

Validation du projet de coopération par le directeur d'unité

Type de coopération : PICS

Année : 2012

N° Système : 161208

Référence :

Campagne : PICS 2012 

Titre de la coopération en français : Genèse et Dynamique des Réacteurs nucléaires naturels d'Oklo

Titre de la coopération en anglais : Natural Oklo Reactors Dynamics and Inception Modelization

Propriétés générales

Type de coopération : PICS

Titre du projet en français : Genèse et Dynamique des Réacteurs nucléaires naturels d'Oklo

Titre du projet en anglais : Natural Oklo Reactors Dynamics and Inception Modelization

Acronyme : NORDHEIM

Date de début du projet : 01/01/2013

Date de fin du projet : 31/12/2015

Liste des pays de la coopération : Algérie

Porteur de projet

Vos coordonnées

Nom : GALL

Prénom : Benoit

Téléphone :

Fax :

Courriel : benoit.gall@ires.in2p3.fr

Délégation régionale : Alsace

Section principale du Comité national : 03 Interactions, particules, noyaux du laboratoire au cosmos

Votre unité

Code et nom de l'unité : UMR7178 Institut pluridisciplinaire Hubert Curien

Adresse : IPHC 23, rue du Loess

Directeur : ROY Christelle 

Téléphone unité : 0388106659

Fax unité : 0388106292

Courriel unité : florence.diemer@ires.in2p3.fr

Délégation Régionale : Alsace

Institut : Institut national de physique nucleaire et de physique des particules

Section principale du Comité national :

Porteur du projet à l'étranger

Pays de la coopération : Algérie

Organismes d'appartenance du laboratoire principal à l'étranger

Réf. 	Nom organisme partenaire		Ville		Pays 

**Laboratoire principal à l'étranger**

Nom : Laboratoire de l'Energie et des Systèmes Intelligents
Sigle : LESI
Adresse : Route de Theniet El-Hed
CP : 44225
Ville : KHEMIS MILIANA
Pays : Algérie
Téléphone : +213 (0) 27 66 09 67
Fax :
Courriel : labolesi@gmail.com

Porteur du projet à l'étranger

Civilité : M.
Nom : BENTRIDJ
Prénom : Salah-Eddine
Fonction : Enseignant-Chercheur
Téléphone : +213 (0) 5 57 74 83
Fax :
Courriel : bentridisalah@gmail.com

Partenaires en France**Unité du porteur de projet**

UMR7178 Institut pluridisciplinaire Hubert Curien STRASBOURG CEDEX
2

Laboratoires partenaires en France

	CNRS ↕	Code ↕	Nom ↕	Ville ↕
	Oui	UMR7517	Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg	STRASBOURG CEDEX

Liste des participants

	Nom	Prénom	Grade/Fonction	Laboratoire d'origine	ETP(%)
	GALL	Benoit	Professeur des universités 2ème classe	Institut pluridisciplinaire Hubert Curien	30
	GAUTHIER LAFAYE	Francois	Directeur de recherche de 2ème classe titulaire	Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg	30

Partenaires à l'étranger**Laboratoire du porteur de projet à l'étranger**

LESI Laboratoire de l'Energie et des Systèmes Intelligents KHEMIS MILIANA

Laboratoires partenaires à l'étranger

Aucun laboratoire répertorié

Liste des participants

	Nom	Prénom	Fonction	Laboratoire d'origine	Pays	ETP(%)
⊙	Bentridi	Salah Eddine	Enseignant-Chercheur	Laboratoire de l'Energie et des Systèmes Intelligents	Algérie	40
⊙	Seghour	Abdeslam	Enseignant-Chercheur	Laboratoire de l'Energie et des Systèmes Intelligents	Algérie	10

Résumés (1000 caractères)

Résumé (français) :

