

Postdoc Fellowships for non-EU researchers

Rapport Final

Name	Carole Nehme
Selection	2013
Host institution	Royal Belgian Institute of Natural Sciences
Supervisor	Cecile Batemann et Sophie Verheyden
Period covered by this report	from 01/09/2014 to 29/02/2016
Title	'Climate reconstruction of the Last Interglacial – Implications for the regional environment in the context of global warming.

1. Objectifs de la bourse de recherche

Le programme « bourses et mandat de retour » pour Non-EU Post-Doc fellows et financé par BELSPO a permis de financer un contrat de recherche de 18 mois, et ce de septembre 2014 jusqu'à février 2016. Le contrat de recherche s'inscrit dans le projet BiSpEem (<https://www.naturalsciences.be/en/content/bispeem>), sous la supervision du Dr. Cecile Batemann et du Dr Sophie Verheyden. Le projet de recherche du contrat postdoctoral a pour objectifs de:

- i) reconstituer le climat du dernier interglaciaire dans la région du Levant à partir des proxys (isotopes stables, pétrographie) des stalagmites de la grotte de Kanaan (Liban)
- ii) reconstituer le cadre paléogéographique de la région du Massif de Boine (La Lesse subaérienne) à partir des archives (remplissages et datations déjà fournies) de la grotte de Han-sur-Lesse pendant le dernier interglaciaire,
- iii) établir une comparaison régionale entre le climat du dernier interglaciaire au Levant avec le cadre climatique Eemien en Europe.

Après l'installation à l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique et l'introduction de mon travail à la VUB auprès de Prof. Philippe Claeys (Directeur du Laboratoire d'analyses environnementale et Géochimiques - AMGC), un programme de travail est mise en place avec Prof. Verheyden pour finaliser le travail de laboratoire et de terrain par trimestre. Une participation à des manifestations scientifiques nationales et internationales était prévue tous les trimestres afin de valoriser (publication écrite, communication orale) les rendus du projet postdoctoral.

2. Méthodologie

La méthodologie de travail sur les 18 mois comprend un travail de laboratoire effectué conjointement à l'institut des Sciences Naturelles de Belgique et à la VUB accompagné de sorties de reconnaissances de terrain avec les collègues de l'Université de Mons et un relevé de terrain dans la grotte de Han-sur-Lesse. L'apprentissage et l'application de ces différentes méthodes de laboratoire et de terrain s'est effectué trimestriellement suivant plan de travail établie préalablement dans le projet de post-doc:

• Sept – Déc. 2014

- Polissage et description pétrographique des stalagmites K1-2010 et K2-2010 de la grotte de Kanaan.

- Etat de l'art sur le climat du dernier interglaciaire dans la région levantine (lecture et synthèse des travaux déjà publiés sur les archives naturelles (pollen, marins, spéléothèmes, lacustres).
- Echantillonnage de la stalagmite K1-2010 pour des datations et des mesures isotopiques.
- Début des mesures isotopiques sur le spectromètre de masse (IRMS) au laboratoire d'Isotopes Stables (AMGC, VUB).

• **Janv – Mars 2015**

- Finalisation des mesures isotopiques de la stalagmite K1-2010 sur le spectromètre de masse (IRMS) au laboratoire de géochimie de la VUB.
- Mesures des eaux des grottes du Liban (Jeita, Kanaan, Mabaage et Qadisha) sur l'instrument de mesure isotopique des eaux 'Picarro' au laboratoire de géochimie à la VUB.
- Echantillonnage de la calcite récente prélevée dans les grottes du Liban depuis la campagne de terrain en novembre 2014.
- Interprétation des résultats et synthèse comparée aux études déjà publiées sur le climat du dernier interglaciaire dans la région levantine (pollen, marins, spéléothèmes, lacustres).

• **Avril – Juin 2015**

- Encodage des relevés topographiques de la grotte de Han-sur-Lesse sur Visual Topo.
- Synthèse bibliographique des de 25 études spéléogéniques et géomorphologiques dans la grotte de Han-sur-Lesse (Belgique).

• **Juillet – Sept. 2015**

- Analyse de la calcite récente prélevée dans les grottes de Qadisha, Kanaan, Jeita, Mabaage (Liban) sur le spectromètre de masse (IRMS) au laboratoire de géochimie de la VUB.
- Prélèvement de calcite sur la stalagmite K2-2010 (Grotte de Kanaan) pour datations à l'U/Th par Hai Cheng (U. Minesota, USA).
- Prélèvement au Micromil de 160 échantillons de calcite sur la stalagmite K2-2010 et pesage.

• **Oct. – Déc. 2015**

- Analyse de la poudre de calcite récente de la stalagmite de K2-2010 sur le spectromètre de masse (IRMS) au laboratoire de géochimie de la VUB.
- Prélèvement au microdrill de 160 échantillons de calcite sur la stalagmite K2-2010 et pesage et envoi des échantillons à l'université d'Albany-USA (Geology department) pour les mesurer (Spectromètre de masse connecté à un gaz bench prep).
- Prélèvement au microdrill jusqu'à 300 échantillons supplémentaires (résolution échant. à 250 um).

• **Jan. – Fév. 2015**

- Analyse de la poudre de calcite récente de la stalagmite de K2-2010 sur le spectromètre de masse (IRMS) au laboratoire de géochimie de la VUB (245 échantillons).
- Prélèvement au microdrill de 45 échantillons de calcite sur la stalagmite K2-2010 et pesage et envoi des échantillons à l'université d'Albany-USA (Geology department) pour les mesurer (Spectromètre de masse connecté à un gaz bench prep)

3. Résultats

3.1. Reconstitution du climat du dernier Interglaciaire (Eemien) au Levant Nord

Le projet portant sur la reconstruction du climat du dernier interglaciaire dans le Levant Nord vise à reconstituer le dernier interglaciaire dans la région levantine à partir d'une stalagmite prélevée dans la grotte Kanaan (disponible à l'IRSNB). Le Levant est une région privilégiée pour l'étude des climats passés. Sa position entre deux systèmes climatiques, l'oscillation Nord Atlantique et les Moussons, le gradient de précipitation et de température Nord-Sud et ses particularités topographiques rendent la reconstitution du climat passé complexe et intéressante à la fois pour mieux appréhender l'évolution des fronts des deux systèmes climatiques et leurs influences sur l'anthropisation très précoce de cette région. Le Mont Liban, massif montagneux calcaire de plus de 3000 m d'altitude et située sur la bordure Est de la Méditerranée, est caractérisée par la richesse de son paysage exo-et endokarstique. La diversité des cavités libanaises se manifeste par un large spectre de formes, de dépôts et de concrétions qui y sont contenues. Le Mont-Liban constitue alors un espace-clé pour développer des référentiels paléoclimatiques et environnementaux qui peuvent être appliquées sur la région Levantine.

