n+1}, y_{n+1}) et $(\frac{t_{n+1} + t_n}{2}, \frac{y_{n+1} + y_n}{2})$. Nous obtenons la forme suivante.

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} \left[f(t_n, y_n) + 4f\left(\frac{t_{n+1} + t_n}{2}, \frac{y_{n+1} + y_n}{2}\right) + f(t_{n+1}, y_{n+1}) \right] \quad (3.4)$$

Où h est le pas d'intégration, il est donné par :

$$h = t_{n+1} - t_n \quad (3.5)$$

L'intégrale de Simpson conduit à une équation où la valeur cherchée dépend encore d'elle-même, d'où la nécessité de rendre la méthode explicite en exprimant $2f(t_{n+1}, y_{n+1})$ et $4f(\frac{t_{n+1} + t_n}{2}, \frac{y_{n+1} + y_n}{2})$ de façon simple en fonction de y_n , t_n , et h .

Dans une moitié du deuxième terme, on remplace $\frac{y_{n+1}}{2}$ par sa valeur obtenue à partir de la méthode d'Euler explicite ;

- Euler explicite :

Cette méthode se base sur l'approximation de la dérivée suivante :

$$u'(x_i) = \frac{u(x_{i+1}) - u(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \quad (3.6)$$

Ce qui nous permet d'en déduire en remplaçant $u'(x_i)$ par $f(x_i)$ et $u(x_i)$ par y_i l'expression suivante

$$y_{i+1} = y_i + (x_{i+1} - x_i)f(x_i, y_i) \quad (3.7)$$

Qui est le schéma d'Euler explicite. Nous devons cependant l'adapter à notre cas au point de coordonner : $(\frac{t_{n+1}}{2}, \frac{y_{n+1}}{2})$ on obtient en définitive l'équation suivante :

$$y_{\frac{n+1}{2}} = y_n + \frac{h}{2} f(t_n, y_n) \quad (3.8)$$

La figure ci-dessous nous montre comment évolue l'erreur créée par cette méthode.

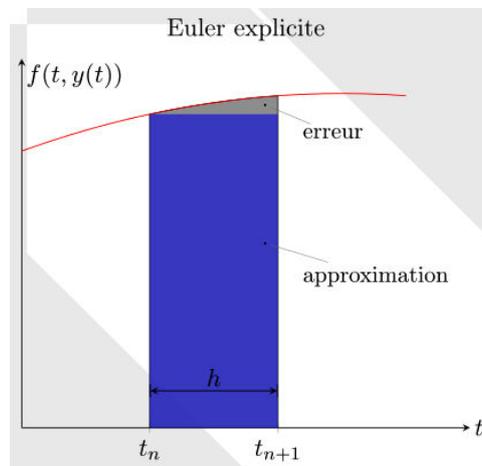


Figure 39: Erreur lors de l'exécution d'un schéma d'Euler explicite

Et dans l'autre moitié du deuxième terme on remplace $y_{\frac{n+1}{2}}$ par sa valeur obtenue à partir de la méthode d'Euler implicite ; dans cette méthode nous approximations par la même formule la dérivée en x_{i+1} ce qui nous donne :

$$u'(x_{i+1}) = \frac{u(x_{i+1}) - u(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \quad (3.9)$$

soit :

$$y_{i+1} = y_i + (x_{i+1} - x_i) f(x_{i+1}, y_{i+1}) \quad (3.10)$$

Nous obtenons finalement l'expression suivante ci-dessous au point de coordonner : $(\frac{t_{n+1}}{2}, \frac{y_{n+1}}{2})$:

$$y_{\frac{n+1}{2}} = y_n + \frac{h}{2} f\left(\frac{t_{n+1}}{2}, y_{\frac{n+1}{2}}\right) \quad (3.11)$$

L'expression de $y_{\frac{n+1}{2}}$ qui apparait dans cette équation correspond cette fois ci à sa valeur déduite du Euler explicite. Le schéma de la figure (40) montre que l'erreur ici évolue en sens inverse par rapport à celle de la méthode d'Euler explicite d'où l'importance de ces méthodes dans nos calculs. En effet l'utilisation de ces méthodes nous permettrons de réduire l'erreur final dans nos calculs.

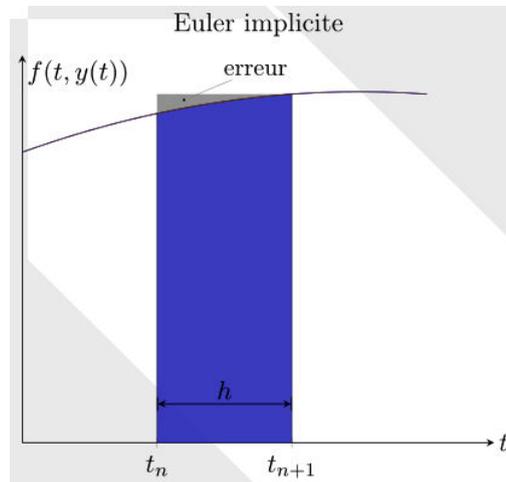


Figure 40: Erreur lors de l'exécution d'un schéma d'Euler implicite

Le troisième terme de cette équation quant à lui est déterminé à partir de la méthode du point milieu ; ce qui nous donne :

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} f\left(\frac{t_{n+1}}{2}, y_{\frac{n+1}{2}}\right) \quad (3.12)$$

Le terme $\frac{y_{n+1}}{2}$ qui apparaît à ce niveau correspond à celui calculer à partir de l'équation d'Euler implicite.

Une fois mise ensemble ces équations constituent le schéma itératif de la méthode de Runge Kutta d'ordre 4 qui peut se mettre sous la forme :

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} \left[\begin{array}{l} f(t_n, y_n) + 2f\left(t_n, y_n + \frac{h}{2}f(t_n, y_n)\right) \\ + 2f\left(\frac{t_{n+1}}{2}, y_n + \frac{h}{2}f\left(\frac{t_{n+1}}{2}, y_n + \frac{h}{2}f(t_n, y_n)\right)\right) \\ + f\left(t_{n+1}, y_n + \frac{h}{2}f\left(\frac{t_{n+1}}{2}, y_n + \frac{h}{2}f\left(\frac{t_{n+1}}{2}, y_n + \frac{h}{2}f(t_n, y_n)\right)\right)\right) \end{array} \right] \quad (3.13)$$

De façon simplifier on a :

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} [k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4] \quad (3.14)$$

Avec :

$$\begin{cases} k_1 = h * f(t_n, y_n) \\ k_2 = h * f\left(\frac{t_{n+1}}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right) \\ k_3 = h * f\left(\frac{t_{n+1}}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right) \\ k_4 = h * f(t_{n+1}, y_n + k_3) \end{cases} \quad (3.15)$$

V.2 Discrétisation

La méthode des volumes finis est une version spéciale de la méthode des résidus pondérés où la fonction de projection est égale à l'unité [10]. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud principal P. Chaque volume est délimité par : deux interfaces dans le cas monodimensionnel notées (e,w) (voir figure 34), quatre interfaces dans le cas bidimensionnel (e,w,s,n) et six interfaces dans le cas tridimensionnel (e,w,s,n,t,b). Chaque nœud principal P est limité par des nœuds voisins (E,W) dans le cas monodimensionnel, (E,W,S,N) dans le cas bidimensionnel, et (E,W,S,N,T,B) dans le cas tridimensionnel. L'équation différentielle est

intégrée dans chaque volume élémentaire. Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire l'inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, de puissance etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Le résultat de la discrétisation donne une équation algébrique qui est constituée par les valeurs nodales.

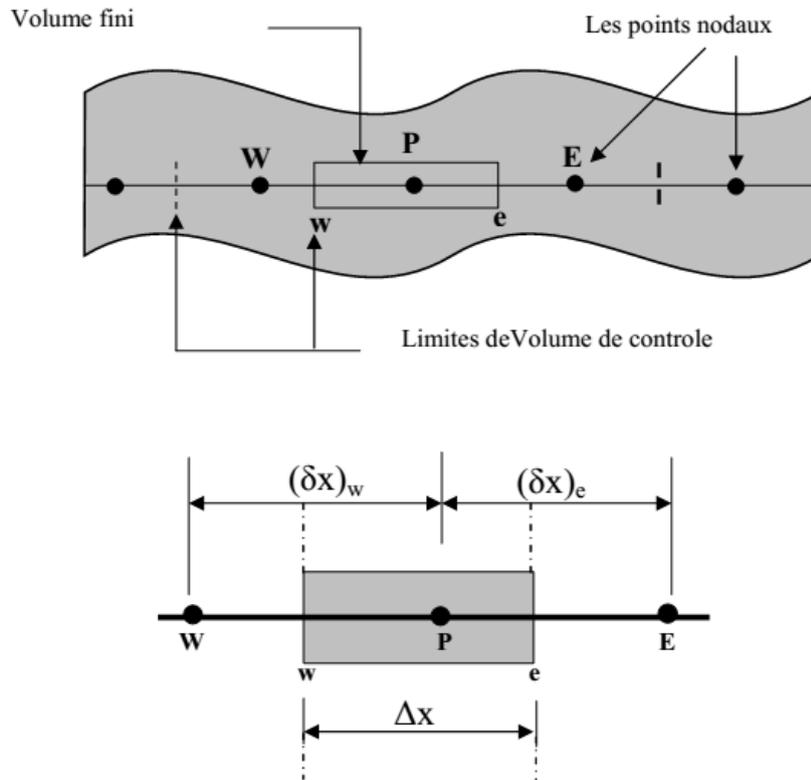


Figure 41: discrétisation en volumes finies dans le cas monodimensionnel

VI. Conclusion

Nous avons vu dans la première partie de ce chapitre comment la pollution due au pétrole pendant sa phase ascensionnelle et pendant le chauffage des maisons pouvait affecter l'homme et son environnement immédiat et éloigné. Quelques causes et origines de ces phénomènes ont été abordées. Dans le cas du processus de migration ascensionnel du pétrole nous avons vu que les mouvements des plaques peuvent être à l'origine du phénomène de migration tertiaire du pétrole à travers la fracturation des roches réservoirs par exemple. Dans le cas du processus de chauffage des bâtiments à partir du mazout, nous avons vu que le principal danger réside dans les produits de combustion du mazout ; car la combustion du mazout libère des gaz à effet de serre. Dans la deuxième partie qui portait sur la modélisation

du processus de migration ascensionnel du pétrole, nous avons présenté les différentes étapes du processus de migration ascensionnel du pétrole. Nous nous sommes intéressés particulièrement à la dysmigration du pétrole. Dans ce chapitre nous avons proposé un modèle de migration pour étudier ce phénomène. La seconde partie de ce travail était consacré au chauffage des bâtiments à partir du mazout. Nous avons présenté le mode de chauffage des bâtiments à partir du mazout. Une brève présentation sur le mazout et les bétons considérés dans cette étude a également été réalisé. La présentation des transferts thermiques nous a permis d'adopter des hypothèses de travail afin de modéliser l'équation de diffusion de l'humidité à travers les murs. Nous avons terminé ce chapitre la présentation des techniques numériques utilisées pour résoudre les différentes équations obtenues dans ce travail. Ainsi nous avons présenté les méthodes de Runge-Kutta d'ordre 4 et les techniques de discrétisation.

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

I. Résultats et discussions relatifs au processus de migration ascensionnelle du pétrole

Nous présentons dans cette partie les différents résultats obtenus pour la modélisation du processus d'ascension du pétrole. Nous ferons une présentation générale des courbes obtenues ; et en fin nous analyserons l'impact de la variation de certains paramètres sur le phénomène de pollution par le pétrole au cours de son ascension.

I.1. Etude du profil des courbes obtenues

L'évolution de la densité du pétrole en fonction de la distance conserve le même profil pour différente période d'observation considérée. Ceci peut être observé sur la figure (43). Cette figure se présente sous forme de palier uniforme correspondant chacun à une période d'observation de la diffusion. Par ailleurs la migration du pétrole est un processus très lent comme nous pouvons le voir sur la figure (42). Pour des valeurs identiques de la valeur initiale de densité on observe différente distance parcourue par le pétrole. Ainsi pour une période de 5 mois la densité initiale de pétrole qui était à 934 kg/m^3 voit sa valeur s'annuler au bout d'une distance parcourue de 425m. Lorsque nous considérons par contre une période de 30 mois la masse volumique initiale voit sa valeur s'annuler au bout d'une distance parcourue de 1000m.

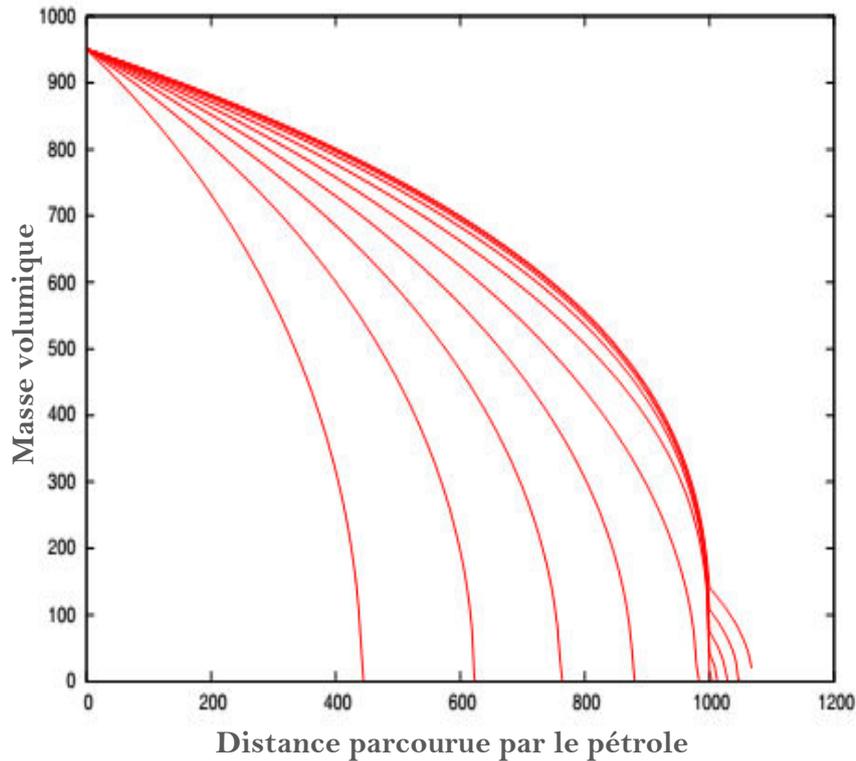


Figure 42: Représentation de la distribution du pétrole en fonction de la distance dans une roche intacte. Nous avons pris une compressibilité $C = 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ et nous considérons un pétrole lourd de masse volumique 20° API ; les distances ici sont exprimées en m.