Le démarrage et fonctionnement spontané d'une quinzaine de réacteurs nucléaires naturels il y a 2 milliards d'années à Oklo au Gabon représente une véritable énigme scientifique. Depuis sa découverte en 1972, des géologues, géochimistes et physiciens se sont penchés sur l'étude de ce phénomène exceptionnel. Bien préservé, ce site est devenu l'unique analogue naturel d'un site de stockage de déchets nucléaires radioactifs dans un milieu géologique et pendant des temps géologiques. Jusqu'alors seul le démarrage des plus gros cœurs a pu être expliqué. La collaboration NORDHEIM a réussi à lever le mystère des petits réacteurs et poursuit son étude au travers l'extension de sa modélisation numérique réaliste du réacteur RZ9 ancrée sur un calage expérimental des paramètres agissant sur les conditions géologiques et la neutronique du cœur tels que leur composition, porosité et homogénéité, les tailles initiales des cœurs et réflecteurs associés, ainsi que la composition en poisons initiaux.

Résumé (anglais) :

Spontaneous ignition and operating of about 15 natural nuclear reactors 2 billiards years ago in the Oklo site is still a scientific puzzle. Since its discovery in 1972, geologists, geochemists and physicists studied this exceptional phenomenon. Perfect preservation of the site, makes it the only analogue site of a nuclear waste deposit in a geological medium over geological times. Up to now only start up of the biggest reactors could be explained. The collaboration NORDHEIM recently succeeded in solving the mystery of small reactors and continues its study through the extension of a realistic numerical model of RZ9 reactor. This study finds its anchor points on relevant experimental parameters acting on geological conditions and neutron-transport physics such as ore homogeneity, initial reactor thickness, reflector effect and initial neutronics poison content.

Programme scientifique (10 000 caractères)

Description (français) :

1. Introduction

Le Phénomène Oklo touche une large communauté scientifique et un grand nombre de champs disciplinaires tels que la géologie, la géochimie, la neutronique et plus largement des problématiques telles que le stockage profond de radioéléments à vie longue. C'est donc un sujet complémentaire aux actions menées par l'IN2P3 dans l'aval du cycle électronucléaire. Depuis leur découverte des zones de réaction fossilisées, de nombreuses observations, analyses et études ont été effectuées nous permettant d'avoir une bonne connaissance des conditions dans lesquelles ces réacteurs ont démarré. Pourtant seuls le cas des plus gros réacteurs trouvant une explication jusqu'à l'an passé. Le progrès technologique des moyens de calcul numérique et le développement des codes de calcul de plus en plus performants ont placé l'étude physique du phénomène d'Oklo à notre portée. Ils offrent la possibilité de faire l'étude neutronique de ces réacteurs nucléaires, d'une manière détaillée, de rendre les modélisations de plus en plus réalistes.

2. La Collaboration NORDHEIM

Du nom de la fameuse courbe caractéristiques des réacteurs donnant la réactivité en fonction du temps de doublement, cette collaboration est le fruit d'un regroupement d'intérêts pluridisciplinaires original et pertinent. Une première étape de cette étude et de la modélisation de ces réacteurs a été déjà réalisée dans le cadre de la thèse de S.E Bentridi, sous la direction de A. Seghour du CRNA Alger et de D-E Medjadi de l'ENS Kouba-Alger. Cette thèse étant inscrite dans un programme d'accueil de chercheurs étrangers (Algérie), S.E. Bentridi a été accueilli par F. Gauthier-Lafaye au LHyGeS Strasbourg durant un an et demi, il a pu initier une collaboration avec B. Gall de l'IPHC Strasbourg. C'est l'union de toutes ces compétences et champs disciplinaires complémentaires et de la grande capacité de travail de l'impétrant qui a

permis une avancée significative dans la compréhension du phénomène Oklo. Les résultats de ces travaux ont donné lieu au mémoire de thèse de l'impétrant et à 3 publications dont une en cours et à deux présentations en conférences.