Une description pétrographique détaillée du spéléothème (Fig 1), un échantillonnage pour des datations à l'U/Th a été couplé à des mesures isotopiques de l'oxygène et du carbone, en collaboration avec l'Université Libre de Bruxelles (VUB) : la stalagmite (K1-2010) de 23 cm de long a été prélevée de la grotte de Kanaan en 2010 dans le cadre d'une étude géomorphologique exhaustive de la cavité et du Karst de la vallée d'Antelias. Cette cavité de 162 m de développement est située à 100 m d'altitude et à 1.3 km de la cote. Onze datations de la calcite à l'Uranium/Thorium (U-Th) effectuées au NIGL Isotope Laboratory (British Geological Survey, UK) ont permis de développer un modèle d'âge de la stalagmite allant de $129,7 \pm 0,8$ ka à 84.1 ka (date extrapolée). La courbe isotopique de l'oxygène et du carbone est reconstruite à partir de 204 échantillons prélevés à une résolution de 1 mm et analysés au Laboratoire de géochimie de la Vrije Universiteit Brussels (Belgique).

Les courbes isotopiques de l'oxygène et du carbone datées de la stalagmite de Kanaan sont comparées aux variations de diamètre et du taux de croissance. Les profils montrent des valeurs généralement très négatives de $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ au cours du dernier interglaciaire, généralement comparé au Stade Isotopique MIS 5e, avec un taux de croissance de 0.15 cm/100a, le plus élevé de tout le profil. A partir de ~124 ka, un enrichissement du $\delta^{18}\text{O}$ de plus de 2‰ est observé jusqu'à ~120 ka, avec un taux de croissance diminuant jusqu'à 0.03 cm/100a. Les valeurs du $\delta^{18}\text{O}$ sont plus positives de ~120 ka et jusqu'à ~84 ka, avec deux pics négatifs entre 100 et 103 ka et entre 90-94 ka, couplés avec un taux de croissance modéré (0,09 cm/100a). Les valeurs isotopiques du carbone restent négatives et varient entre -10‰ et -12.5‰ VBDP, tout au long de la croissance de la stalagmite. Les résultats phares de cette étude se résume à trois grands points : 1) l'identification d'une période Eemienne humide et chaude ; 2) un changement rapide à 126 ka liée principalement à un changement de la source des précipitations et 3) le début des conditions glacières ou la fin du dernier interglaciaire à partir de 120 ka.

1) La période Eemienne chaude et humide

Les courbes isotopiques de l'oxygène et du carbone combinées avec les taux de croissance de la stalagmite K1-2010 indiquent une première période relativement chaude et humide à 129 ka, au début du dépôt du spéléothème. Cette période s'est étendue jusqu'à 126 ka et correspond à la période chaude et humide de l'Eemien et coïncide avec le dépôt du Sapropel S5 dans la Mer Méditerranée (Ziegler et al, 2010 ; Grant et al, 2012.) et le maximum d'insolation solaire estivale (Berger et Loutre, 1991). En Europe du Sud, Le début de l'Eemien est daté à 129.1 ka

selon les concrétions de la grotte de Corchia (Drysdale et al., 2005). Dans le Levant Nord, les archives polliniques du paléolac de Yammouneh montrent un pic de chênes au début de l'Eemien (Develle et al., 2011), indiquant des conditions climatiques suffisantes pour permettre le développement des forêts. La période Éemienne au Levant Nord était particulièrement humide avec une couverture végétale dense permettant la rétention de l'humidité et une circulation des eaux souterraines active. Ces conditions chaudes et humides sont en accord avec des conditions humides et chaudes similaires identifiées dans la séquence lacustre du Lac Van (Litt et al., 2014; Shtokhete et al., 2014) au le Nord et la Turquie et dans spéléothèmes des grottes de Soreq et de Peqiin (Ayalon et al., 2002; Bar-Matthews et al., 2003) dans le Sud-ouest d'Israël (Fig. 1).

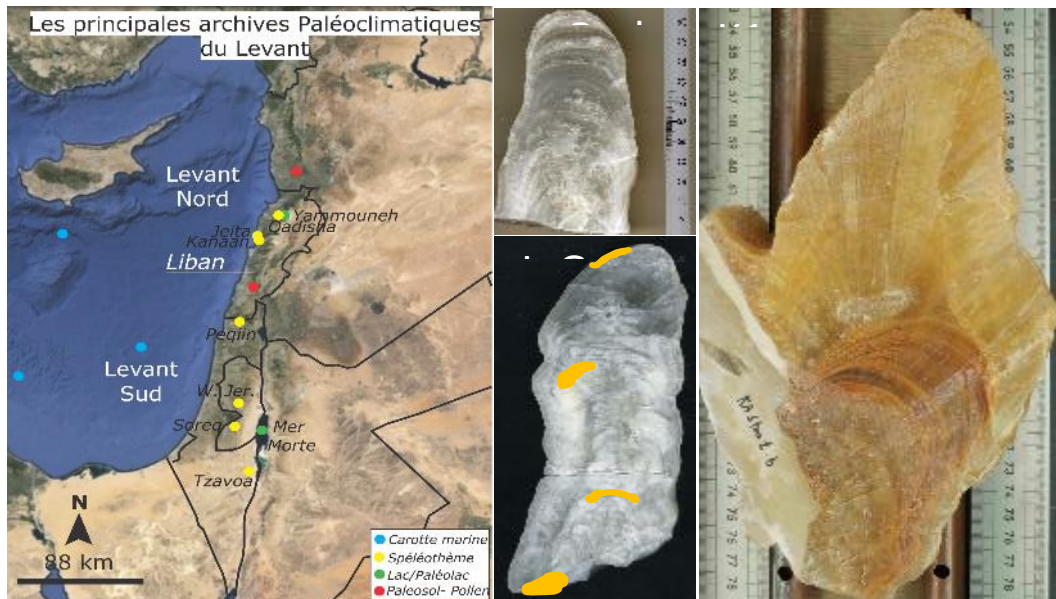


Figure 1 : carte de synthèse des études publiées sur la période Eemienne au Levant et les stalagmites de Jeita et de Kanaan qui ont été datées et analysées.