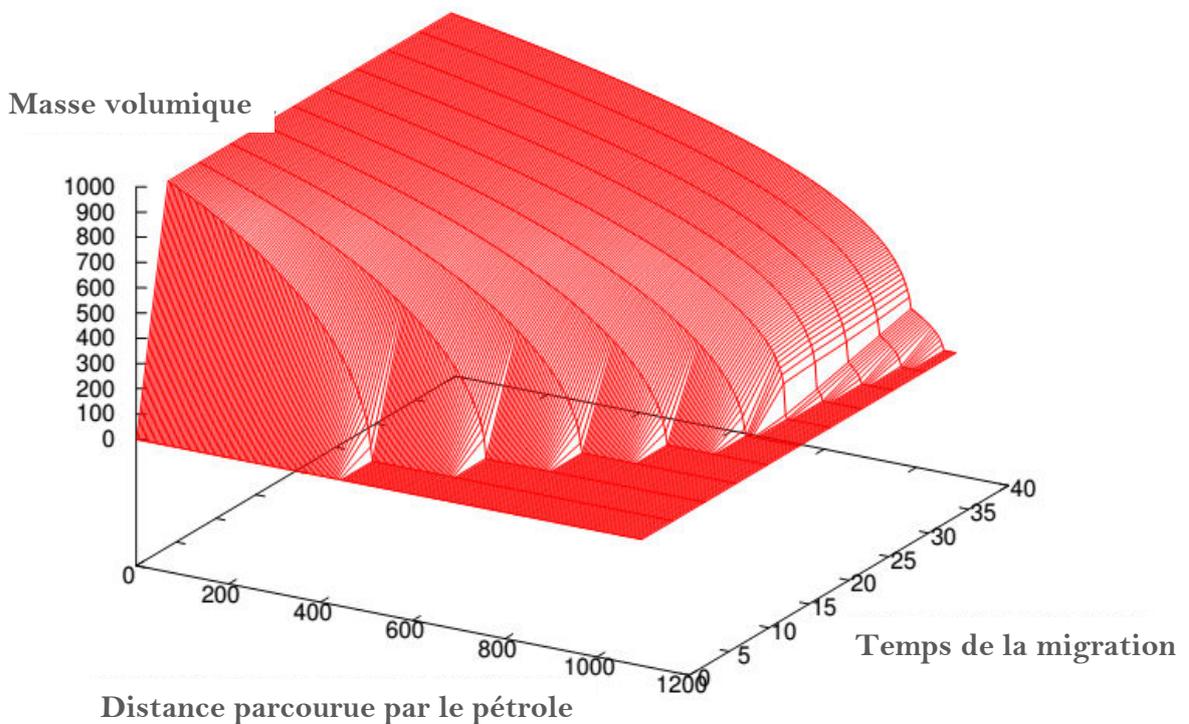


Figure 43: profil temporel de la distribution du pétrole dans une roche intacte réalisé dans les mêmes conditions que celles de la figure (45). Ici le temps est exprimé en mois.

Nous venons de voir ici que l'évolution de la densité du pétrole conserve le même profil pour différente période d'observation considérée. Cependant le tracé de ces courbes est régi par un certain nombre de paramètre donc il est nécessaire d'étudier l'impact de leur variation sur la migration du pétrole.

I.2 Etude de l'impact de la variation du coefficient de compressibilité

La variation du coefficient de compressibilité agit sur la cinétique du phénomène comme nous pouvons le voir sur les figures (45) et (47). Lorsque ce dernier augmente la vitesse de diffusion du pétrole augmente également. Il s'en suit une augmentation plus rapide des distances parcourues par le pétrole. En effet plus ce dernier augmente plus le pétrole parcourt de grandes distances en un temps plus réduit. Ceci s'observe dans la hauteur maximale atteinte par le pétrole. Pour la figure (44) où le coefficient de compressibilité est de $C = 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$, cette distance est de 1420m. Tandis qu'elle est de 1750m dans le cas de la figure (46) où $C = 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$.

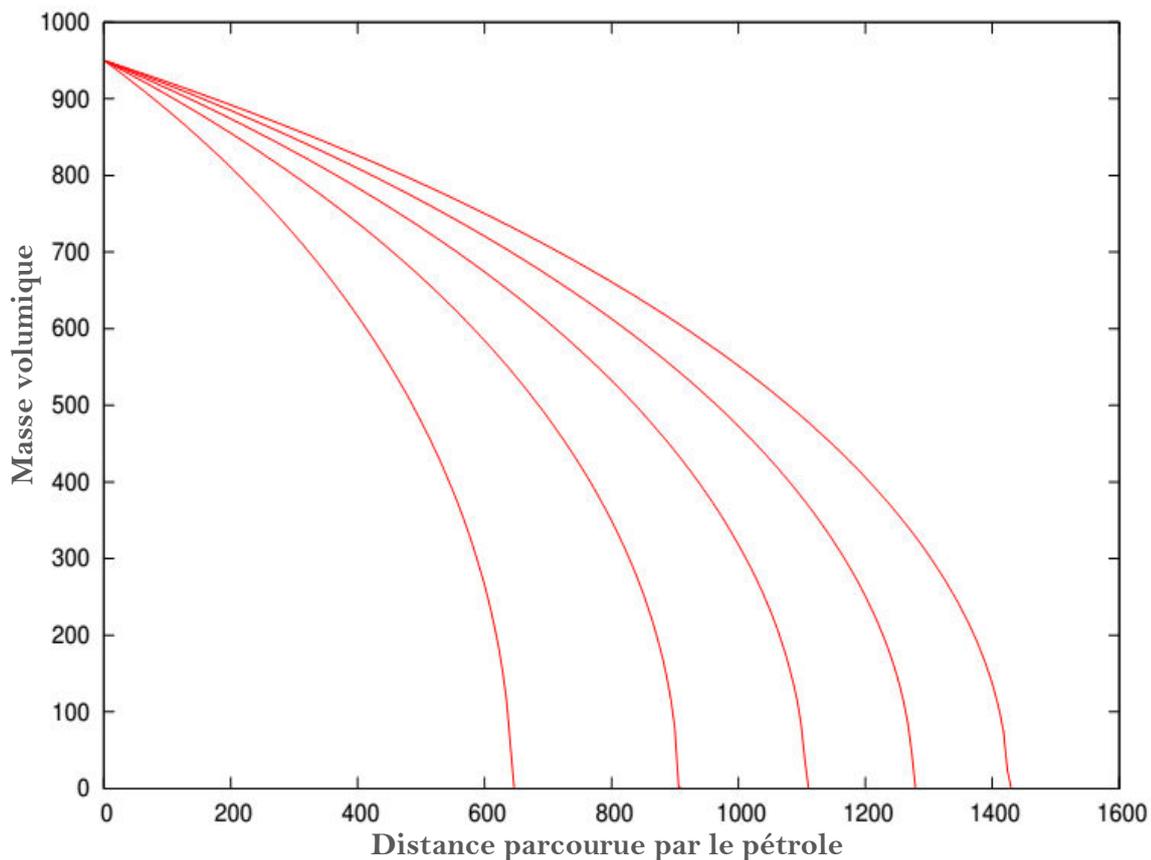


Figure 44: Représentation de la distribution du pétrole en fonction de la distance dans une roche sableuse. Le coefficient de compressibilité $C = 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ et nous considérons un pétrole lourd de masse volumique 20° API ; les distances ici sont exprimées en mètre (m), le temps en mois.

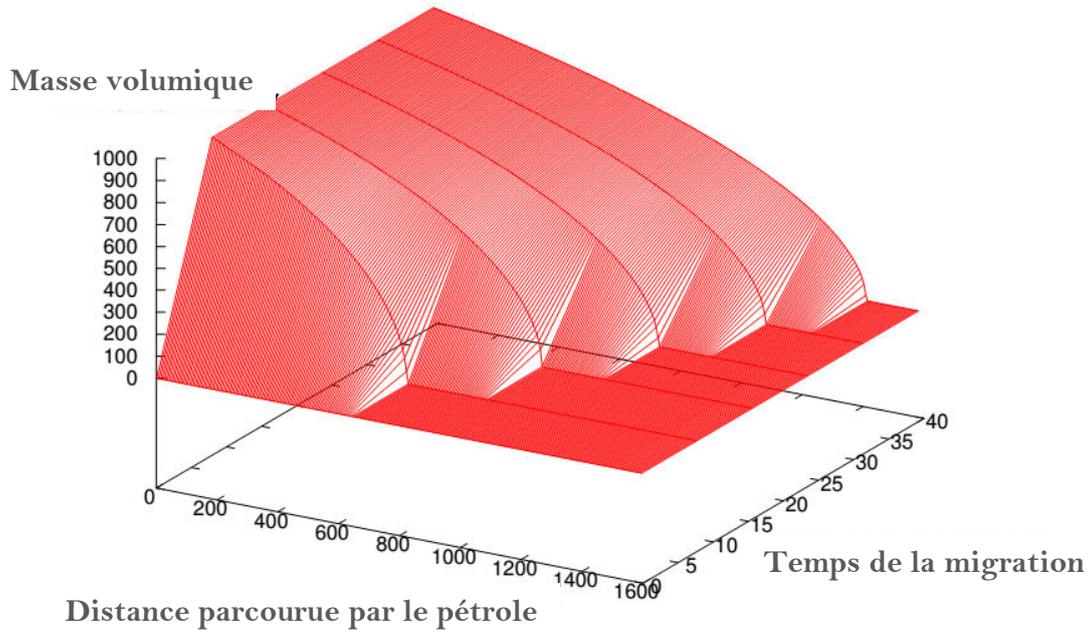


Figure 45: profil temporel de la distribution du pétrole dans une roche sableuse. Le coefficient de compressibilité est $C = 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ et nous considérons un pétrole lourd de masse volumique 20° API ; les distances ici sont exprimées en mètre (m), le temps en mois.

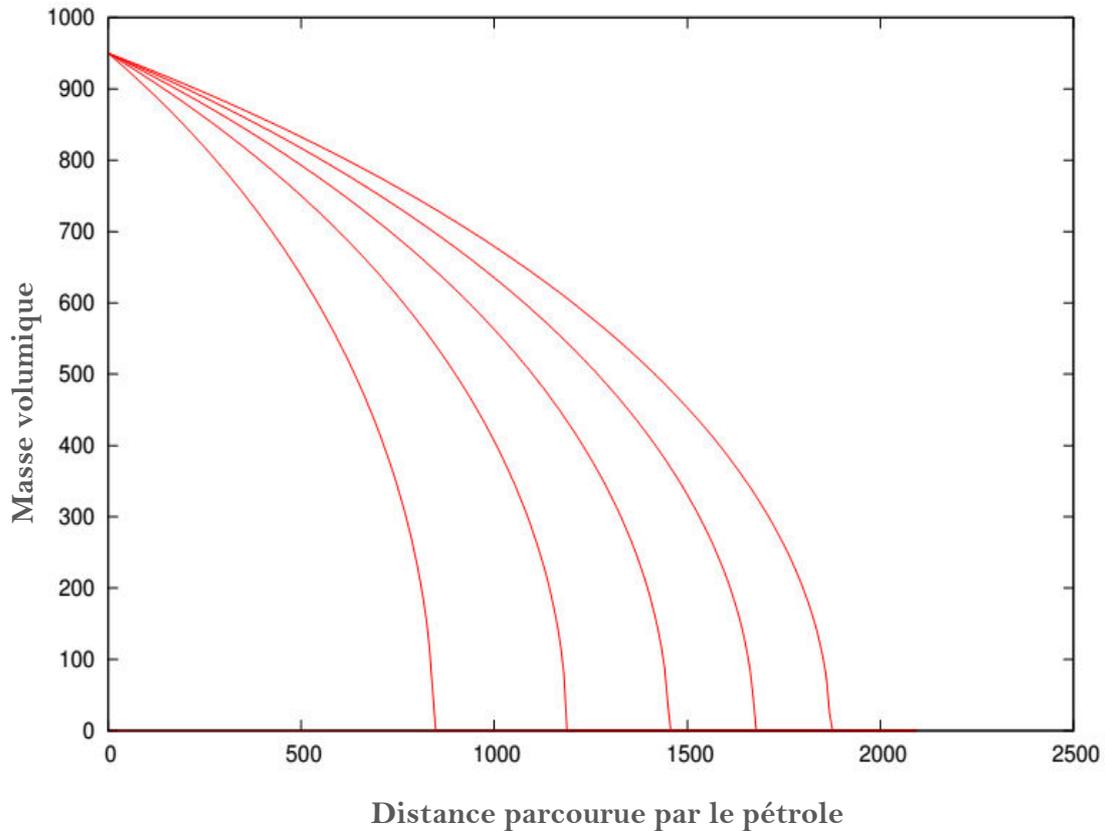


Figure 46: Représentation de la distribution du pétrole en fonction de la distance dans une roche argileuse. Le coefficient compressibilité $C = 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$ et nous considérons un pétrole lourd de masse volumique 20° API ; les distances ici sont exprimées en mètre (m), le temps en mois.

