

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



THÈSE
PRESENTÉE A

L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE KOUBA – ALGER
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

POUR OBTENIR LE DIPLOME DE

DOCTEUR EN SCIENCES

SPÉCIALITÉ : PHYSIQUE
OPTION : PHYSIQUE THÉORIQUE

PAR

BENTRIDI SALAH-EDDINE

**MODÉLISATION ET SIMULATION NUMÉRIQUE D'UN MILIEU
MULTIPLICATEUR DE NEUTRONS PAR LES MÉTHODES DE
MONTE-CARLO :
CAS DE LA ZONE DE REACTION N°9 A OKLO (GABON)**

Soutenue le jeudi 13 septembre 2012, devant le jury :

KHIARI Chems-Eddine	E.N.S (Kouba-Alger)	Président
BELGAID Mohamed	U.S.T.H.B (Alger)	Examineur
GALL Benoît	IPHC/UDS (Strasbourg)	Examineur
GAUTHIER-LAFAYE François	LHyGeS (Strasbourg)	Examineur
SEGHOOR Abdeslam	C.R.N.A (Alger)	Directeur de thèse
MEDJADI Djamel-Eddine	E.N.S (Kouba-Alger)	Codirecteur de thèse

Table de Matière

Introduction	5
Chapitre 1 : Le phénomène Oklo	10
1. Historique du phénomène Oklo.....	11
1.1 Hypothèse d'un réacteur naturel à fission nucléaire.....	11
1.2. Découverte du phénomène.....	12
2. Rappels géologiques sur le site.....	14
2.1. Situation du gisement d'Oklo au Gabon.....	15
2.2. Description du gisement et de son environnement.....	17
2.3. La couche minéralisée « C1 ».....	19
3. Les réacteurs fossiles.....	24
3.1. Chronologie et cartographie des réacteurs fossiles d'Oklo.....	24
3.2. Caractéristiques des réacteurs d'Oklo.....	26
3.2.1. <i>Faciès pile</i>	26
3.2.2. <i>Argile de pile</i>	28
4. Présentation de la zone de réaction n°9 (RZ9).....	29
4.1. Découverte des zones 7, 8 et 9 et travaux ultérieurs.....	29
4.2. Description et spécificités de la RZ9.....	30
5. Chronologie des événements géologiques conduisant à la formation des réacteurs et à leur conservation.....	35
5.1. Formation des gisements d'uranium.....	35
5.1.1. <i>L'histoire pétrolière</i>	35
5.1.2. <i>L'événement oxydant : la mise en place des minéralisations uranifères</i>	37
5.2. Formation d'amas riches en uranium, déclenchement des réactions.....	37
5.3. Préservations des réacteurs.....	39
Chapitre 2 : Neutronique des réacteurs nucléaires	41
1. La fission nucléaire.....	43
1.1. Principe de la fission.....	43
1.2. Section efficace, spectres neutroniques.....	44
1.3. Les produits de la réaction de fission et « yields ».....	49
1.4. Réaction en chaîne et chaleur de réaction.....	54

2. Description et Physique des REP	52
2.1. Circuit primaire et secondaire du REP.....	53
2.2. Cœur du réacteur.....	53
2.3. Enrichissement et conversion en U5.....	55
2.4. Appauvrissement du combustible	56
3. Contrôle des Réacteurs	58
3.1. Le Bore	58
3.2. Barre de commande	58
3.3. Poisons consommables	59
3.4. Poisons générés et leur dynamique.....	60
3.5. Effets thermiques.....	62
3.6. Bilan neutronique et fonctionnement du cœur	64
4. Particularités d’Oklo.....	65
4.1. Conditions initiales.....	65
4.2. Produits de fission.....	66
4.3. Energie générée et régénération de l’U5.....	67
4.4. Thermique d’Oklo.....	68
4.5. Migration de la matière organique.....	69
4.6. Pyrolyse de la matière organique.....	70
Chapitre 3 : Modélisation du RZ9	72
1. Hypothèses de l’état initial des réacteurs.....	74
2. Paramètres de modélisation.....	76
2.1. Paramètres géométriques.....	76
2.2. Paramètres physiques.....	77
3. Modèle géométrique.....	81
3.1. Cœur initial sans réflecteurs.....	81
3.2. Cœur avec réflecteurs.....	81
3.3. Modélisation de fracture diagonale.....	82
3.4. Modélisation de fracture coplanaire.....	84
4. Le modèle physique.....	84
4.1. Matrice mère de la couche minéralisée.....	85
4.1.1. <i>Partie solide de la matrice mère</i>	85

4.1.2. partie fluide de la matrice mère.....	88
4.2. Minerai initial riche.....	88
4.3. Source des neutrons.....	91
4.4. Poisons initiaux et équivalence en B10.....	92
Chapitre 4 : Influence des paramètres physiques sur la réactivité	96
1. Simulation numérique.....	97
1.1. Le facteur de multiplication effectif keff et le protocole de calcul de criticité.....	98
1.1.a. Définition de source de neutrons.....	99
1.1.b. Définition de matériaux.....	101
1.1.c. Traitement thermique $S(\alpha,\beta)$	101
1.1.d. Calcul de criticité.....	102
1.2. Premiers tests de simulations.....	103
1.2.a. Sphère critique.....	103
1.2.b. Distances caractéristiques.....	104
1.2.c. Etude de modérateur : eau et matière organique.....	109
2. Etude paramétrique de criticité.....	113
2.1. Epaisseur nécessaire.....	114
2.2. Concentrations d'uranium.....	118
2.3. Effet de modérateur.....	120
3. Configurations critiques et ligne isocritique.....	122
Chapitre 5 : Conditions de criticité	125
1. Configuration de cœur initial sans réflecteurs.....	127
2. configurations du cœur avec réflecteurs.....	132
2.1. Définition des réflecteurs.....	132
2.2. Effet de réflecteurs.....	135
2.2.1. Réflecteurs sans U.....	135
2.2.2. Réflecteurs avec U.....	136
3. Réacteurs avec poisons initiaux.....	138
3.1. Réflecteurs sans U et avec poison dans le cœur.....	138
3.2. Réflecteurs avec U et poisons et poisons dans le cœur.....	139
3.3. Configuration avec fracture.....	141