2) Le changement rapide à 126 ka

La courbe isotopique de l'oxygène montre un changement remarquable entre 126.3 ± 0.9 et 120.3 Ka (date interpolée). Cependant, la faible résolution chronologique ne permet pas de confirmer un cycle de saisonnalité à la fin de l'Eemien, comme le confirme les sédiments lacustres de Yammouneh au Nord du Liban (Develle et al., 2011; Gasse et al., 2015). La courbe isotopique de la stalagmite K2-2010 montre un changement rapide autour de 126 ka, date à laquelle les courbes isotopiques marines montrent un enrichissement de la source de l'eau de la Mer Méditerranée pendant le dépôt du sapropel S5 (128-121 ka).

Le début de l'enrichissement du signal isotopique de l'oxygène dans la stalagmite K1-2010 coïncide avec le début de l'enrichissement du signal isotopique des carottes LC21 (Grant et al., 2012) et ODP967 (Emeis et al., 2003) dans la Méditerranée orientale. En dépit des différences dans la résolution des datations entre les enregistrements marins et les concrétions, le changement des valeurs du signal isotopique de l'oxygène dans la stalagmite K1-2010 autour de 126 ka reflète un changement majeure du signal de la source de la Méditerranée orientale durant le dépôt du sapropel S5. Plusieurs études (Rohling et al., 2002, 2015; Schmiedl et al., 2003; Scrivner et al., 2004) suggèrent (Fig. 2) une coïncidence entre le refroidissement et l'aridité accrue autour de la Méditerranée et la diminution de l'intensité de l'insolation maximale de la mousson au cours du dépôt du sapropel S5 pendant l'Eemien. Schmiedl et al. (2003) font valoir que cet épisode a marqué le début d'une détérioration du climat régional après le pic (début S5) du dernier interglaciaire. Dans ce cas, cette détérioration du climat régional a commencé à 126 ka, (Rohling et al., 2002). Le profil isotopique de l'oxygène de la

stalagmite KI-2010 confirme cela et fournit une chronologie précise du changement, en le calant entre $126,3 \pm 0,9$ ka et 120,3 ka (date interpolée). Cependant, l'amplitude de l'enrichissement du signal isotopique de l'oxygène dans la stalagmite K1-2010 (126-120 ka) totalise $\sim 3,2$ ‰ et est beaucoup plus élevée que l'amplitude de l'enrichissement du signal isotopique de l'oxygène dans l'eau de la Méditerranée (~ 2 ‰) (Grant et al., 2012). Cela s'explique entre autres par le dépôt du sapropel dans l'Est de la Méditerranée et leurs processus dérivés (Ziegler et al., 2010) : l'effet de la source est donc un facteur important pour les valeurs isotopiques de l'oxygène dans les archives continentales, mais d'autres facteurs dérivés du sapropel S5 ont contribué au changement du signal isotopique de l'oxygène dans la stalagmite K1-2010 tels que la quantité de précipitations, la température, ou des changements dans les trajectoires du vent.

Avec les datations supplémentaires à l'Uranium Thorium et de nouvelles courbes isotopiques de la grotte de Soreq (Grant et al., 2012) Le profil isotopique de l'oxygène de la stalagmite de Kanaan indique que ce changement majeur a eu lieu en phase avec les autres archives continentales dans la région du Levant Sud, modifiant ainsi l'interprétation basée sur le modèle d'âge précédent (Verheyden et al., 2015). Les courbes isotopiques de l'oxygène et du carbone dans la stalagmite K1-2010 ont duré 6000 ans. Le pas du changement étant plus lent au départ s'est accéléré vers la fin du Sapropel $\sim 120,3$ ka (interpolée). Le premier motif du changement à partir de 126 à 122 ka suggère un changement plus progressif de l'enrichissement isotopique que le celui observé dans les stalagmites de Soreq. Néanmoins, le changement rapide et alterné des signaux isotopiques de l'oxygène et bien enregistré dans les spéléothèmes de Soreq durant cette période n'a pas pu être observée dans la stalagmite de Kanaan due à la faible résolution de cette partie et l'occurrence de courts hiatus (couches de boue). Une variation semblable et progressive, mais sur une échelle de temps plus grande, a été démontrée dans le signal pollinique de Yammouneh, où la transition entre l'optimum interglaciaire et sa fin semblent être plus progressive que celle observée dans d'autres archives de la Méditerranée orientale. Dans le Levant Sud, le signal isotopique de l'oxygène et du carbone dans les grottes de Peqiin et de Soreq suggèrent un changement brusque mais plus tardif aux alentours de 118 ka (Bar-Matthews et al., 2003). Ce changement a été déplacé à 120,5 Ka (Grant et al., 2012) en utilisant une chronologie U-Th plus raffinée (Fig. 2).

3) Le début de la période glaciaire

Après 120.3 ka, la courbe isotopique de l'oxygène avec des valeurs plus enrichies indique la fin des conditions climatiques chaudes et humides du dernier interglaciaire. L'apparition de conditions glaciaires comme indiqué dans plusieurs archives continentales en Méditerranée orientale montre une détérioration climatique progressive à partir de ~ 120 ka et avant le début du dernier cycle glaciaire. Le signal isotopique de l'oxygène et du carbone évolue d'une manière synchrone à partir de ~ 120 ka dans la stalagmite K1-2010. Les signaux isotopiques de l'oxygène et du carbone sont enrichies avec un taux de croissance modérées à faible.