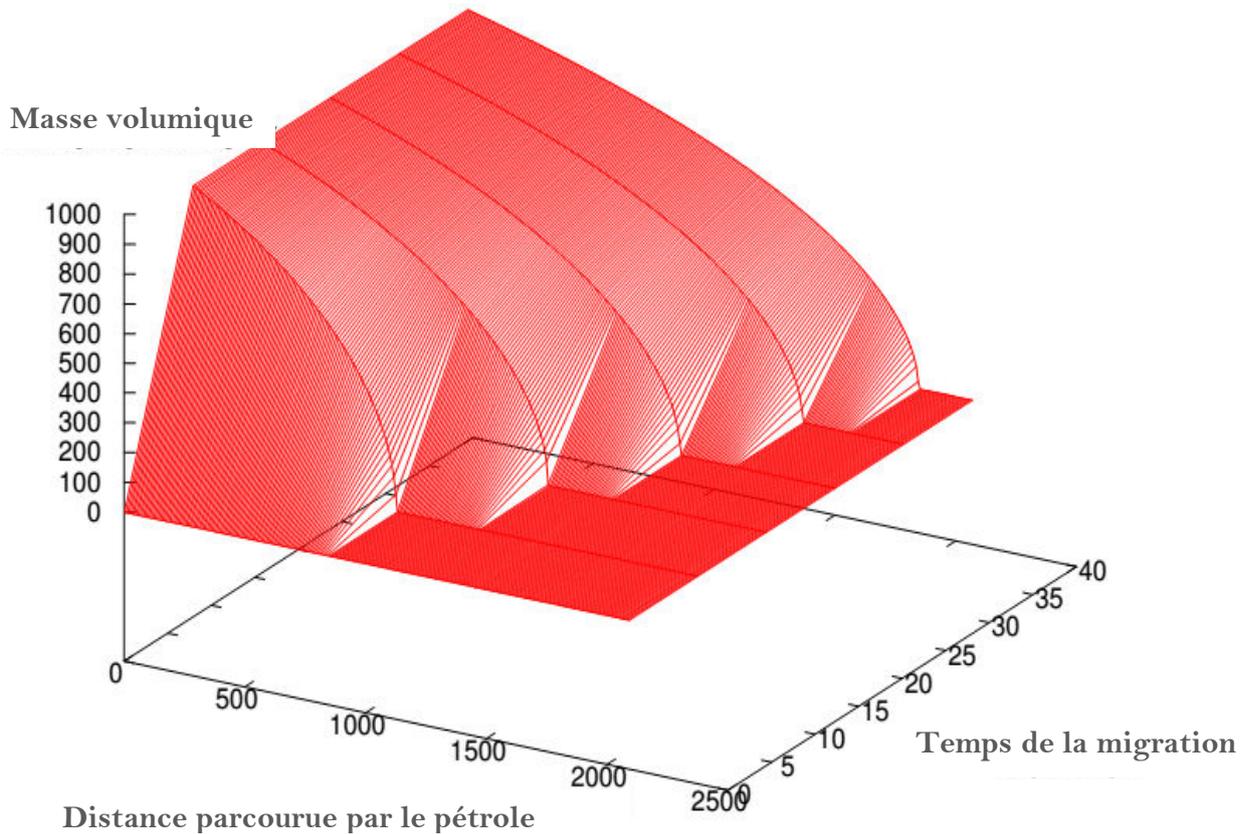


Figure 47: *profile temporelle de la distribution du pétrole dans une roche argileuse de coefficient compressibilité $C = 10^{-6} Pa^{-1}$. 1. Nous considérons un pétrole lourd de masse volumique $20^{\circ} API$; les distances ici sont exprimées en mètre (m), le temps en mois et les densités en kg/m^3 .*

I.3 Etude de l'impact de la densité initial du pétrole

La variation de la valeur initiale de la densité entraîne un changement dans les distances parcourue par le pétrole. Comme nous pouvons le voir sur la figure (48), plus un pétrole est dense plus il migre difficilement vers la surface. Dans cette figure, pour les mêmes périodes d'observation considérées, les hauteurs maximales atteintes sont différentes. Dans ce classement le pétrole léger vient en tête avec la plus grande hauteur suivie du pétrole lourd pour terminer par le pétrole extra lourd. On note cependant que les différences de hauteur observées sur la figure (48) sont moins importantes comparées à celles observées sur les figures (45) et (47). Ceci nous montre que densité du pétrole n'a pas un grand impact sur le phénomène de migration du pétrole.

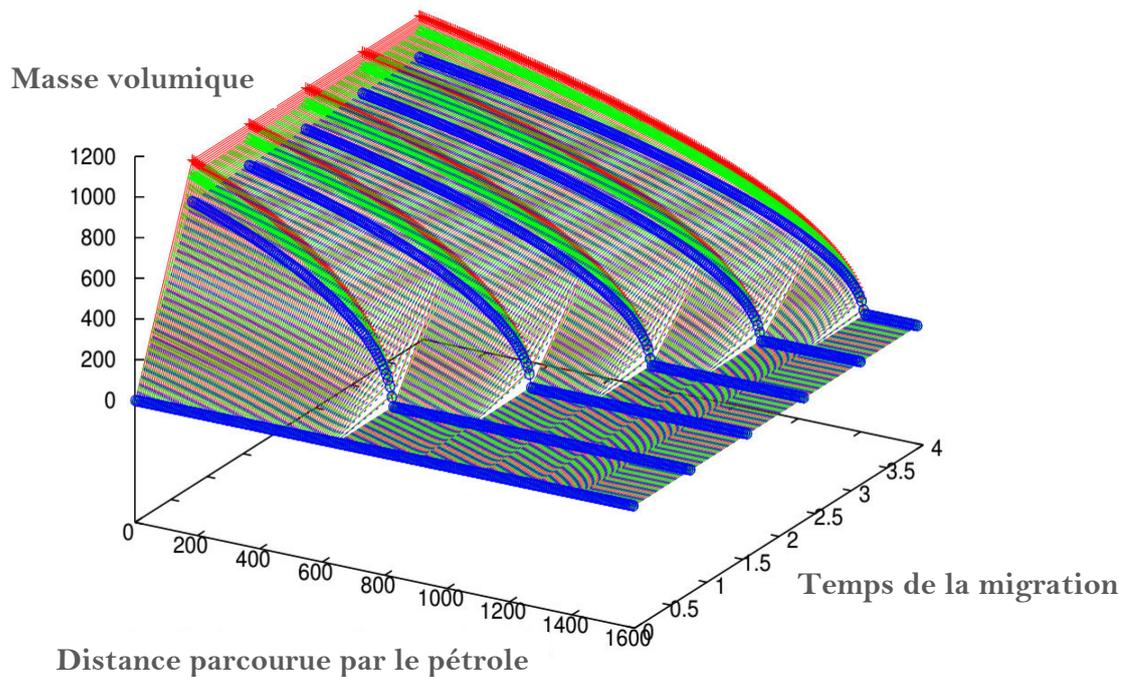


Figure 48: profil temporelle de la distribution du pétrole dans une roche argileuse de coefficient compressibilité $C = 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ pour 3 types de pétroles : pétrole léger $d = 25^\circ$ (courbe en bleu), pétrole lourd, $d = 20^\circ$ (courbe en vert), pétrole extra-lourd, $d = 9^\circ$ (courbe en rouge). Nous considérons un pétrole lourd de masse volumique 20° API ; les distances ici sont exprimées en mètre (m), le temps en mois et les densités en kg/m^3 .

I.4 Etude de l'impact de la variation de la perméabilité

La figure (49) est une représentation dans laquelle nous avons fixé tous les paramètres sauf la perméabilité du milieu. On remarque d'après cette figure qu'il existe un décalage entre les deux courbes. La courbe en verte ayant une forte perméabilité permet au pétrole de parcourir des distances un peu plus élevées que celle en rouge ayant une perméabilité faible. Les différences de hauteurs observées dans ce cas sont très peu différents de celles observées sur la figure (50).

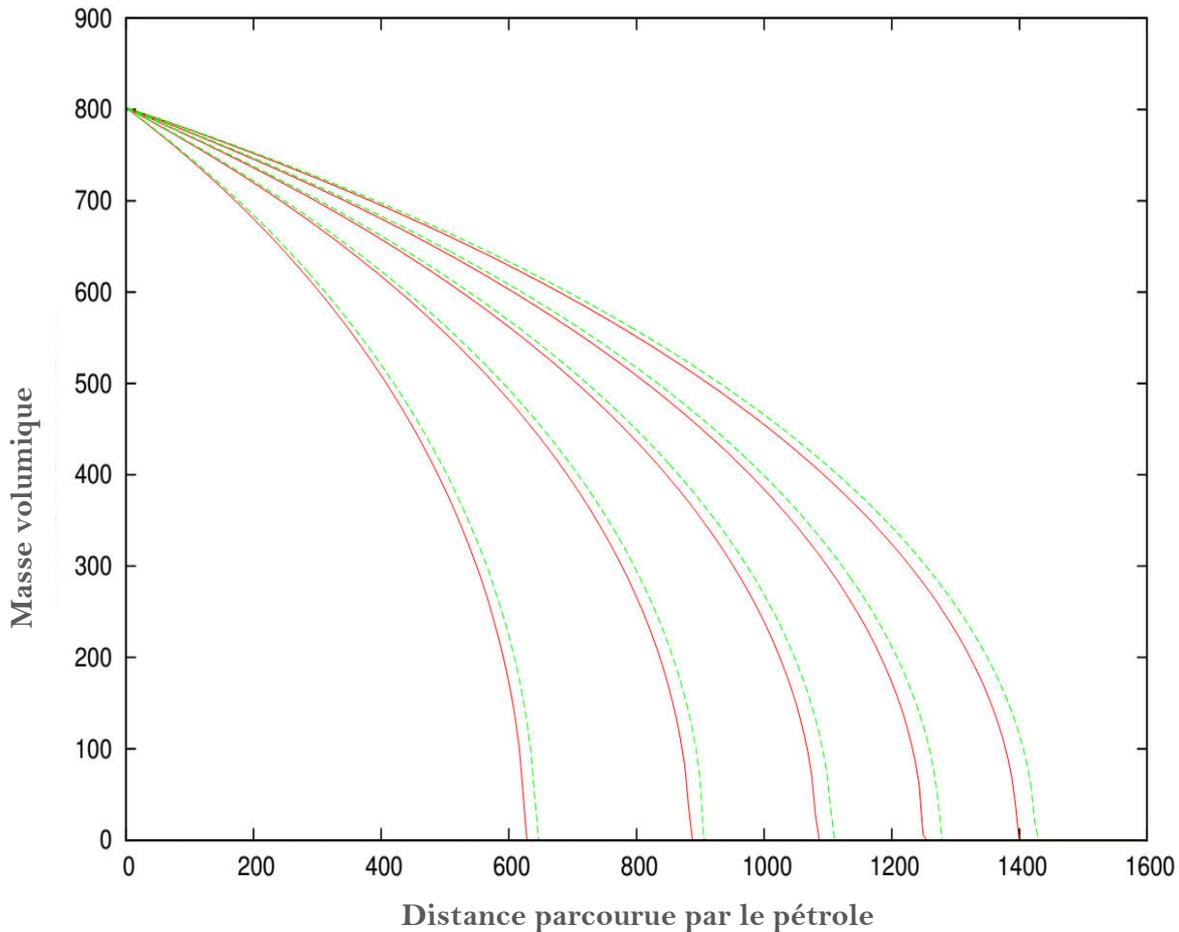


Figure 49: Représentation de la distribution du pétrole en fonction de la distance dans une roche argileuse de coefficient compressibilité $C = 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$, pour deux valeurs différentes de la perméabilité : $k = 10^{-14} \text{ m}^2$ (courbe en rouge) et $k = 10^{-12} \text{ m}^2$. Nous considérons un pétrole lourd de masse volumique 20° API ; les distances ici sont exprimées en mètre (m), le temps en moi et les densités en kg/m^3

L'ensemble des données collectées dans ces différentes courbes, en particulier la donnée relative à la distance parcourue par le pétrole, nous permettent de comprendre que :

- ✓ le pétrole représente effectivement un danger pour les sols et les sous-sols au cours de son processus ascensionnelle, particulièrement au cours de phase de migration tertiaire. En effet, les courbes obtenues montrent que ce dernier peut facile atteindre des couches de la terre qui abrite en plus des organismes vivant des cultures et bien plus important encore des réserves souterraines d'eau.
- ✓ Le pétrole peut également dans le cas de figure analysé ici être un tuer silencieux dans la mesure où nous ne pouvons pas prévoir facilement sa présence dans un environnement. Il s'agit ici des cas où le pétrole dans son processus ascensionnel migre

vers la surface sans toutefois y arrivé il peut s'en suivre une contamination des eaux souterraines.

II. Résultats et discussion relatifs au chauffage des bâtiments à partir du mazout

Nous tenons à préciser que nous nous intéressons ici davantage à ce qui se passe pendant la période estivale, lorsque les murs extérieurs sont constamment mouillés et exposés à une humidité intense. Durant cette période, les murs extérieurs sont régulièrement arrosés par des pluies battantes. C'est durant cette période que le problème du chauffage se pose avec acuité. Notre développement est essentiellement basé sur l'enveloppe extérieure de la maison.

L'étude numérique de l'influence de la teneur en humidité dans les murs en béton dans les différentes conditions météorologique nous ont données les résultats suivants.

II.1 Impact du type de béton

La première chose que nous pouvons souligner est que, le type de matériaux utilisés pour la construction du bâtiment joue un rôle crucial. Si nous examinons de manière critique les résultats présentés dans les tableaux (13) et (14), nous nous rendons compte que la quantité d'énergie requise pour le chauffage lorsque les murs sont faits de béton de pierre ponce est presque 50% inférieure à celle impliquée dans le processus de chauffage lorsque les murs du bâtiment sont construits avec du béton normal. Notons qu'il existe néanmoins une différence de prix significative entre les deux matériaux. Le béton de pierre ponce étant plus coûteux que le béton normal. Il faut donc faire un choix pour les bâtiments. On peut décider de dépenser beaucoup d'argent pendant la construction en misant suffisamment sur la qualité du matériau utilisé. Cet argent sera récupéré lors des périodes de chauffage. Ce faisant, ce sera, non seulement une occasion d'économiser de l'argent, mais aussi une occasion de contribuer efficacement à la protection de l'environnement en limitant la quantité de polluant produit pendant le chauffage. Ainsi, l'utilisation de bétons de qualité supérieure assure le confort thermique et l'efficacité énergétique. Il est vrai également que la valeur de la température extérieure influence sérieusement la quantité totale d'énergie nécessaire au chauffage. Chaque tableau ci-dessus indique que, la puissance de chauffage augmente lorsque la température extérieure diminue.

Tableau 13: Puissance fournie pour le chauffage. Ici, les murs du bâtiment sont en béton normal. Le taux d'humidité est fixé à 100kg/m^3

Température externe [°C]	15	13	10	6	4	0	-4	-5
Puissance du chauffage du bâtiment [W/m^2]	30	49	70	98	112	149	168	175

Tableau 14: Puissance fournie pour le chauffage. Ici, les murs du bâtiment sont en béton ponce. Le taux d'humidité est fixé à 100kg/m^3

Temperature externe [°C]	15	13	10	6	4	0	-4	-5
Puissance du chauffage du bâtiment [W/m^2]	18	24	35	48	55	70	83	87

Pour faire face à ce problème de chauffage, le programme d'assistance énergétique fournit à certains résidents un paiement annuel unique pour rendre les factures d'énergie de chauffage plus abordables. Ce financement permet donc de payer une partie des coûts énergétiques. De notre point de vue, nous suggérons que, au lieu de prévoir une telle aide annuelle, ce programme élabore plutôt son assistance pendant la phase de construction pour améliorer la qualité technique du bâtiment. Une assistance en vue d'assurer la qualité des matériaux utilisés et l'aspect technique de leur bâtiment. En agissant ainsi, ils pourraient certainement réduire le coût de l'énergie de chauffage. L'objectif principal doit être de les aider à économiser suffisamment d'énergie et de maintenir les charges liées à la consommation d'énergie à un niveau raisonnable.