3.4. Démarrage des cœurs de petite taille.....	143
Chapitre 6 : Scénarios de démarrage des réacteurs d’Oklo	144
1. Bilan de réactivité.....	145
1.1. Noyau critique et contexte géologique.....	146
1.2. Influence des poisons initiaux et réserve de réactivité.....	147
1.3. Influence de la composition du modérateur.....	147
2. Démarrage des REP, Approche sous-critique.....	148
3. Scénarios de divergence.....	149
3.1. Divergence progressive.....	152
3.2. Divergence sur-critique.....	153
4. Variations de réactivité induite par l’évolution des paramètres influents	155
4.1. Scénario de divergence progressive d’un réacteur naturel.....	155
4.3. Scénario de divergence par saut de réactivité d’un réacteur naturel.....	158
5. Evolution à longue échelle d’un réacteur naturel divergé.....	158
5.1. Paramètres influant sur le bilan de réactivité.....	159
5.2. Scénarios possibles et bilans de réactivité	162
6. Mode de fonctionnement.....	165
7. Evolution spatiale des réacteurs divergés.....	166
7.1. Distribution thermique et distribution de flux.....	167
7.2. Extension spatiale des réacteurs.....	168
Conclusions et Perspectives	170
Références bibliographiques	176
Annexes	184
A1. Article “Inception and Evolution of Oklo natural nuclear reactors” CR Geoscience. [accepté le 30 sept. 2011: C. R. Geoscience 343 (2011) 738–748, doi:10.1016/j.crte.2011.09.008].....	185
A2. Article “Monte-Carlo Based Numerical Modeling and Simulation of Criticality Conditions Occurrence in Natural Reactor Zone 9 in Oklo Deposit (Gabon)”. Progress In Nuclear Science and Technology, Vol.2, pp.395-400(2011)	196

A3. Poster “On The Criticality Conditions of Oklo Natural Reactors in Gabon: Realistic Model of the Reaction Zone 9” Nuclear Science Symposium, NSS2011, 17-23 Oct. 2011, Valencia, Spain.....	203
A4. Papier soumis le 15 déc. 2011 “Criticality of Oklo Natural Reactors: Realistic Model of the Reaction Zone 9” au journal “Transactions on Nuclear Science” (IEEE).....	204

ملخص:

إن الظاهرة الطبيعية الإستثنائية المعروفة "بظاهرة أوكلو"، والتي تم إكتشافها سنة 1972 في مناجم اليورانيوم بمنطقة "أوكلو" الواقعة بالجنوب الغربي لجمهورية الغابون تعد الوحيدة من نوعها التي تتعلق بمفاعلات نووية طبيعية، تشكلت منذ ما يزيد عن ملياري سنة وتفاعلات لفترات زمنية تتراوح ما بين بضع ومئات الآلاف من السنوات. يتعلق الأمر بحوالي خمس عشرة مفاعل طبيعيا او ما اصطلح عليه بمنطقة التفاعل، رقمت حسب التسلسل الزمني لاكتشافها. هذا العمل يعطي بشكل جديد تفسيراً فيزيائياً متطابق مع الواقع والتاريخ الجيولوجي لهذه الظاهرة التي تعتبر حدثاً فريداً توافرت شروط حدوثه خلال نافذة زمنية محددة كانت العوامل الفيزيائية مجتمعة بشكل معجز لحدوثه واستمراره لعشرات الآلاف من السنوات. استناداً لبرمجيات المفاعلات النووية الحديثة والتي تستعمل طرق "Monte-Carlo" الإحصائية لإعادة تمثيل التفاعل النووي الإنشطاري في الأنظمة النووية، تمت نمذجة وتمثيل مجموعة من التشكيلات الممكنة فيزيائياً و جيولوجياً لتحديد شروط انطلاق التفاعلات الانشطارية و ديمومتها داخل هكذا منظومة جيولوجية. وانتهى هذا البحث بوضع منطقة معاملات يمكن من خلالها تفسير حدوث هذه الظاهرة من أصغر المفاعلات إلى أكبرها.

Résumé :

L'occurrence d'une quinzaine de zones de réaction (RZ) dans un milieu géologique reste un mystère quarante ans après sa découverte. Le présent travail donne pour la première fois une explication des évolutions ayant conduit au démarrage de ces coeurs au croisement de deux processus antagonistes, la concentration et l'appauvrissement progressif en ^{235}U .

Basé sur des techniques de simulation Monte-Carlo, il a été possible de définir à partir des paramètres influents tant physiques que géologiques, un espace de solutions réalistes justifiant la criticité et expliquant l'expansion, le fonctionnement et les conditions d'arrêt des plus petits aux plus gros réacteurs d'Oklo.

Abstract

Occurrence of more than fifteen Reactor Zones (RZ) in a geological medium remains a mystery forty years after its discovery. The present work gives for the first time an explanation of the evolutions that led to reactor startup at the crossing of two opposite processes, uranium concentration and progressive impoverishment in ^{235}U .

Based on Monte-Carlo techniques, a solution space was defined taking into account realistic combinations of relevant parameters acting on geological conditions and neutron-physics.

This work explains criticality occurrence, operation, expansion and even end of life conditions of Oklo natural nuclear reactors, from the smallest to the biggest one.