Cependant on retrouve des pics négatifs et rapides dans la courbe isotopique de l'oxygène, en particulier en réponse aux impulsions humides lors du dépôt du sapropel S4. Le signal isotopique du carbone montre une évolution plus progressive en réponse au dépôt du sapropel. Ceci s'explique par le fait que le changement de la source ou l'augmentation de la quantité de pluie est transmis rapidement au signal isotopique de l'oxygène de la stalagmite de Kanaan alors qu'un phénomène d'inertie affecte le signal isotopique du carbone. En effet, l'évolution du signal isotopique du carbone après 120.3 ka traduit un changement progressif et lent à long terme reflétant une détérioration du sol et de la couverture bio pédologique. A l'échelle régionale, le signal pollinique de Yammouneh indique une couverture végétale steppique après 120 ka (Develle et al., 2011), typique d'une période plus sèche et/ou froide.

Dans le Levant Sud, un enrichissement progressif du signal isotopique de l'oxygène et du carbone, exceptée pour les impulsions humides durant les dépôts des sapropel S4 et S3, indique une dégradation général du climat qui pourrait être liée à la diminution des précipitations provenant des condensation qui se forment au-dessus de la Mer méditerranée (Ayalon et al., 2002.; Bar-Matthews et al, 2003) ou à des changements dans les trajectoires des vents décalées plus vers les étendues continentales Nord-africaines (Kolodny et al., 2005.; Lisker et al, 2010). Les concrétions de la région du Négev (Sud du Levant) indiquent un régime climatique différent de celui du Levant Nord.

Les taux de croissance de spéléothèmes ont diminué après 100 ka (Vaks et al., 2006), avec moins de pluie en provenance de la Mer Méditerranée qui atteignent la grotte de Tzavoa (Nord du Négev). Plusieurs spéléothèmes de grottes situées plus au Sud dans le désert du Négev (Vaks et al., 2010) ainsi que les archives du paléolac Mudawara dans le Sud de la Jordanie ont montré une impulsion humide à la fin du stade 5 (85-75 ka), liée plus aux précipitations provenant des mousson (Petit-Maire et al., 2010). Mais, les archives lacustres du lac Samra (Mer Morte) sont plus en phase avec les archives Nord levantines durant le dernier interglaciaire que suggère les dernières études sur la stalagmite de Jeita pour les derniers 20 ka (Cheng et al., 2015). Les archives de la Mer Morte, récemment étudiés avec une résolution chronologique plus élevée (Neugebauer et al., 2015) que les études précédentes (Waldmann et al., 2009), montrent des niveaux élevés mineurs au cours des impulsions humides lors du dépôts des sapropels S4 et S3. Ces impulsions humides indiquent que le climat était certes humide dans le bassin de la Mer Morte mais avec une faible amplitude comparée au climat humide du Levant Nord. Le climat du bassin de la Mer Morte après 120 ka est liée probablement soit à des facteurs topographiques localisés (Vaks et al., 2006, 2013) soit, à variations climatiques conditionnées par le système des moussons (Torfstein et al, 2015 ; Parton et al 2015) au limite avec le système climatique méditerranéen (Bar-Matthews, 2014 ; Neugebauer et al 2015).

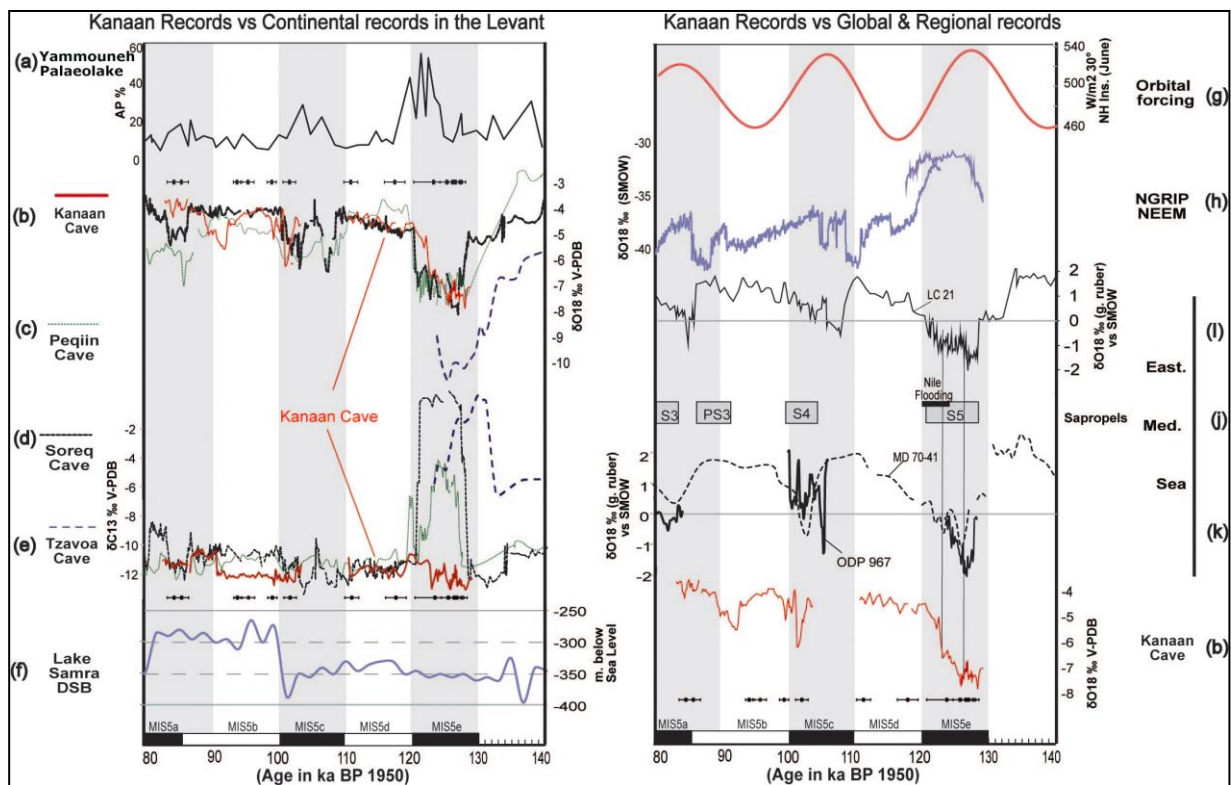


Figure 2 : la comparaison des courbes isotopiques de Kanaan avec les celles des arches continentales, marines dans la région à l'échelle mondiale.