Dans le cadre d'un dossier global et efficace concernant l'aspect technique de la construction des bâtiments, ainsi que le type de matériaux utilisés, la consommation d'énergie pour le chauffage pourrait être réduite de manière significative. Il est important de se concentrer surtout sur les solutions de longue durée. S'il est vrai que le type de béton influence sur le chauffage des bâtiments il n'en demeure pas moins le seul paramètre dans le processus de chauffage.

II.2 Impact de la teneur en humide

Dans le cas où le mur du bâtiment est fait de béton normal, on peut remarquer que la température à l'intérieur du mur du bâtiment augmente avec la teneur en humidité. L'augmentation est modérée pour les petites valeurs de la teneur en humidité, et très prononcée pour les grandes valeurs de la teneur en humidité. La température moyenne du mur augmente avec la période de temps. Ceci est visible sur la figure (50) où chaque courbe individuelle correspond à une période de temps donné.

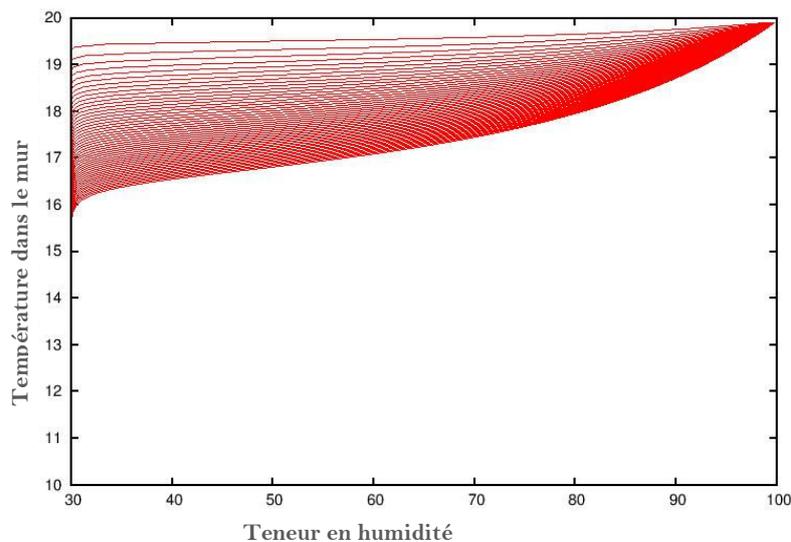


Figure 50: Température dans le mur en béton normal en fonction de la teneur en humidité. La teneur en humidité initiale sur la surface altérée est de $\omega_0 = 100\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant 10°C . Les courbes sont tracées à des périodes de temps successives.

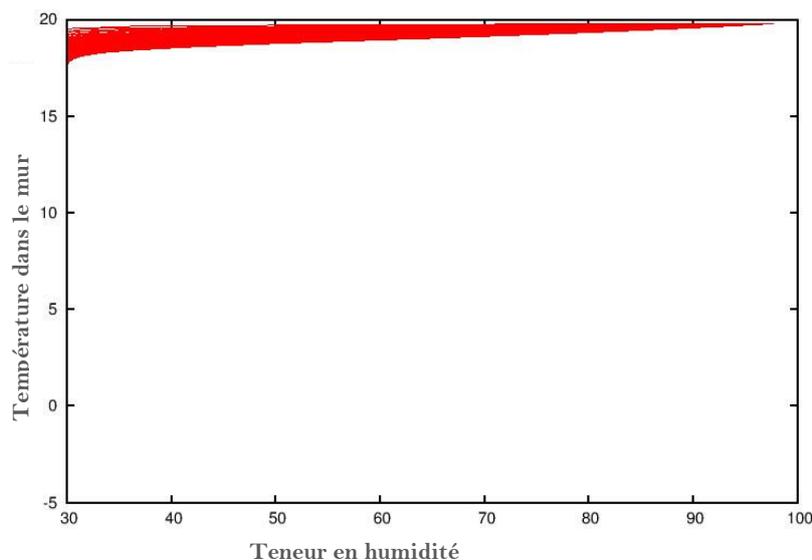


Figure 51: Température dans le mur en béton de pierre ponce en fonction de la teneur en humidité. Le taux d'humidité initial sur la surface altérée est de $\omega_0 = 100\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant -5°C .

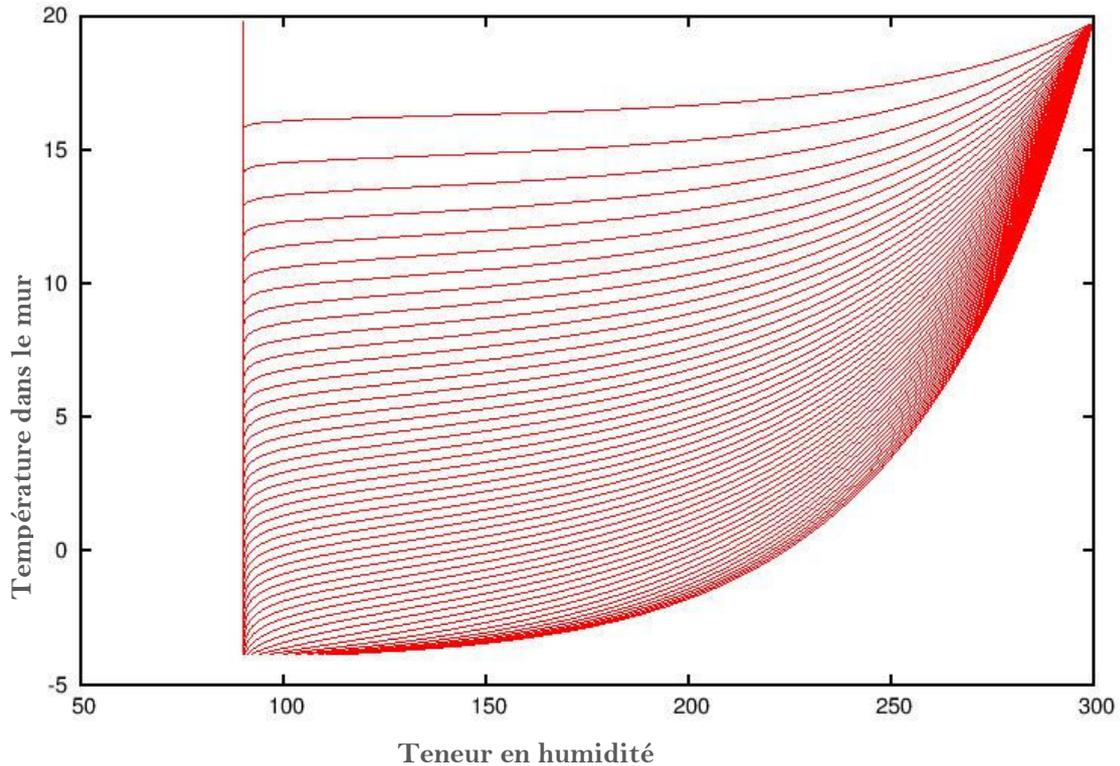


Figure 52: Température dans le mur en béton de pierre ponce en fonction de la teneur en humidité. Le taux d'humidité initial sur la surface altérée est de $\omega_0 = 300 \text{ kg/m}^3$. La température extérieure étant -5°C .

Si l'on considère plutôt le béton ponce dans le processus de construction, il apparaît que les températures de la paroi sont principalement concentrées près des valeurs maximales atteignables, c'est-à-dire 20°C , lorsque la teneur en humidité initiale prend une faible valeur, $\omega_0 = 100 \text{ kg/m}^3$. Cette affirmation peut être vérifiée sur la figure (51). La situation est différente pour une valeur légèrement supérieure de $\omega_0 = 300 \text{ kg/m}^3$. Les températures du mur, pour différentes périodes de temps, sont étendues de la valeur -5°C à la valeur maximale 20°C (voir figure 52). Ainsi, de petites températures sont autorisées dans ce cas. Toutes les courbes convergent naturellement vers la valeur 20°C , la température imposée à l'intérieur du bâtiment par le mécanisme de chauffage.

II.3 Impact de la température extérieur et de l'humidité sur la puissance fournie

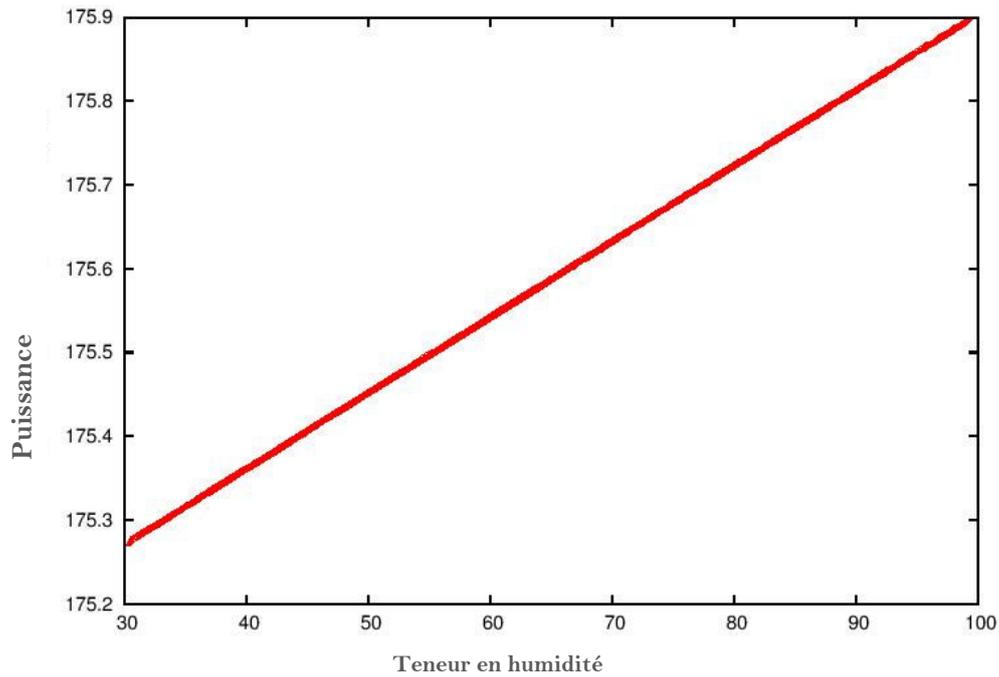


Figure 53: Puissance fournie pour le chauffage en fonction de la teneur en humidité. Ici, le mur est en béton normal. Le taux d'humidité initial sur la surface altérée est de $\omega_0 = 100\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant -5°C .

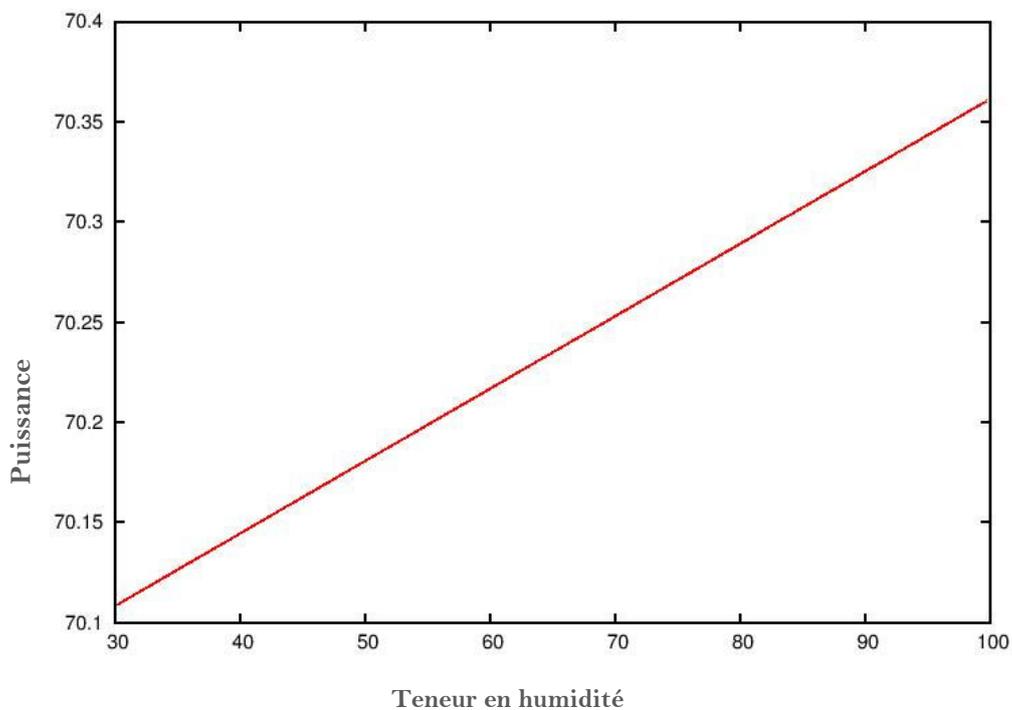


Figure 54: Puissance fournie pour le chauffage en fonction de la teneur en humidité. Ici, le mur est en béton normal. Le taux d'humidité initial sur la surface altérée est de $\omega_0 = 100\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant 10°C .