Ces travaux ont en outre donné lieu à un stage de master 2 à l'IPHC avec d'une part l'analyse d'échantillons issus de cœurs et parements de cœur d'Oklo et d'autre part la description de la dynamique des poisons au travers d'un traitement de type Runge-Kutta des équations différentielles sous-jacentes. Ces résultats devraient également se poursuivre et aboutir à une publication.

Cette collaboration se poursuit au-delà de cette thèse et donnera, nous l'espérons, lieu à une seconde thèse dans un avenir proche. L'ouverture de l'accès à la grille de calcul, ouvrant des possibilités nouvelles de prolongement du développement de la modélisation des cœurs d'Oklo, la collaboration se poursuit sur la base de séjours réguliers de S.E Bentriddi à Strasbourg ou de discussions par vidéoconférence. L'importance des résultats déjà obtenus additionnés aux possibilités de développement de l'approche actuelle ouvre de larges perspectives avec en premier lieu la rédaction d'un article à soumettre à la revue Nature.

3. La méthodologie

Ancrée sur les observations expérimentales nombreuses et riches des réacteurs et minerais d'Oklo, la présente approche s'attache à obtenir à l'aide de codes de simulations Monte-Carlo les conditions de criticité des réacteurs d'Oklo. Il fallait pour cela disposer à la fois des données les plus précises sur les variabilités des compositions des minerais d'Oklo (teneur en Uranium, porosité, teneur en poisons neutroniques, type et densité de matière organique, ...) des informations sur les tailles initiales des réacteurs considérés et des conditions de pression et température en vigueur à l'époque dans ce gisement.

Par ailleurs, il fallait remonter à la probable géométrie initiale des cœurs et en donner une transcription fidèle dans un modèle réaliste. La collaboration a dans un premier temps fait le choix de modélisation statique du réacteur RZ9 à l'aide du code MCNP utilisé pour les calculs de criticité de cœurs ou assemblages de recherche et industriels. Les temps caractéristiques en jeu dans le site d'Oklo étant tellement longs, cette hypothèse quasi-statique permet de donner une bonne première approche de la neutronique sous-jacente.

Dans ce cadre, la collaboration a pu aboutir à une description paramétrique de la criticité dans des zones de réaction de petite taille du type RZ9 et définir un volume minimal et une teneur d'uranium seuil compatible avec la criticité. Ceci a été fait en considérant les caractéristiques moyennée (ré-homogénéisées) de la roche qui a abritait ces réacteurs, et qui était essentiellement des pièges d'hydrocarbures, ce qui a donné lieu à des simulations numériques pour des modèles cylindriques homogènes avec des porosités propres à des roches réservoirs. Ceci est bien justifié par les caractéristiques du gisement d'Oklo, qui se trouve être le gisement pétrolier fossile le plus ancien connu. Les matières organiques contenues sont assez dégradées, mais ont pu piéger des quantités importantes d'uranium chargé par les eaux souterraines et accumuler ainsi dans certaines poches des masses critiques dans des volumes de l'ordre du mètre cube selon les observations.

A la croisée de ce lent enrichissement en uranium et de la progressive disparition de l'isotope 235, cette modélisation réaliste a pu expliquer la criticité du réacteur RZ9, en prenant en considération le voisinage des cœurs (comme réflecteurs) et les poisons initiaux constitués de terre rares (Sm et Gd).

4. Les objectifs

Forts de l'explication de la genèse, de l'apparition de la criticité, du fonctionnement et de l'extinction de ces cœurs basée sur une modélisation MCNP réaliste, la collaboration NORDHEIM souhaite prolonger et approfondir cette approche déterministe en raffinant le modèle établi pour RZ9 de manière à l'appliquer aux autres réacteurs du site et à lever le voile sur certains phénomènes non encore mis en lumière ou expliqués. Une étude systématique de chacun des cœurs de réacteurs naturels nous permettra également de classer ces derniers dans des catégories de comportement et de les approcher avec plus de pertinence.