La comparaison des courbes isotopiques de la stalagmite de Kanaan avec d'autres archives continentales et marines de la région (Fig. 2) propose certaines similitudes et différences quant aux timing et amplitudes des variations climatiques. D'un côté, La stalagmite de Kanaan montre durant l'optimum climatique (Eemien), des conditions chaudes et humides comparables avec celles proposées par les archives polliniques du paléolac de Yammouneh (Nord-Liban) et les stalagmites de Soreq et Peqiin au Sud du Levant mais diffère significativement des conditions plus arides dans le bassin de la Mer Morte. D'un autre côté, la fin de l'optimum interglaciaire est précoce (130- 124 ka) au Levant Nord et diffère de l'optimum interglaciaire proposée par les courbes isotopiques des stalagmites du Sud du Levant (Frumkin, 1999; 2003 ; Bar-Mathews et al., 2000; 2003) et du Nejev (Vaks et al., 2010).

3.2. Reconstitution du climat du pénultième glaciaire (Stade 6) au Levant Nord

Une deuxième stalagmite prélevée de la grotte de Kanaan été daté et analysées en collaboration avec le laboratoire d'Isotopes stables de la VUB. L'analyse de cette stalagmite qui couvre une période glaciaire est intéressante du fait qu'elle relève des informations climatiques pertinentes sur le climat du cycle glaciaire avant l'avènement de l'Eémien dans cette région ou l'anthropisation et les migrations humaines sont précoces. Les stalagmites qui couvrent des périodes glaciaires sont rares au Nord de l'Europe. Le Levant, bien situé dans les régions de moyennes latitudes a été épargné de l'extension de la calotte glaciaire comme ont connu les régions du Nord européen. Par conséquent, cette région recèle dans son karst développé, des stalagmites qui ont poussé durant les périodes glaciaires. L'analyse de ces stalagmites comme celle prélevée de la grotte de Kanaan permet de comprendre les changements climatiques qui ont eu lieu durant le cycle pénultième glaciaire comparable à celui du stade 6 marin.

La section de la stalagmite K1-2010 a été polie à l'institut des sciences naturelles de Belgique et 18 échantillons de calcite prélevés le long de l'axe central de la stalagmite ont été datés à l'Uranium/Thorium (U-Th) effectuées à l'université du Minnesota (USA). Les résultats ont permis de développer un modèle d'âge de la stalagmite allant de $194.4 \pm 0,9$ ka à 154.8 ka (date extrapolée). Plus de 800 échantillons de calcite prélevés à haute résolution (pas d'échantillonnage de 250 um) ont été analysés à l'aide du spectromètre de masse à la VUB et à l'université d'Albany (USA).

Les premières interprétations du modèle d'âge de la stalagmite montre un taux de croissance assez faible au à la fin du pénultième interglaciaire (taux de croissance de 0.01 cm/100a) annonçant la fin d'une période chaude et l'avènement du début d'un cycle glaciaire à partir de 189 ka (début du pénultième glaciaire). De 190 à 162.5 ka la stalagmite pousse très lentement avec un taux de croissance plus faible aux alentours de 0.002 cm/100a. la fabrique monocristalline le long de cette période confirme un mode de croissance très faible et lente typique d'une période glaciaire. La dernière partie de la stalagmite datée de 162.5 à 154.4 ka montre une croissance assez élevée avoisinant 0.24cm/100a. Cette période du pénultième glaciaire moyen se situe dans le prolongement des interstadias (périodes climatiques chaudes et courtes) et nouvellement étudiées et révélées à partir des carottes de glace de l'Antarctique. Les interprétations des courbes isotopiques sont en cours et les résultats finaux seront publiés prochainement dans un journal international.

Dans un dernier temps, ce travail des recherches menées sur les spéléothèmes au Liban et comparée avec d'autres archives similaires ou lacustres dans la région levantine a permis de confirmer ou d'infirmer certaines tendances climatiques générales dans la région Est-Méditerranéenne. Les résultats qui ressortent d'une étude principalement géochimique et ayant une portée paléoclimatique trouve tous leurs utilités lorsqu'ils sont à la portée des préhistoriens

qui peuvent comparer les tendances climatiques précises à la répartition spatiale des occupations humaines connues durant une période et dans la même zone géographique.

3.3. Synthèse bibliographique et spatiale des études réalisées dans la grotte de Han-sur-Lesse (Belgique)

Le projet post-doc a également été intégré dans la deuxième phase du projet BiSpEem, impliquant une étude géomorphologique de la grotte de Han-sur-Lesse (Belgique) afin de contextualiser les résultats des dépôts et des concrétions datées dans un contexte géomorphologique environnemental régional. De ce travail résultera une reconstitution paléogéographique de l'histoire de la Lesse souterraine et par conséquent de la Lesse subaérienne durant le pléistocène supérieur. Mais, pour atteindre un tel objectif, il faudra d'abord constituer une base de données bibliographique et cartographique sur la grotte de Han-sur-Lesse afin de pouvoir dresser un Etat de l'art exhaustif et constituer les différents points de départ aux chantiers de relevés de terrain :

La grotte de Han-sur-Lesse dispose d'une richesse patrimoniale scientifique illustrée par diverses recherches archéologiques, géomorphologiques, hydrologiques et paléoclimatiques depuis 1829. Or ces différentes études sollicitent un outil plus efficace permettant de les replacer dans un cadre global et spatial. Afin d'avoir une base de travail efficace, une synthèse de l'état de l'art de ces études sera produite sous forme de base de données spatialisées. Une base de données des recherches effectuées dans la grotte est en cours de construction depuis 2014. Cette base de données (Fig. 3) a un double objectif sur le long terme:

- un objectif pédagogique qui est de grouper les informations à disposition pour un large public dans le cadre du projet Géopark en cours de construction. Le groupement de ces données sur la grotte de Han et sa diffusion permet de faciliter de nouveaux et futurs projets de recherches paléoclimatiques et archéologiques.
- Un objectif scientifique qui permet d'une part de rassembler dans un contexte temporel plus long (Pléistocène) la mise en place et l'emboîtement des dépôts détritiques, blocs écroulés et les concrétions précédemment datées, et d'autre part de remettre dans leur contexte paléoclimatique et géomorphologiques les fouilles archéologiques effectuées dans la grotte.