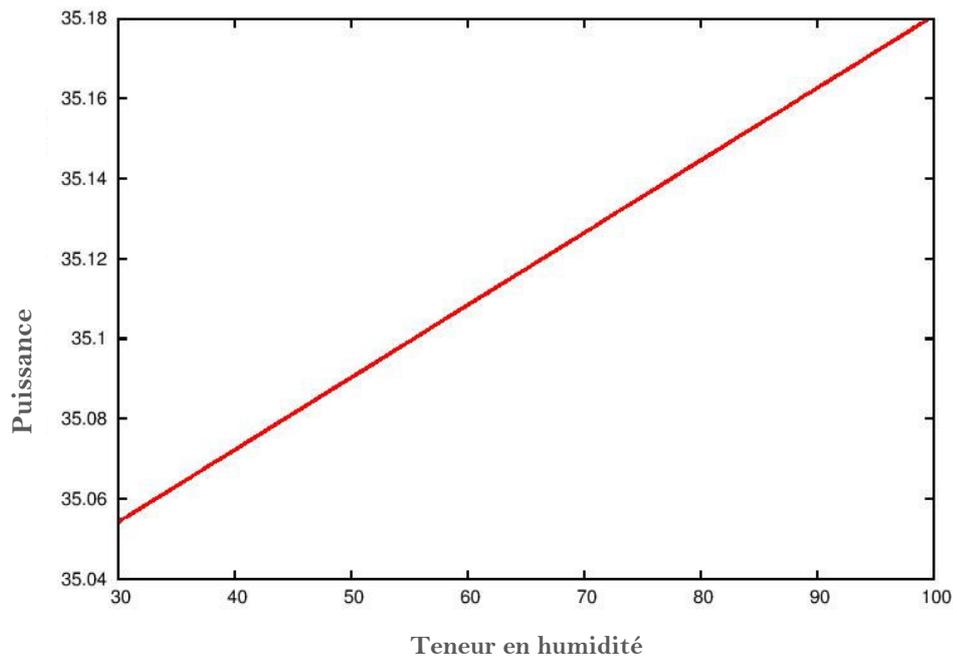


Figure 55: Puissance fournie pour le chauffage en fonction de la teneur en humidité. Ici, le mur est réalisé en béton normal. Le taux d'humidité initial sur la surface altérée est de $\omega_0 = 100\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant 15°C .

Les figures (53), (54) et (55) montrent l'impact de la teneur en humidité sur la puissance fournie pour le chauffage. Ici, les bâtiments sont en béton normal. Les mêmes calculs sont effectués pour les bâtiments en béton ponce voir les figures (56). Il est naturel de constater que la température extérieure joue un rôle crucial dans la quantité d'énergie impliquée dans le processus de chauffage. En effet, plus le taux d'humidité du mur est faible, plus la demande énergétique nécessaire pour maintenir la température intérieure à la valeur 20°C (température qui peut assurer un confort thermique), est élevée. Comme on peut le voir sur ces figures, le changement est très significatif, en fonction de la température ambiante et du type de béton. Ainsi, lorsque la température environnante de la localité est de 15°C , il suffit de 35W/m^2 . Cette quantité de puissance sera doublée si la température extérieure diminue pour prendre la valeur 10°C . En revanche, dans les localités où les températures en période hivernale atteignent des valeurs très basses, -5°C par exemple, la consommation d'énergie devient vraiment importante. Dans ce cas, les calculs montrent que 175W/m^2 sont nécessaires pour un chauffage normal du bâtiment. Les mêmes calculs sont effectués avec le béton de pierre ponce. Les résultats obtenus sont très différents : Une température extérieure de 15°C correspond à 17W/m^2 de puissance fournie pour le chauffage. Alors qu'il faudra 87W/m^2 pour chauffer une localité où la température est d'environ -5°C voir tableau (14). L'énergie de chauffage double pratiquement

lorsque nous passons du béton de pierre ponce au béton normal.

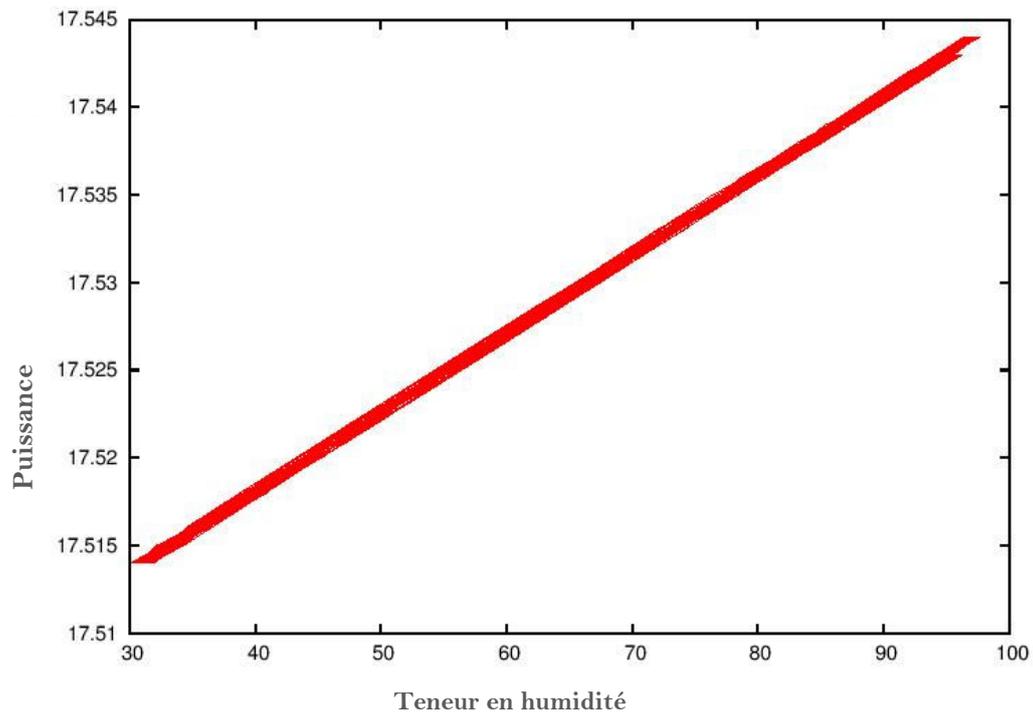


Figure 56: Puissance fournie pour le chauffage en fonction de la teneur en humidité. Ici, le mur est constitué de béton ponce. Le taux d'humidité initial sur la surface altérée est de $\omega_0 = 100\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant 15°C .

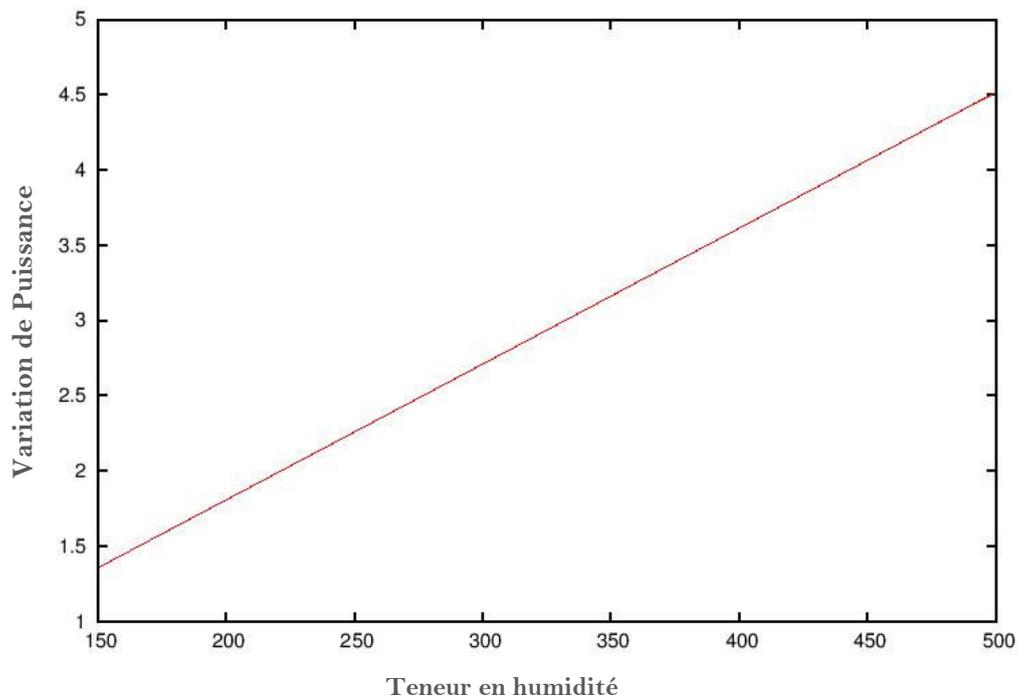


Figure 57: changement de la puissance fournie en fonction de la teneur en humidité. Ici, le mur est constitué de béton normal. Le taux d'humidité initial sur la surface altérée est de $\omega_0 = 500\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant -5°C .

La figure (57) nous indique que la variation de la puissance fournie en fonction de la teneur en humidité peut être très importante dans certaines circonstances. Ainsi, dans le cas où la température de la localité est d'environ -5°C , pour une humidité initiale d'environ $\omega_0 = 500\text{kg/m}^3$ la variation induite dans la puissance fournie, due à la présence de l'humidité, peut atteindre la quantité de $4,5\text{W/m}^2$.

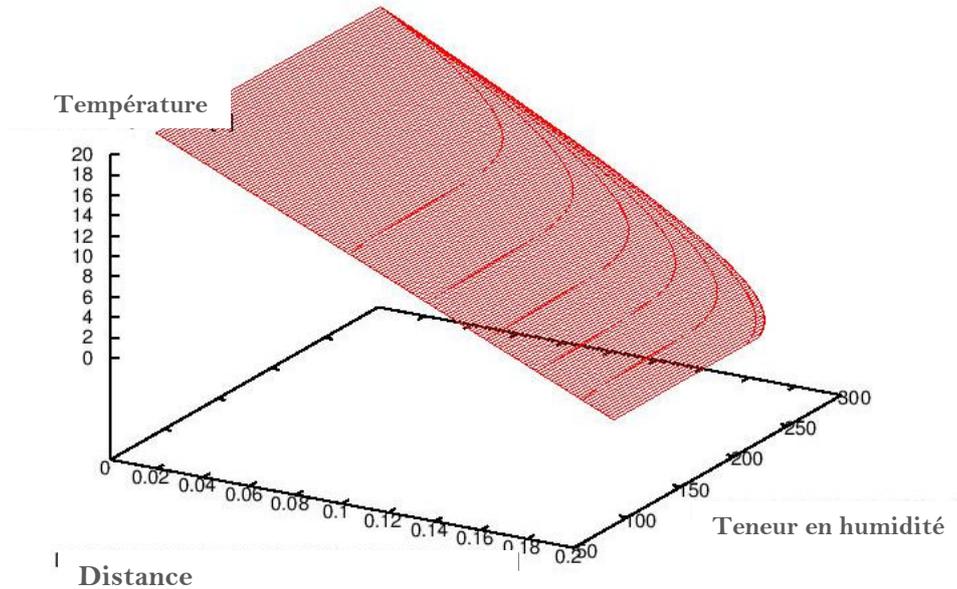


Figure 58: Profil spatial de la température du mur en fonction de la teneur en humidité. Ici, le mur est constitué de béton normal. La teneur en humidité initiale sur la surface altérée est de $\omega_0 = 300\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant 0°C .

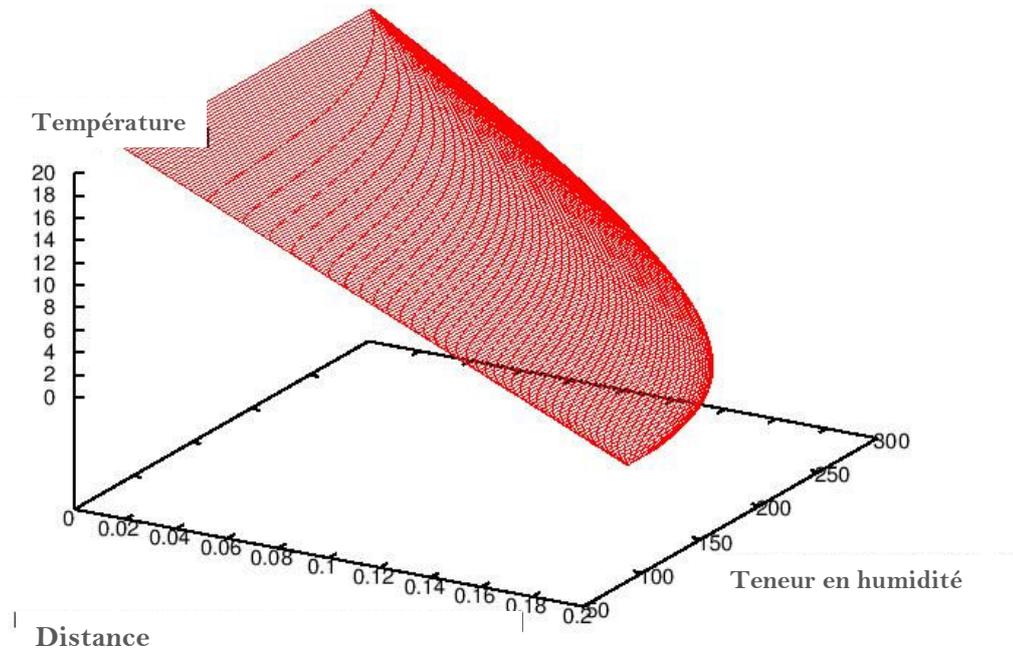


Figure 59: Profil spatial de la température du mur en fonction de la teneur en humidité. Ici, le mur est constitué de béton ponce. La teneur en humidité initiale sur la surface altérée est de $\omega_0 = 300\text{kg/m}^3$. La température extérieure étant 0°C .

Les figures (58) et (59) montrent que la température à l'intérieur du bâtiment du mur diminue progressivement à mesure que l'on s'approche de la surface extérieure du mur. Il est à noter que la température tombe drastiquement à zéro lorsqu'on s'approche de la surface externe du mur. Mais cette décroissance est légèrement plus prononcée dans le cas d'un mur en béton ponce. Et ce, par rapport à celui réalisé en béton normal. Cette situation était attendue car la conductivité thermique du béton normal est plus élevée que celle du béton de pierre ponce.

Effectuons des calculs sur un cas spécifique. Cet exemple de calcul nous permettra d'avoir une idée claire de la façon dont l'humidité et la température extérieure ont un impact réel sur la quantité totale d'énergie impliquée dans le processus de chauffage. Nous considérons un bâtiment moyen de 10m x 7m et 2,5m de hauteur. La figure (57) nous indique que l'énergie de chauffage supplémentaire qui émerge en raison de la présence d'humidité, à une température extérieure donnée, est d'environ 4,5W/m². À première vue, les gens ne semblent pas se rendre compte de l'ampleur réelle d'un tel phénomène. Maintenant, si l'on étend cette quantité à une petite ville d'environ 100 000 bâtiments ayant approximativement les tailles mentionnées ci-dessus. On peut facilement atteindre des dépenses énergétiques supplémentaires d'environ 38,25GW. Il est clair que cette quantité d'énergie ne peut être négligée à cette échelle. Ainsi, le problème crucial de l'effet de l'humidité dans le processus de chauffage des bâtiments ne peut être évité ou mis de côté. Il doit être abordé avec un maximum de sérieux et d'attention.