Par ailleurs, si la durée phénoménale du fonctionnement de ces réacteurs qui s'étale sur des dizaines de milliers d'années voir même quelques centaines de milliers d'années pour les plus gros réacteurs semble justifier une approche quasi-statique, certaines phases de vie de ces réacteurs ont du induire des changements assez rapides. Seule une description dynamique, cadrée par une contextualisation précise, nous permettra de les appréhender et de répondre notamment à des questions sur les équilibres des poisons, les mouvements de modérateurs, les éventuels fonctionnements inconstants.

Ce phénomène motive encore beaucoup de questions encore sans réponses sur le contrôle de tels systèmes et leur dynamique sans contribution humaine. Malgré la faible puissance délivrée par ces réacteurs, leur évolution dans le temps ou leur lente expansion est assez instructive sur le plan physique et neutronique. La présente collaboration NORDHEIM se propose de tenter de répondre à un certain nombre d'entre elles :

Quelle est la dynamique des poisons neutroniques fissionogéniques (Xe et Sm) associés au fonctionnement de ces zones de réactions ?

Ces réacteurs ont-ils fonctionné d'une manière continue ou intermittente ?

Leur extension dans l'espace est-elle conditionnée uniquement par la réserve d'antiréactivité présente dans le minerai au voisinage des réacteurs, ou bien ces cœurs ont-ils fabriqué leurs

zones critiques en ramenant de plus en plus d'uranium au début par le mouvement des eaux chargées d'uranium dans les réseaux de fractures ?

Quel est le rôle dynamique de la matière organique dans le fonctionnement de ces réacteurs, du point de vue neutronique ?

Quelle a été l'efficacité de modération de cette matière organique ?

Quels ont été ses changements induits par le fonctionnement des réacteurs et leur influence sur ces derniers ?

Ces questions sans réponse feront l'objet de travaux de recherches de la présente collaboration, ainsi qu'un encadrement d'une thèse en cotutelle entre les deux parties, en continuité du travail déjà réalisé. De fait de leur avancement, ces travaux devraient rapidement déboucher sur la soumission d'une première publication dans Nature.

Description (anglais) :

See French Version.

Programme scientifique : [Programme scientifique de la collaboration NORDHEIM.pdf](#)

Résultats / Publications

Résultats déjà obtenus (10 000 caractères) :

Dans une étude qui entre dans le cadre d'une thèse de doctorat en physique, préparée en Algérie et en collaboration avec le laboratoire d'hydrologie et de géochimie de Strasbourg (LHyGeS) et l'Institut Pluridisciplinaires Hubert Curien (IPHC) de Strasbourg il a été possible d'étudier en détail le réacteur RZ9, de le modéliser et finalement d'en trouver les conditions réalistes de criticité. RZ9 étant typique des réacteurs de petite taille, cette explication a pu être extrapolée aux autres réacteurs d'Oklo. Ces travaux de recherches démarrés fin de 2009, et ont donc abouti à une première explication du démarrage réacteurs d'OKLO. Ils ont été publiés dans les articles suivants :

- Bentriddi, S.E., Gall B., Gauthier-Lafaye, F., Seghour, A., 2011. Monte-Carlo Based Numerical Modeling and Simulation of Criticality Conditions Occurrence in Neutral Reactor Zone 9 in Oklo Deposit (Gabon). Prog. Nuc. Sci. & Tech. Vol. 2.
- Bentriddi, S.E., Gall B., Gauthier-Lafaye, F. Seghour, A., Medjadi D.E., Inception and evolution of Oklo natural reactors. C. R. Geoscience. [343], 11, p738-748. (2011). Doi : 10.1016/j.crte.2011.09.008

Une troisième publication est en cours de révision après remarque des rapporteurs

- Bentriddi, S.E., Gall B., Gauthier-Lafaye, F. Seghour, A., Medjadi D.E., Criticality of Oklo Natural Reactors: Realistic Model of the Reaction Zone 9. Soumis à Transaction for Nuclear Science (IEEE) ; Avis favorable des rapporteurs moyennant corrections qui sont en cours.