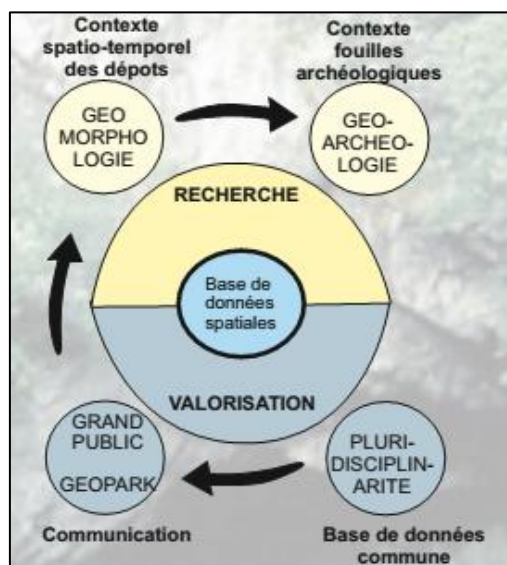


Figure 3: Schéma résumant les objectifs de la base de données et ces portées scientifiques et médiatiques

Le travail effectué dans le cadre de ce post-doc s'appuyait sur :

- i) une numérisation de la topographie de Han-sur-Lesse et sur,
- ii) la synthèse de 25 études précédentes dans la Grotte de Han et
- iii) un relevé géomorphologique exhaustif de la partie aval de la grotte (Petites et Grandes Fontaines, Trou de Han).

La numérisation a nécessité la saisie des points topographiques de la grotte relevés par Yves Quinif sur le logiciel Visual topo. La création du 'squelette' de la cavité et son export vers le logiciel ArcGIS (Systèmes d'Information Géographique) a permis de vérifier l'orientation, la bonne localisation et la longueur des galeries. Outre le travail de cartographie de la grotte, une synthèse préliminaire de 25 études géomorphologiques et paléoclimatiques a permis de regrouper en un fascicule une première partie des datations, pollens identifiés, études granulométriques et des scénarios d'évolutions géomorphologiques proposées. Enfin, une coupe géomorphologique du secteur aval de la grotte a été réalisée en Juin et juillet 2015 pour une remise en contexte des dépôts.

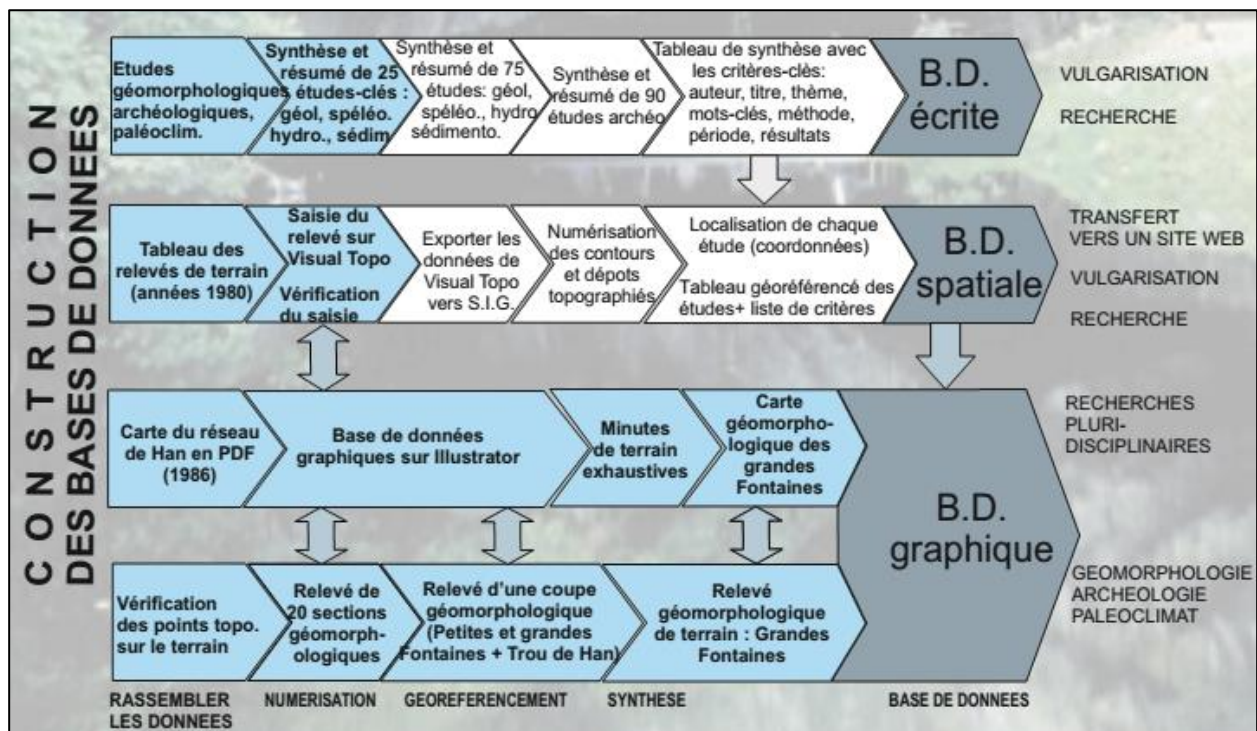


Figure 4 : Schéma des étapes de la mise en œuvre de la base de données spatiale et bibliographique des études effectuées à la grotte de Han-sur-Lesse.

Le premier dénombrement a recensé plus de 75 études en paléoclimatologie, géomorphologie et hydrologie et plus de 90 études en archéologie qui sont en cours d'analyses. Ces études font l'objet actuellement d'un pointage spatial suite à un géoréférencement de la topographie de Han sur ArcGIS. Un tableau est à produire à la fin du contrat actuel 'Chercheur supplémentaire' afin de synthétiser (Fig. 4) chaque étude suivant une liste de critères (coordonnées spatiales, auteur, titre, thèmes, mots-clés, méthodes, période étudiée, résultats).