Ces calculs ont pour objectif de faire comprendre aux gens, qu'ils doivent opter pour des investissements importants en matériaux économes en énergie au moment de la construction. Cela leur permettra de bénéficier de bâtiments de qualité offrant un bon confort thermique. Ainsi, par la suite, ils économiseront beaucoup d'argent lors du processus de chauffage et limiterons par la même occasion la pollution de l'environnement.

Nous n'attirons pas l'attention sur les zones à forte humidité bien connues qui sont présentes dans chaque maison d'habitation ; comme les cuisines, les compartiments de douche, les vestiaires. En général, tous les concepteurs bien formés savent qu'un traitement spécial est nécessaire dans toutes les régions qui sont humides en permanence. Cela contribue efficacement à la réduction des dépenses d'énergie de chauffage.

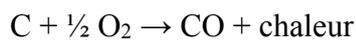
II.4 Évaluation de la production de gaz à effet de serre au cours du processus de chauffage par le Mazout

Le gasoil de chauffage est un mélange complexe d'hydrocarbures, composé de liaisons multiples de carbone et d'hydrogène. Le terme général s'écrit : C_xH_y . Nous voulons calculer la quantité de produits de combustion en cas de combustion du mazout, pour cela nous devons connaître la composition du combustible. Cette composition s'exprime en un pourcentage de la masse. Le tableau ci-dessous reprend les principaux composants :

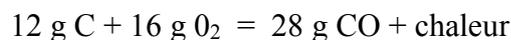
Tableau 15: Composition en masse du Mazout

Composant	% de masse
Carbone (C)	86
Hydrogène (H)	13
Soufre (S)	0,2

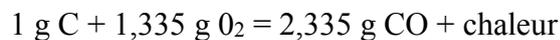
Dans le cas où la combustion du carbone est incomplète nous avons :



où



Lorsque nous ramenons cette réaction à 1 gramme de carbone nous obtenons :



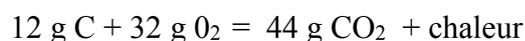
Le produit qui s'est formé est le monoxyde de carbone. Ce dernier présente les caractéristiques suivantes:

- Inflammable
- Très toxique; attaque les globules rouges
- Incolore, inodore et insipide
- Lorsque 1/5.000 de l'air inspiré se compose de Co, plus de 20% des globules rouges sont détruits.
- Très polluant de l'air

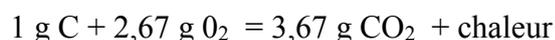
Dans le cas d'une combustion complète du carbone nous avons :



où



Lorsque nous ramenons cette réaction à 1 gramme de carbone:



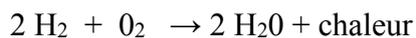
La combustion de 1 gramme de carbone nécessite donc 2,67 grammes d'oxygène. Nous obtenons alors 3,67 grammes de dioxyde de carbone. Le produit formé est du dioxyde de carbone ou gaz carbonique.

Ce dernier possède les caractéristiques suivantes :

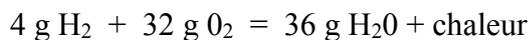
- Bien soluble dans l'eau
- non inflammable
- Présent dans l'atmosphère
- Insipide et incolore
- Gaz à effet de serre

Une combustion complète dégage environ trois fois plus de chaleur qu'une combustion incomplète. Au vu des caractéristiques du Co et du CO₂, on peut conclure déjà que nous devons toujours rechercher une combustion complète pour des raisons de limitation de la pollution.

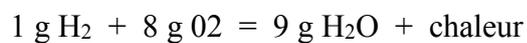
La combustion de l'hydrogène



où



Lorsque nous ramenons cette réaction à 1 gramme d'hydrogène nous obtenons:

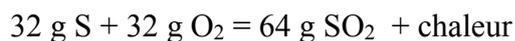


En définitive, la combustion de 1 gramme d'hydrogène nécessite donc 8 grammes d'oxygène. Nous obtenons alors 9 grammes d'eau sous forme de vapeur d'eau. L'hydrogène se lie à l'oxygène pour former de l'eau. L'eau formée peut se libérer à l'état liquide ou à l'état de vapeur. Quand l'eau se libère à l'état liquide, elle est condensée et a cédé sa chaleur de condensation, et par conséquent dégage plus de chaleur.

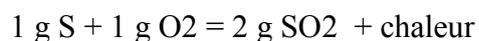
La combustion du soufre



où



Lorsque nous ramenons cette réaction à 1 gramme de soufre nous obtenons :



La combustion de 1 gramme de soufre nécessite donc 1 gramme d'oxygène. Nous obtenons 2 grammes de dioxyde de soufre. Cette réaction dégage peu de chaleur et comme il y a peu de

soufre dans le combustible, elle est négligeable du point de vue de la thermique. Le SO₂ présente les caractéristiques suivantes :

- Gaz incolore à odeur piquante
- Bien soluble dans l'eau
- risque de formation d'acide sulfurique (ce composé est capable d'attaquer les métaux)

Nous avons vu plus haut que lorsque nous considérons un bâtiment moyen de 10m x 7m et 2,5m de hauteur. L'énergie de chauffage supplémentaire qui émerge en raison de la présence d'humidité, à une température extérieure donnée, est d'environ 4,5W/m². Maintenant, si l'on étend cette quantité à une petite ville d'environ 100 000 bâtiments ayant approximativement les tailles mentionnées ci-dessus. On peut facilement atteindre des dépenses énergétiques supplémentaires d'environ 38,25GW.

En nous basant sur la composition du combustible donné par le tableau (16) et les valeurs des chaleurs produite lors de leur combustion donné dans le tableau (18) ci-dessous, nous pouvons estimer la quantité théorique de dioxyde de carbone, oxyde de carbone et dioxyde de soufre produit pendant le chauffage.

En effet considérant l'énergie à produire égale à 38 ,25 GW, il faudrait environ 3017275,38Kg de mazout. À partir de ce résultat nous pouvons déterminer les quantités de polluant produit (voir tableau 17)

Tableau 16: *Quantité de CO₂, SO₂ , CO produit lors de la combustion du Mazout*

Combustible	Polluant (en kg)		
	CO ₂	SO ₂	CO
Mazout	9,523.10 ⁶	1,206.10 ⁶	6,058.10 ⁶

Les valeurs présentés dans le tableau ci-dessus pour 100 000 ménages sont considérable au regard des émissions mondiale de CO₂ évaluer à 31,5 milliards de tonnes en 2020 selon les estimations de L'AIE agence internationale de l'énergie. Nous disons qu'elle est considérable puisque si nous considérons la population française estimée à 67,39 millions en 2020 cela correspondrait à 1,063 milliard de tonnes de CO₂ qui serait réduit.

Tableau 17: pouvoir calorifique et chaleur de combustion de quelques combustibles.

Combustible	Chaleur de combustion par kg, litre ou Nm ³			Pouvoir calorifique inférieur par kg, litre ou Nm ³		
	kilocalorie	kilojoule	kilowattheure	kilocalorie	kilojoule	kilowattheure
Pétrole lampant	11082 kcal/kg	46398 kJ/kg	12,888 kWh/kg	10332 kcal/kg	43260 kJ/kg	12,016 kWh/kg
	8900 kcal/l	37262 kJ/l	10,351 kWh/l	8295 kcal/l	34730 kJ/l	9,647 kWh/l
Gasoil de chauffage	10900 kcal/kg	45636 kJ/kg	12,677 kWh/kg	10200 kcal/kg	42705 kJ/kg	11,863 kWh/kg
	9150 kcal/l	38309 kJ/l	10,641 kWh/l	8550 kcal/l	36000 kJ/l	9,945 kWh/l
Gasoil extra – EN 590	10900 kcal/kg	45636 kJ/kg	12,677 kWh/kg	10200 kcal/kg	42705 kJ/kg	11,863 kWh/kg
	9150 kcal/l	38309 kJ/l	10,641 kWh/l	8550 kcal/l	36000 kJ/l	9,945 kWh/l
Fioul lourd	10350 kcal/kg	43333 kJ/kg	12,037 kWh/kg	9800 kcal/kg	41022 kJ/kg	11,397 kWh/kg
	9729 kcal/l	40733 kJ/l	11,315 kWh/l	9210 kcal/l	38561 kJ/l	10,711 kWh/l
Fioul extra-lourd	10175 kcal/kg	42601 kJ/kg	11,833 kWh/kg	9700 kcal/kg	40604 kJ/kg	11,281 kWh/kg
	8852 kcal/l	37061 kJ/l	10,295 kWh/l	8439 kcal/l	35332 kJ/l	9,814 kWh/l
Cokes	7100 kcal/kg	29726 kJ/kg	8,260 kWh/kg	6500 kcal/kg	27214 kJ/kg	7,560 kWh/kg
Anthracite	7800 kcal/kg	32657 kJ/kg	9,071 kWh/kg	7500 kcal/kg	31401 kJ/kg	8,722 kWh/kg
Propane (**)	24174 kcal/Nm ³	101200 kJ/Nm ³	28,11 kWh/Nm ³	22360 kcal/Nm ³	93600 kJ/Nm ³	26,00 kWh/ Nm ³
Butane (**)	31940 kcal/Nm ³	133700 kJ/Nm ³	37,14 kWh/Nm ³	29532 kcal/Nm ³	123600 kJ/Nm ³	34,34 kWh/ Nm ³
Electricité	–	–	–	860 kcal/kWh	3600 kJ/kWh	1 kWh
Gaz naturel L (*) (Stochteren)	8754,8 kcal/Nm ³	32168 kJ/Nm ³	10,18 kWh/Nm ³	7903,4 kcal/Nm ³	33084 kJ/Nm ³	9,19 kWh/Nm ³
Gaz naturel H(*) (gaz)	9847 kcal/Nm ³	41220 kJ/Nm ³	11,45 kWh/Nm ³	8892,4 kcal/Nm ³	37224 kJ/Nm ³	10,34 kWh/Nm ³

Les résultats ci-dessus présente soulève quelques problèmes. Nous allons donner dans la suite quelques suggestions afin de d'essayer de répondre à ces problèmes.

Suggestion

Les calculs effectués dans cette contribution prouvent clairement que la présence d'humidité entraîne une dépense d'énergie supplémentaire lors du processus de chauffage des bâtiments. De nombreux calculs sont effectués pour montrer l'impact de l'humidité dans le processus de chauffage. Pour remédier à cette situation, deux options s'offrent à ceux qui veulent construire une maison :

(i) - Construire avec du béton normal et couvrir l'ensemble des murs extérieurs avec des matériaux résistant à l'humidité. À titre d'exemple, nous pouvons citer le plastique solide qui est connu pour être parfait pour les conditions humides. Le plus gros problème est le prix relativement élevé du plastique solide et la technique nécessaire pour assembler les deux couches du mur.

(ii) - Dans la deuxième option, les cloisons intérieures sont en béton normal et toutes les parois extérieures sont en béton ponce. On peut, bien sûr, évoquer le prix relativement élevé du béton de pierre ponce. Cependant, ce coût est amorti pendant le processus de chauffage. De plus, nous

enregistrons un bénéfice environnemental important. En effet, en consommant moins d'énergie, l'environnement est moins agressé.

De notre point de vue, cette deuxième option devrait être la plus appropriée. Des calculs sont effectués pour encourager ou dissuader les gens à suivre cette direction. Cette approche leur sera bénéfique à long terme.

Des comparaisons sont effectuées pour montrer la différence entre les deux modes de construction. Des estimations globales sont réalisées. Les calculs effectués permettent de comparer les dépenses énergétiques allouées aux deux méthodes de construction impliquant le béton normal et le béton ponce.

Notre approche permet de conclure que le béton de pierre ponce a la capacité de mieux résister à l'humidité.

III. CONCLUSION

Nous avons dans cette partie présenté l'allure général des courbes donnant l'évolution de la masse volumique en fonction de la distance parcourue par le pétrole d'une part et l'impact des différents paramètres à savoir la compressibilité, la valeur initiale de la densité du pétrole et la perméabilité d'autre part sur la pollution au cours de la migration naturelle du pétrole en surface. Il ressort de tout ceci que tous les paramètres ci-dessus cités ont un impact sur le phénomène de diffusion du pétrole au travers de la roche. Cependant un paramètre s'est révélé être plus important que les autres. Il s'agit du coefficient de compressibilité ; ce dernier devrait donc faire l'objet d'une étude plus poussée. La deuxième partie de ce travail était consacré au chauffage des bâtiments par le mazout. L'objectif du travail était de déterminer l'influence de la teneur en humidité, de la température extérieure et du type de béton utilisé pour la construction sur l'énergie de chauffage. Nous avons déduit au travers des courbes que la puissance fournie pour le chauffage augmente avec la teneur en humidité. Nous avons établi que les petites températures extérieures sont associées à des puissances plus élevées fournies pour le chauffage. Nous avons démontré que la température à l'intérieur du mur du bâtiment augmente avec le taux d'humidité. Le type de béton utilisé est également déterminant dans cette approche. Nous économisons environ 50 % d'énergie en utilisant du béton ponce au lieu du béton normal. L'utilisation de bétons de qualité supérieure garantit le confort thermique et l'efficacité énergétique.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Il était question pour nous dans ce travail d'effectuer une modélisation des processus de migration ascensionnel du pétrole et du processus de chauffage des bâtiments à partir du mazout.

Pour le premier cas de figure, nous nous sommes intéressés à ce qui se passe après la catagenèse ; étape au cours de laquelle le craquage du kérogène conduit à la formation du pétrole et de gaz naturel. Nous avons vu que le pétrole ainsi formé engage son ascension vers la surface de la terre. Dans ce contexte, les sous-sols et les sols pourraient être contaminés par ce pétrole provenant soit de la roche mère, soit de la roche réservoir. Grâce à l'étude du processus de diffusion du pétrole, nous avons démontré que le système est gouverné par une équation fortement non linéaire. Nous avons réalisé que l'équation principale de diffusion dérivée ici ne pouvait pas être résolue analytiquement. Par conséquent, pour mieux comprendre le comportement du système, nous avons opté pour une approche numérique. La technique a consisté à introduire la méthode de Runge-Kutta de quatrième et cinquième ordre en utilisant le code DOPRI5 comme intégrateur. La discrétisation de l'espace a suivi la technique des volumes finis. Les calculs ont été faits en tenant compte de la nature de l'huile ainsi que du type de roche. Trois types de roche ont été considérés, une roche intacte, une roche argileuse et une roche sableuse. Les calculs ont impliqué également trois types de pétrole : le pétrole léger, le pétrole lourd et le pétrole extra-lourd. Nous avons supposé que le coefficient de perméabilité n'était pas constant mais qu'il était une fonction dépendant de la densité. Notre travail a été décrit comme suit : Au fur et à mesure que les hydrocarbures poursuivent leur migration vers la surface, nous évaluons leurs densités à différentes profondeurs sous la surface. Pour les différents types de pétrole considérés, nous avons tracé un certain nombre de courbes pour montrer la répartition du pétrole dans le sol et leur degré de pénétration.