Résultats attendus de la recherche (1 000 caractères) :

La collaboration NORDHEIM va s'attacher à trois voies de recherches identifiées :

- L'étude des conditions initiales avec une description la plus précise possible des conditions initiales de chacun des réacteurs nucléaires naturels, la mise en place d'un inventaire des différentes zones de réactions selon leur composition et géométrie et la définition de catégorie de réacteurs.
- L'étude des conditions de fonctionnement et d'arrêt et les éventuels accidents géologiques ou historiques ayant affecté leur fonctionnement avec un raffinement de la modélisation actuelle et l'adaptation à l'ensemble des situations typiques du site d'Oklo.
- L'étude dynamique des modèles de ces réacteurs avec la dynamique des poisons, de celle liée à d'éventuels mouvements de modérateurs, l'extension spatiale des structures critiques. Elle permettra d'appréhender d'une manière encore plus complète le phénomène Oklo, son déroulement temporel, son évolution spatiale et ses conditions d'arrêt.

Instituts

Institut

L'institut principal de l'unité est : IN2P3 - Institut national de physique nucléaire et de physique des particules

Le projet sera évalué par : IN2P3 - Institut national de physique nucléaire et de physique des particules

Pour les projets interdisciplinaires indiquez les autres instituts concernés :

Thématique (sections du comité national)

La thématique d'évaluation est par défaut : 3 - Interactions, particules, noyaux du laboratoire au cosmos

Vous avez demandé la thématique d'évaluation : -

Mots clefs (mots clefs du comité national)

Fiche Financière

BUDGET DEMANDE POUR LA DUREE DU PICS (EN K€)

Donnez une évaluation approximative des dépenses prévues pour ce programme de recherche. Joindre dans un document (partie Documents) une page indiquant le nom des missionnaires et la durée des missions et accueils ainsi que le cas échéant la nature des « autres dépenses »

En France

	Demande 1ère année	Demande 2nde année	Demande 3ème année	Total
Missions	2850	2850	4050	9750
Accueil (sous conditions de réciprocité)	2986	3858	2986	9830
Organisation des séminaires	0	0	0	0
Autres dépenses (à préciser dans un document (partie Documents)) dans la limite de 20% du budget	300	2800	300	3400
Total	6136	9508	7336	22980

Dans le pays partenaire

Missions

	Demande 1ère année	Demande 2nde année	Demande 3ème année	Total
	2850	2850	2850	9750
Accueil (sous conditions de réciprocité)	1700	1700	1700	5100
Organisation des séminaires	0	0	0	0
Autres dépenses (à préciser dans un document (partie Documents)) dans la limite de 20% du budget	1000	0	0	1000
Total	5550	4550	5750	15850

Dans le second pays partenaire

	Demande 1ère année	Demande 2nde année	Demande 3ème année	Total
Missions				
Accueil (sous conditions de réciprocité)				
Organisation des séminaires				
Autres dépenses (à préciser dans un document (partie Documents)) dans la limite de 20% du budget				
Total				

Autres documents annexés

Nom document	Lien	Source	Date de mise à jour
	Annexe financière PICS NORDHEIM v0.4.pdf	Porteur de projet	07/06/2012
	lettre_engagement_LESI.pdf	Porteur de projet	06/06/2012
Projet validé par le directeur d'unité	2012_PICS (pre-projet)_GALL_158755.pdf	Porteur de projet	30/03/2012

Validation du directeur d'unité

Valider la coopération : oui

Commentaires : Ce projet né d'une mise en commun d'expertise et de curiosité scientifique entre un chercheur de l'HyGeS, un doctorant et un chercheur de l'IPHC. Il a permis pour la 1ere fois, d'expliquer le démarrage des réacteurs naturels d'Oslo (3 publiés dont 1 à l'académie des sciences). Ce projet PICS correspond à une montée en puissance de cette équipe de recherches internationale. Interdisciplinaire, il est aussi très original et extrêmement prometteur. Il bénéficie de mon soutien sans aucune réserve.