4. Perspectives pour des collaborations futures entre établissements

Vu la situation actuelle du Liban et le nombre réduit d'étudiants dans la filière 'Géographie' à l'université Saint-Joseph (Liban), C. Nehmé, s'est trouvé dans l'impossibilité de retourner et devenir chargée de cours au sein du département de géographie. Cependant, les perspectives de collaborations n'ont pas manqué à se réaliser pour construire des liens et des coopérations entre

le Liban et la Belgique. La construction de ces perspectives de coopérations s'est traduite par le montage de plusieurs projets de recherches nationales et internationales :

- **Projet Marie Curie 2016** : projet européen financé par la commission européenne (European Research Council) pour un projet de post-doc de deux ans et un budget de fonctionnement de l'institut hôte (Nottingham University, UK) et le second institut hôte (CEREGE, France) avec la collaboration de la VUB, Belgique), l'Université de Savoie-Mont-Blanc-Laboratoire EDYTEM UMR 5204, l'Université Saint-Joseph de Beyrouth-Liban, l'IRNScB, Belgique et Minnesota University-USA. Projet soumis mais non obtenu.
- **CMIRA-2016** : projet régional français financé par la région Rhône-Alpes finançant un contrat de post-doc pour 10 mois et un budget de fonctionnement pour les trois partenaires nommées dans ce projet (Université de Savoie-Mont-Blanc-Laboratoire EDYTEM UMR 5204 ; Université Saint-Joseph de Beyrouth-Liban ; l'IRNScB). Projet non obtenu mais sera resoumis plus tard.
- **Projet Pegasus MSCA outgoing phase (2016)**: projet national belge financé par le FWO pour un contrat de post-doc de trois ans et un budget de fonctionnement pour les instituts hôtes (VUB, CEREGE-France) et les six partenaires nommées dans ce projet (Université de Savoie-Mont-Blanc-Laboratoire EDYTEM UMR 5204 ; Université Saint-Joseph de Beyrouth (Liban) ; l'IRNScB ; Pamukkale University (Turquie) ; Lancaster University (UK); Minnesota University (USA). Projet soumis et en cours d'évaluation.
- **Projet CEDRE** : projet international financé par l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF), permettant de financer une recherche scientifique sur une thématique donnée en géosciences, notamment, les analyses de laboratoires et les frais de campagnes de terrain et de voyages entre les institutions partenaires issues des pays francophones. L'appel à projet étant en Janvier de chaque année, un projet de coopération sur les problématiques paléoclimatiques et paléoenvironnementales au Liban est en cours de montage (réunions bilatérales) entre l'IRNScB (Belgique), l'Université de Savoie-Mont-Blanc-Laboratoire EDYTEM UMR 5204 (France) et l'Université Saint-Joseph de Beyrouth (Liban).
- **Projet d'exposition sur l'évolution des paysages au Liban « L'Homme et le paysage au Liban - 200 000 ans d'adaptation**. L'exposition dédiée au grand public reprend les différentes études paléoclimatiques sur le Pléistocène moyen et récent, les recherches paléoenvironnementale sur l'holocène et les études diachroniques sur le changement du paysage depuis le 19^e siècle en forme de panneaux et brochures résumant l'utilité, les objectifs et les résultats de telles études. Cet exposé de vulgarisation scientifique au grand public et écoliers a été organisé conjointement par l'Université Saint-Joseph de Beyrouth (Liban) et l'Université de Lyon-2 en collaboration avec l'Université de Savoie-Mont-Blanc (France), l'IRNScB (Belgique)

Enfin, une publication est en cours d'écriture entre l'université Saint-Joseph (Liban), le RBINS (Belgique) et la VUB (Belgique) sur les variations isotopiques des eaux de la zone Vadose du karst du Mont-Liban.

Les nombreuses collaborations au sein du projet postdoctoral avec des laboratoires français, anglais et Libanais ont permis le renforcement des collaborations de recherche entre elles et l'IRSNB. Elles ont également abouti à l'obtention pour C. Nehme d'un poste de Maître de

conférence à L'Université de Rouan-Normandie avec des perspectives de collaborations qui se profilèrent à court et moyen-terme sur les thématiques paléoclimatiques au Levant et au Nord-Ouest de la France (collaboration entre l'USJ-Beyrouth ; l'IRNScB-Belgique, le LSCE-France, le LGP-Paris I), de mise en valeur patrimoniale des paysages normands (Paris-IV Sorbonne), etc.

5. Valorisation/Diffusion (Publications, Conférences, Séminaires, Missions à l'étranger)

5.1.Publications

- **Nehme C., Delannoy J.J., Gerard J. (2014).** Contribution of Kanaan, Kassarat and Jeita cave systems study in the morphogenesis reconstitution of valleys, Mt-Lebanon: case study of Kalb and Antelias valleys. Poster Session, Journées de Spéléologie Scientifique. 15-16 Novembre 2014. Han-sur-Lesse, Belgique.
- **Nehme C., Verheyden S., Noble S., Delannoy J.J., Gerard J., Salem Gh., Farrant A., Claeys Ph., 2015.** Palaeoclimate reconstruction in the Levant region from the petrography and growth rate of a MIS 5 stalagmite from the Kanaan Cave, Lebanon. Geophysical Research Abstracts 17, 9379, 2015. EGU General Assembly 2015, Vienna, Austria.
- **Nehme C., 2015.** Synthèse bibliographique des travaux effectués dans la grotte de Han-sur-Lesse (Belgique). Rapport Interne dans le cadre du projet BiSpEem, Avril 2015, 25 pages.
- **Nehme C., Jaillet S., Adjizian-Gerard J., Arzouni M., Comaty T., Stephan R. and Delannoy J.-J. 2014.** Subsurface influx adjustments and speleogenesis as inferred from sediment traps in Jeita and Kassarat caves, Lebanon. Acta Carsologica Karst Research Institute, Postojna, Slovénie, 44/1, 5-23.
- **Nehme C., Verheyden S., Noble S., Farrant A., Delannoy J.-J., Claeys Ph. 2015.** Paleoclimate reconstruction in the Levant region from the petrography and the geochemistry of a MIS 5 stalagmite from the Kanaan Cave, Lebanon. Climate of the Past Discussions.
- **Nehme C., Verheyden S., Noble S., Farrant A., Delannoy J.-J. 2015.** Palaeoclimate reconstruction in the Levant region from the petrographic and growth rate of a MIS 5 stalagmite from the Kanaan Cave, Lebanon. Geologica Belgica.
- **Nehme C., Verheyden S., Noble S., Delannoy J.J., Gerard J., Salem Gh., Farrant A., Claeys Ph., 2015.** Palaeoclimate reconstruction in the Levant region from the petrography and growth rate of a MIS 5 stalagmite from the Kanaan Cave, Lebanon. Poster Session, S4 Summer school on speleothem science. Earth Science Department, Oxford University, 22-29 august 2015.
- **Nehme C., Verheyden S., Noble S., Farrant A., Delannoy J.-J., Claeys Ph. 2015.** Paleoclimate reconstruction in the Levant region from the petrography and the geochemistry of a MIS 5 stalagmite from the Kanaan Cave, Lebanon. Climate of the Past.
- **Nehme C., Verheyden S., Delaby S., Quinif Y., 2015.** Synthèse bibliographique et spatiale des études réalisées dans la grotte de Han-sur-Lesse (Belgique). Journées de spéléologie scientifique JSS 2015, Han-sur-Lesse, Belgique.
- **Nehme C., Verheyden S., Noble S., Farrant A., Delannoy J.-J., Claeys Ph. 2015.** la reconstruction paléoclimatique du stade isotopique 5 dans la région levantine à partir des analyses géochimiques et de la croissance d'une stalagmite de la grotte de Kanaan (Liban). Actes du colloque CNF-AFEQ – Bordeaux, Février 2016, France.
- **Nehme C., Jaillet S., Adjizian-Gerard J., Voisin C. and Delannoy J.-J. 2014.** New