La deuxième partie de ce travail était consacré au chauffage des bâtiments par le mazout. L'objectif du travail était de déterminer l'influence de la teneur en humidité, de la température extérieure et du type de béton utilisé pour la construction sur la quantité d'énergie de chauffage et par ricochet sur la production de gaz à effet de serre. Le principe fondamental de cette étude est de déterminer la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir la température intérieure à 20° C quel que soit le temps et quel que soit le type de conditions auxquelles sont confrontés les occupants. Ces conditions comprennent : la teneur en humidité du mur, la température extérieure et le type de béton. Pour se faire nous avons fait une étude détaillée de quelques

systèmes de chauffage au mazout. Nous avons étudié le mazout et analysé deux types de béton : le béton normal et le béton de pierre ponce. Partant de l'étude des transferts thermique, nous avons établi une modélisation physique de la diffusion de l'humidité dans les murs. Des calculs numériques ont été effectués à l'aide de l'intégrateur à pas variable Runge-Kutta de quatrième et cinquième ordre DOPRI5.

Les résultats obtenus en ce qui est de la migration tertiaire du pétrole ont démontré que le pétrole migre lentement et progressivement vers la surface du sol. Il faut un temps considérable pour parcourir une distance donnée. La répartition du pétrole dans la roche garde le même profil pour les différentes configurations analysées dans ce travail. Nous avons obtenu qu'au fur et à mesure que le pétrole pénètre dans la roche, lors de son mouvement ascendant, sa densité diminue progressivement. Nous avons observé qu'une augmentation du coefficient de compressibilité de la roche est suivie d'une augmentation de la vitesse de diffusion de l'huile. Ainsi, le type de sol joue également un rôle dans la distribution du pétrole. Par exemple, les pétroles peuvent atteindre la surface du sol plus facilement dans la roche argileuse que dans la roche intacte. Des calculs ont montré que le pétrole léger se déplace plus rapidement que le pétrole lourd. Le coefficient de perméabilité a un réel impact sur le processus de migration : la distance parcourue par le pétrole augmente avec le coefficient de perméabilité.

Les résultats issus de la modélisation du chauffage nous ont permis de déduire que la puissance fournie pour le chauffage augmente avec la teneur en humidité. Ainsi, la présence d'humidité entraîne des coûts énergétiques supplémentaires.

Nous avons établi que les petites températures extérieures sont associées à des puissances plus élevées fournies pour le chauffage. Nous avons observé que la température à l'intérieur du mur du bâtiment augmente avec le taux d'humidité. Le type de béton utilisé est également déterminant dans cette approche. Nous économisons environ 50 % d'énergie en utilisant du béton ponce au lieu du béton normal. L'utilisation de bétons de qualité supérieure garantit le confort thermique et l'efficacité énergétique.

Tout au long de ce travail, nous nous sommes principalement préoccupés du problème des sous-sols et des sols contaminés par le pétrole. De notre point de vue, un tel problème mérite d'être abordé parce que les sols contaminés, évidemment, ont un certain nombre d'effets nocifs sur la santé de l'homme. Lorsque le sol est contaminé par du pétrole, ils peuvent nuire à l'environnement d'origine. C'est très risqué de vivre dans les zones où les sols sont contaminés. En voici quelques exemples édifiants : la pratique de l'agriculture devrait être discutable dans de tels sites car le pétrole est tout aussi toxique pour les plantes que pour les humains. De

nombreux légumes peuvent absorber des contaminants pendant leur croissance. Donc, si vous cultivez des aliments dans un sol contaminé, il y a un risque que vos aliments soient également contaminés. Respirer de la poussière de sol contaminée peut causer des dommages physiques ou chimiques aux humains. Les humains peuvent être exposés aux hydrocarbures pétroliers en inhalant les vapeurs du sol contaminé. Un autre point qui peut être souligné est que, l'approvisionnement en eau dans un tel environnement peut exposer les utilisateurs à la pollution car le pétrole peut s'écouler à travers le sol et atteindre facilement les nappes d'eau phréatiques. Il convient donc d'être prudent quant à cette question de contamination des sols. Toute activité agricole doit être précédée d'une analyse préalable du sol, par exemple. De plus, si vous voulez construire une maison quelque part et y construire votre vie, des précautions doivent être prises pour vous assurer que l'environnement est sûr. Des vérifications doivent être faites pour confirmer que le sol ou le sous-sol n'est pas contaminé. Enfin, nous croyons fermement que les gens doivent être conscients de l'existence et de la manifestation de cette autre forme de contamination des sous-sols et des sols par le pétrole.

Il est un fait que la consommation mondiale d'énergie est basée principalement sur le pétrole. L'exigence perpétuelle d'une politique d'efficacité énergétique ne s'explique pas seulement par l'impact créé par la crise pétrolière mais surtout par des préoccupations environnementales. En effet, plus l'énergie est sollicitée pour l'accomplissement d'une tâche donnée, plus l'environnement est détruit. Il n'est pas inutile de rappeler que l'utilisation massive des sources d'énergie traditionnelles conduit naturellement à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone. Par la suite, l'humanité est exposée au réchauffement climatique. La crise énergétique est donc étroitement liée à la crise environnementale. La capacité de chaque individu à minimiser la quantité d'énergie utilisée, en toute circonstance, devrait être notre objectif universel. Ce travail a proposé une méthodologie consacrée à la recherche de conditions plus précises qui pourraient nous permettre de minimiser la quantité d'énergie fournie pour le chauffage des bâtiments. Aucune vie ne peut être imaginée dans un bâtiment, pendant la période hivernale, sans énergie. L'implication des politiques internationales et nationales est essentielle pour promouvoir une utilisation plus efficace de l'énergie. Dans ce sens, la construction de bâtiments devrait nécessiter un besoin urgent d'une architecture et d'une ingénierie de qualité supérieure. Nous devons concentrer notre attention sur des solutions à long terme pour faciliter la tâche de la population. Les gouvernements respectifs et les organisations internationales devraient, naturellement, offrir la possibilité de

vivre dans des maisons répondant à des normes de qualité plus élevées. Cette option contribuera à réduire, de manière significative, la quantité d'énergie dépensée pour le chauffage.

Enfin, nous pensons que notre contribution aura un impact sur les études futures sur le processus de chauffage des bâtiments.

Nous nous proposons dans nos travaux futurs de prendre en compte dans la modélisation du processus de migration du pétrole, les différents types de couches de roches traversés par le pétrole lors de son ascension vers la surface.

Bibliographies

ALANI H. G., KENNEDY H.T. (1960). Volume of liquid hydrocarbons at high temperatures and pressures. Transactions of the AIME. vol. 219, p. 288-292.

Alexander, M., (2000). Aging, Bioavailability, and Overestimation of Risk from Environmental Pollutants. Environ. Sci. Technol. 34, 4259–4265. <https://doi.org/10.1021/es001069+>

Artemieva, I. M., & Mooney, W. D. (2002). On the relations between cratonic lithosphere thickness, plate motions, and basal drag. Tectonophysics, 358(1-4), 211-231.

Arzayus, K.M., Dickhut, R.M., Canuel, E.A., (2001). Fate of Atmospherically Deposited Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Chesapeake Bay. Environ. Sci. Technol. 35, 2178–2183. <https://doi.org/10.1021/es001672s>

Atkinson K. A., (1998) “An Introduction to Numerical Analysis (2nd ed.),” John Wiley and Sons, ISBN 0-471-50023-2.), Chapter 3.

AURADOU H., MÅLØY K.J., SCHMITTBUHL J., HANSEN A., BIDEAU A. (1999). Competition between correlated buoyancy and uncorrelated capillary effects during drainage. Physical review E. vol. 60, n° 6, p. 7224-7234.

AYDIN Attila. (2000) Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow. Marine and Petroleum Geology. vol. 17, p. 797-814.

Barrell, J. (1914). The strength of the Earth's crust. The Journal of Geology, 22(7), 655-683.

BEAR J. and BACrmtAr Y . (1990). Introduction to modeling of transport phenomena in porous media, Vol . 4, Kluwer, Dordrecht, the Netherlands.

BERG R.R. (1975) Capillary pressures in stratigraphic traps. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin. vol. 59, n° 6, p. 939-956

Bocard (2006) – Marées noires et sols pollués par des hydrocarbures, Enjeux environnementaux et traitement des pollutions, IFP publications, Ed TECHNIP.

Bouderhem, A., Khelil, A.O.E.H., 2017. Isolation and characterization of crude oil degrading bacteria from soil of Ouargla (Algeria).

BURRUS J. (1997). Contribution à l'étude du fonctionnement des systèmes pétroliers : apport d'une modélisation bidimensionnelle. Thèse : hydrologie et hydrogéologie quantitative : Ecole des mines de Paris. 602 p.

Cammerer J., Achtziger J., (1985) “Effect of the moisture content on the thermal

conductivity of building materials and insulation products,” *Kurzberichte aus der Bauforschung*, Bericht no. 115: pp. 491-494,. https://doi.org/10.1007/978-3-540-32218-4_24

Carmeliet J., Janssen H., Derluyn H., (2007) “An improved moisture diffusivity model for porous building materials,” *Proceedings of the 12th Symposium for Building Physics*, Dresden, Germany, March,.

CARRUTHERS D. (1998). *Transport modelling of secondary oil migration using gradient-driven invasion percolation techniques*. Ph.D. Dissertation: Heriot-Watt University, Edinburgh, U.K. 288 p.

CATALAN L., XIAOWEN F., CHATZIS F., DULLIEN F.A.L. (1992). An experimental study of secondary oil migration. *AAPG Bulletin*. vol. 76, p. 638-650.

Chaîneau, C. h, J.I, M., J, O., (1996). Land treatment of oil-based drill cuttings in an agricultural soil. *J. Environ. Qual.*

Chapple, W. M. and Tullis, T. E. (1977). Evaluation of the forces that drive the plates. *Journal of geophysical research*, 82(14) :1967–1984,

Charney J. G., Fjortoft R., Von Neumann J . (1950) “Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation,” *Tellus*, vol. 2, no. 4, pp. 237-254.

Chiapusio, G., Pujol, S., Toussaint, M.-L., Badot, P.-M., Binet, P., (2007). Phenanthrene toxicity and dissipation in rhizosphere of grassland plants (*Lolium perenne* L. and *Trifolium pratense* L.) in three spiked soils. *Plant Soil* 294, 103–112.

Christensen, N. I., & Mooney, W. D. (1995). Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B6), 9761-9788

Communication on the State of the Energy Union, 2016

Crank J., Nicolson P. (1947) “ A Practical Method for Numerical Evaluation of Solutions of Partial Differential Equations of Heat Conduction Type,” *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 43, pp. 50-67,. doi:10.1007- BF02127704.

Damendrail (2000) - *Pollution localisée des sols et sous-sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés*, Partie 1, le constat de la contamination et de ses effets, chapitre II, Activités et sources de pollution, Académie des sciences, rapport n° 44, Edition Tec&Doc.

David Urbinato, (1994) « London's Historic "Pea-Soupers" » [archive], United States Environmental Protection Agency, « Deadly Smog » [archive], PBS,

Dupuy, J., (2014). *Interactions entre les hydrocarbures aromatiques polycycliques et les plantes supérieures : prélèvement et réponses toxiques*. Université de Lorraine.

EHRHARDT, M., ET A. DOUABUL. (1989). Dissolved petroleum residues and alkylbenzene photooxidation products in the upper arabian gulf . *Marine Chemistry*, vol. 26, no 4, p. 363-370.

ENGLAND W.A., MACKENZIE A.S., MANN D.M., QUIGLEY T.M. (1987). The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface. *Journal of the Geological Society*, London. vol. 144, p.327-347.

England, P., & Jackson, J. (1989). Active deformation of the continents. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 17(1), 197-226.

Eom, I.C., Rast, C., Veber, A.M., Vasseur, P., (2007). Ecotoxicity of a polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)-contaminated soil. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 67, 190–205. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2006.12.020>

Fingas, M., (2012). *The Basics of Oil Spill Cleanup* [WWW Document]. CRC Press. URL <https://www.crcpress.com/The-Basics-of-OilSpillCleanup/Fingas/p/book/9781439862469>.

FLEKKØY E.G., SCHMITTBUHL J., LØVHOLT F., OXAAL U., MÅLØY K.J., AAGAARD P. (2002). Flow paths in wetting unsaturated flow : experiments and simulations. *Physical review E*. vol. 64, n° 3, p. 036312.1-036312.9

Forsyth, D., & Uyedaf, S. (1975). On the relative importance of the driving forces of plate motion. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 43(1), 163-200

GLUYAS J., SWARBRICK R. (2004) *Petroleum geoscience*. Blackwell scientific publications. 359 p

Gruyer, N., Groleau, P.-E., Triffault-Bouchet, G., Ouellet, A., Dupont, F. (2015). *Hydrocarbures pétroliers : caractéristiques, devenir et criminalistique environnementale* - URL <https://docplayer.fr/52397786-Hydrocarbures-petroliers-caracteristiques-devenir-et-criminalistique-environnementale.html>.

Guibet, (1997)- *Carburants et moteurs*. Publications de l'Institut Français du Pétrole, vol 1.

Hairer E., Norsett S. P., Wanner G. (1987) *Solving Ordinary 1235 Differential Equations I,* Springer-Verlag, Berlin. <https://www.springer.com/gp/book/9783540566700>

HANTSCHHEL T., KAUERAUF A.I. (2009). *Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling*. Springer, 476 p.

Harmens, H., Foan, L., Simon, V., Mills, G. (2013). Terrestrial mosses as biomonitors of atmospheric POPs pollution: a review. *Environ. Pollut. Barking Essex* 1987 173, 245– 254. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.10.005>

Hassanshahian, M., Cappello, S. (2013) 'Crude oil biodegradation in the marine environments,' Biodegradation-Engineering and Technology, InTech, 101 -135.

Hasting M.C & Popper A.N. (2005). effects of sound on fish. Report prepared by Jones & stokes for California Departement of transportation, Contract N0, 43A0139 ? Task Order 1.

HILIP J .R . and de VRiEs D .A. (1957), Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Trans . Am . Geophys . Un . 38,222-232 .

Hill, A.J., Ghoshal, S., (2002). Micellar Solubilization of Naphthalene and Phenanthrene from Nonaqueous-Phase Liquids. Environ. Sci. Technol. 36, 3901–3907. <https://doi.org/10.1021/es011175r>

HINGA, K. R., ET M. E. Q. PILSON. (1987). Persistence of benz[a]anthracene degradation products in an enclosed marine ecosystem. Environmental Science & Technology, vol. 21, no 7, p. 648-653.

John D. Spengler et K. A. Sexton. (1983). Indoor Air Pollution: A Public Health Perspective, Science, vol. 221, n° 4605, p. 9–17 [p. 9] (DOI 10.1126/science.6857273)

Journal of Computational and Applied Mathematics. (1986). Dormand-Prince Method, vol. 15, no. 2, pp. 203-211. <https://dl.acm.org/toc/jcam/1986/15/2>

JUKIC, A. (2013). Petroleum Refining and Petrochemical Processes. Faculty of Chemical Engineering and Technology, Université de Zagreb.

Jun Feng Wang, (2008) Permeability Prediction of Fibrous Porous Media in Aa Bi-Periodic Domain », journal of composite materials, sage publication, vol. 42,

Kearey, P., Klepeis, K. A., & Vine, F. J. (2013). Global tectonics. John Wiley & Sons.

Kreemer, C. (2009). Absolute plate motions constrained by shear wave splitting orientations with implications for hot spot motions and mantle flow. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 114(B10).

Krein, A., Schorer, M., (2000). Road runoff pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons and its contribution to river sediments [WWW Document]. Water Res. URL <https://eurekamag.com/research/003/551/003551275.php>

Kunzel H. (1986). Does the volume-related or the mass-related moisture content determine the thermal conductivity of building materials?, “ Bauphysik, vol. 8, no. H.2, pp. 33-39. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00801345>

Lallemand, S. (1999). La subduction océanique. Pour la Science, (259), 108.

Le Ha Hoang.(2007) Contribution à la modélisation tridimensionnelle des interactions champ électromagnétique – corps humain en basses fréquences. Energie électrique. Ecole Centrale de Lyon. Français.tel-00203230

Le Pichon, X. (1968). Seafloor spreading and continental drift. *Journal of Geophysical Research*, 73(12), 3661- 3697.

Lemière, B., Seguin, J.J., Le Guern, C., Guyonnet, D., Baranger, Ph., Saada, A. (2008). Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes Applications dans un contexte de gestion des impacts sur les eaux souterraines - URL <http://docplayer.fr/15688253-Guide-sur-le-comportement-des-polluants-dans-lessols-et-les-nappes-applications-dans-un-contexte-de-gestion-des-impacts-sur-leseaux-souterraines.html>.

LENORMAND R. (1981) Déplacements polyphasiques en milieux poreux sous l'influence des forces capillaires. Etude expérimentale et modélisation de type percolation. 352 p. Thèse : Institut National Polytechnique de Toulouse.

Léon Wenger. (1968) 55 ans de pétrole 1904-1959, Fabre, 246 p

Liu, R., Dai, Y., Sun, L. (2015). Effect of Rhizosphere Enzymes on Phytoremediation in PAH Contaminated Soil Using Five Plant Species. *PLoS ONE* 10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120369>

LUO X.R., YAN J.R., ZHOU B., HOU P., WANG W., VASSEUR G. (2008) Quantitative estimates of oil losses during migration, part II: measurement of the residual oil saturation in migration pathways. *Journal of Petroleum Geology*. Vol. 31, n° 2, p. 179-190.

MAGOON L.B., DOW W.G. (1984) The Petroleum System – From Source to Trap. In L.B. *AAPG Memoir* 60. 655 p.

Maliszewska-Kordybach, B., Klimkiewicz-Pawlas, A., Smreczak, B., Janusauskaite, D., (2007). Ecotoxic Effect of Phenanthrene on Nitrifying Bacteria in Soils of Different Properties. *J. Environ. Qual.* 36, 1635–1645. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0118>

McKenzie, D. P., & Parker, R. L. (1967). The North Pacific: an example of tectonics on a sphere. *Nature*,216(5122), 1276.

McLennan, S. M., & Taylor, S. R. (1996). Heat flow and the chemical composition of continental crust. *The Journal of Geology*, 104(4), 369-377

Mekhalif, F., (2009). Réutilisation des eaux résiduaires industrielles épurées comme eau d'appoint dans un circuit de refroidissement. URL <https://docplayer.fr/17452529-Memoire-de-magister-reutilisation-des-eaux-residuaires-industrielles-epureescomme-eau-d-appoint-dans-un-circuit-de-refroidissement.html>.

Melbye, A.G., Brakstad, O.G., Hokstad, J.N., Gregersen, I.K., Hansen, B.H., Booth, A.M., Rowland, S.J., Tollefsen, K.E. (2009). Chemical and toxicological characterization of an unresolved complex mixture-rich biodegraded crude oil. *Environ. Toxicol. Chem.* 28, 1815–1824. <https://doi.org/10.1897/08-545.1>

Morgan, W. J. (1968). Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. *Journal of Geophysical Research*, 73(6), 1959-1982.

NEFF, J. M., S. OSTAZESKI, W. GARDINER ET I. STEJSKAL. (2000). « Effects of weathering on the toxicity of three offshore Australian crude oils and a diesel fuel to marine animals ». *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 19, no 7, p. 1809-1821.

Nelson, K. D., Zhao, W., Brown, L. D., Kuo, J., Che, J., Liu, X., ... & Kind, R. (1996). Partially molten middle crust beneath southern Tibet: synthesis of project INDEPTH results. *Science*, 274(5293), 1684-1688.

Norini, M.-P., (2007). Ecodynamique des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et des communautés microbiennes dans des sols à pollution mixte (HAP, métaux) avant et après traitement par biopile et par désorption thermique: Influence de la rhizosphère et de la mycorhization 303.

Ouvrard, S., Leglize, P., Morel, J.L. (2014). PAH Phytoremediation: Rhizodegradation or Rhizoattenuation? *Int. J. Phytoremediation* 16, 46–61. <https://doi.org/10.1080/15226514.2012.759527>

PEDERSEN K.S., FREDENSLUND AA., CHRISTENSEN P.L., THOMASSEN P. (1984) Viscosity of crude oils. *Chemical Engineering Science*. Vol. 39, n° 6, p. 1011-1016.

Pimsee, P., (2014). Étude du comportement des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) lors du déversement accidentel d'hydrocarbures en eaux continentales (phd)

PURCELL W.R. (1949). Capillary pressures-their measurement using mercury and the calculation of permeability. *Transactions of the AIME*. Vol. 186, p. 39-48

Qiu, X., Leland, T.W., Shah, S.I., Sorensen, D.L., Kendall, E.W. (1997). Field Study: Grass Remediation for Clay Soil Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, in: *Phytoremediation of Soil and Water Contaminants*, ACS Symposium Series. American Chemical Society, pp. 186–199. <https://doi.org/10.1021/bk-1997-0664.ch014>

Reilley, K.A., Banks, M.K., Schwab, A.P. (1996). Organic chemicals in the environment, dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Rhizosphere. *J. Environ. Qual.* 25. <https://doi.org/10.2134/jeq1996.00472425002500020002x>

Rudnick, R. L., & Fountain, D. M. (1995). Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Reviews of geophysics*, 33(3), 267-309.

- Rudnick, R. L., & Gao, S. (2003). Composition of the continental crust. *Treatise on geochemistry*, 3, 659.
- Russo, R. M., & Silver, P. G. (1996). Cordillera formation, mantle dynamics, and the Wilson cycle. *Geology*, 24(6), 511-514.
- Sainson, Stéphane (2010). Les diagraphies de corrosion. Editions Lavoisier La première des Schlumberger [archive du 16 février 2016], sur Le Musée du pétrole
- Schatzman M. (2002). *Numerical Analysis: A Mathematical Introduction*, Clarendon Press, Chapter 4, Oxford. ISBN 0-19-850279-6, 2002
- SCHOWALTER T.T. (1979). Mechanics of hydrocarbon secondary migration entrapment. *AAPG Bulletin*. Vol. 63, p. 723-760.
- Simo E., Dzali Mbeumo P. D., Mbami Njeuten J. C., (2017) Moisture transfer in concrete: numerical determination of the capillary conductivity coefficient,” *Slovak Journal of Civil Engineering*, vol. 25, no. 1, pp. 10-18, 2017. DOI:10.1515/sjce-2017-0002
- Solenn Hertgen. (2018). Comportement mécanique des roches et dynamique des lithosphères dans les zones de convergence. *Sciences de la Terre*. Université Rennes 1. Français. NNT: 2018REN1B070. tel-02372938)
- Soltani (2004) - Distribution lipidique et voies métaboliques chez quatre bactéries Gram-négatives hydrocarbonoclastes. Variation en fonction de la source de carbone, Thèse de doctorat de l'Université de Paris 6.
- Somoza, R., & Ghidella, M. E. (2005). Convergencia en el margen occidental de América del Sur durante el Cenozoico: subducción de las placas de Nazca, Farallón y Aluk. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60(4), 797-809. Somoza et Ghidella.
- SPEIGHT, J. G. (2014). *The Chemistry and Technology of Petroleum – Fifth Edition*. CRC Press, États-Unis, 984 p.
- STANDING M., KATZ D. (1942). Density of natural gases. *Transactions of the AIME*. Vol. 146, p. 140-149.
- Stéphane Sainson. (2012) *Electrographies de fond de mer. Une révolution dans la prospection pétrolière*,
- Sun, S. S., & McDonough, W. S. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1), 313-345.
- Sungmin Hong et al. (1996). History of Ancient Copper Smelting Pollution During Roman and Medieval Times Recorded in Greenland Ice », *Science*, vol. 272, n° 5259, p. 246–249 [p. 248 (DOI 10.1126/science.272.5259.246

Sverdrup, L.E., Ekelund, F., Henning Krogh, P., Nielsen, T., Johnsen, K. (2002). Soil microbial toxicity of eight polycyclic aromatic compounds: effects on nitrification, the genetic diversity of bacteria, and the total number of protozoans. *Environ. Toxicol. Chem.* 21, 1644. [https://doi.org/10.1897/1551-5028\(2002\)021<1644:SMTOEP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1897/1551-5028(2002)021<1644:SMTOEP>2.0.CO;2)

SYLTA Ø. (2004). Hydrocarbon migration modelling and exploration risk. 200 p. Doctoral thesis: Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.

Sylvie Pegaz-Fiornet. (2011) ETUDE DE MODELES POUR LA MIGRATION DES HYDROCARBURES DANS LES SIMULATEURS DE BASSIN. Analyse classique [math.CA]. Université d'Aix-Marseille,. Français. ffel-01451247f

Taoukil D., – Abdelmajid E. I., Bouardi – Friedrich S., – Abdelaziz M., – Hassan E., - Taib A. (2013). Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood–concrete composite,” *Construction and building materials*, vol. 48, pp. 104-115.

Técher, D. (2011). Réhabilitation de sols pollués par des HAP grâce aux bactéries associées à la rhizosphère de *Miscanthus X giganteus*.

THOMAS M.M., CLOUSE J.A. (1995). Scaled physical model of secondary oil migration. *AAPG Bulletin*. Vol. 79, n° 1, p. 19-29.

Turcotte, D. L., & Schubert, G. (2002). *Geodynamics*, 456 pp.

UNGERER P., BURRUS J., DOLIGEZ B., CHENET P.Y., BESSIS F. (1990) Basin evaluation by integrated two-dimensional modeling of heat transfer, fluid flow, hydrocarbon generation, and migration. *AAPG Bulletin*. Vol. 74, n° 3, p. 309-335.

Vine, F. J., & Matthews, D. H. (1963). Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, 199(4897), 947-949.

WATTS N.L. (1987). Theoretical aspects of cap-rock and fault seals for single and two phase hydrocarbon columns. *Marine and Petroleum Geology*. Vol. 4, p. 274-307.

Wegener, A. (1912). Die entstehung der kontinente. *Geologische Rundschau*, 3(4), 276-292.

Wi-irrAKaR S. (1977), Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media : A theory of drying porous media, *Adv . Heat Transfer* 13, 119-200 .

ZEBERG-MIKKELSEN C.K. (2001). Viscosity study of hydrocarbon fluids at reservoir conditions. 366 p. Ph.D. thesis: Chemical engineering. Technical university of Denmark, Lyngby, Denmark.

Zimmerman Dr. R. W. (2003) M.Sc. in Petroleum Engineering Flow in Porous Media. Imperial College of London

Zmirou D., Beausoleil de Coninck P., Déportes I., Dor F., Empereur Bissonet P., Hours M., Keck G., Lefebvre L. et Rouisse L. (2003). Déchets et sols pollués. Environnement et santé publique - Fondements et pratiques, pp. 397-440.

Liste des publications

- *Christophe Songong Tsakeu, Elie Simo, Josue Ivan Charles Zambe, Steve Franklin William Tabekoueng, Stephane Nguifo Sob , "Building Heating Process: Numerical Analysis of the Impact of Moisture and the Type of Concrete," Civil Engineering and Architecture, Vol. 9, No. 6, pp. 1785-1797, 2021. DOI: 10.13189/cea.2021.090612.*
- *Simo, E., Watia, J.S.K, **Songong Tsakeu, S.C.**, and Talla, P.K. (2019) "Soils' Pollutions by Petroleums Accounting for Biodegradation and Concentration-Dependent Diffusivity," Int. J.Adv. Engineering Res. Sci, 6(2), 214-228.*
- *Simo, E., Watia, J.S.K, **Songong Tsakeu, S.C.**, Zambe, J.I.C, Kamdem, G.R.S., and Tabekoueng, F.W. (2019) "Migration of petroleum hydrocarbons from ground surface to groundwater accounting for a liquid Arrhenius model," Int. Res. J. Public Environ. Health, 6 (7): 144-154.*
- *Simo, E., **Watia, J.S.K, Songong Tsakeu, S.C.**, Donfack, L.B.K., Wafo, M. E.M., and Talla, P. K. (2020) "Soils and sub-soils contamination: migration of petroleum to the groundsurface accounting for variable permeability coefficient in compressible rocks, " GSI, 8(4): 1673-1692.*