insights on Kanaan, Kassarat and Jeita cave systems: contribution to the reconstitution of valleys in central Mount-Lebanon. *Zeitschrift fur Geomorphologie*. 60/2, 95-117.

5.2.Missions

- **Novembre 2014** : Mission de terrain commune au Liban entre le RBINS (Sophie Verheyden, Carole Nehme), le laboratoire EDYTEM UMR 5204 CNRS, le British Geological Survey (BGS), l'Association Libanaise d'Etude Spéléologiques (ALES) pour visiter de nouvelles grottes et prélever trois spéléothèmes situés à haute altitude dans le cadre de montage d'un projet commun. Des échantillons d'eau et de calcite récente ont été prélevés également. Une réunion de travail avec tous les partenaires de ce projet au département de géographie (Dr. Jocelyne Gérard) de l'Université Saint-Joseph a mis au clair, dans un compte rendu approuvé à l'unanimité, les bases d'un accord minimal pour de futurs projets.
- **Février 2015** : visite des grottes de Han-sur-Lesse (Réseau touristiques et réseau Sud) pour s'imprégner des formations et de processus endokarstiques présents dans ce système avec les explications de Prof. Yves Quinif.
- **Mars 2015** : réunion de travail avec Prof. Yves Quinif (U. Mons) pour la préparation de la campagne de terrain de Juillet 2015 pour les relevés géomorphologiques de terrain dans la grotte de Han-Sur-Lesse. Un programme de travail a été fixée et débutera par la numérisation de la base de données des relevés topographiques de la grotte et effectuées entre 1980 et 1984.
- **Juin 2015** : campagne de terrain pour un relevé topographique et géomorphologique de 14 sections depuis la salle Vignerons jusqu'à la salle du Trophée (Partie touristique des grottes de Han-sur-Lesse).
- **Juillet 2015** : campagne de terrain pour un relevé topographique et géomorphologique de 10 sections dans la galerie des petites et des grandes fontaines (Partie non-touristique des grottes de Han-sur-Lesse). Un relevé de coupe détaillée a été effectué par les collègues du SGB (Thomas G.) et de l'IRNSB (S. Verheyden) avec l'aide d'une étudiante en géologie (ULB) (Elise K.) depuis la salle du Potiron jusqu'à la galerie des grandes fontaines en passant par le trou de Han.
- **22 Janvier 2016** : participation à la campagne de prélèvement de la stalagmite La boueuse à la grotte de Han-sur-Lesse. Début de la campagne de terrain pour le suivi des paramètres climatiques de la salle du Dôme. Trois stations de mesures de T° dont la station automatique principal ont été posées en Janvier 2016.
- **22 février 2016** : poser les 8 autres stations de mesures de T° essentiellement (Niphargus) et prise de mesure de CO₂ à chaque station.
- **22-24 février 2016** : campagne de terrain commune avec Stéphane Jaillot (EDYTEM_CNRS), Yves Quinif (U. Mons), Christian Burlet et Sophie Verheyden (IRNSCB et SGB), Jeremy Flament (ISSEP) et Vincent (CSARI) pour le scan 3D de la salle du Dôme par le lidar LEICA 3000. La campagne de scan 3D a nécessité 3 jours de terrain et 90 scènes de scan pour couvrir la totalité des morphologies du plafond, parois et sols.

5.3.Conférences

- Présentation du travail de recherche au Service Géologique de Belgique (Septembre 2014)
- Participation aux Journées Scientifiques de Spéléologie (JSS) Novembre 2014 à Han-Sur-Lesse (Belgique)

- Participation aux Journées BELQUA 2015 le 2 mars à l'académie des sciences (Bruxelles, Belgique)
- Avril 2015 : participation à l'EGU 2015 (Vienne, Autriche)
- 7 mai 2015 : organisation d'un séminaire la reconstitution paléoclimatique au Levant à partir des spéléothèmes dans le cadre des cycles de séminaires du Laboratoire EDYTEM, UMR 5204 CNRS, France.
- Réunion de travail avec L. Vial (CEREGE), JJ Delannoy et I. Couchoud (EDYTEM), et S. Verheyden (RBINS) pour le montage d'un projet IF-Marie-Curie pour l'année 2016-2017.
- Aout 2015 : participation à la deuxième école d'été S4 sur les spéléothèmes à l'université d'Oxford, Royaume-Uni.
- Octobre 2015 : participation aux journées de l'Association Française de Karstologie qui se sont tenues à Reims.
- Participation aux journées de spéléologie scientifique JSS 2015 et tenue à Han-sur-Lesse.
- Participation au colloque AFEQ2016 Bordeaux 16 au 18 février 2016.

5.4. Médiation scientifique

L'idée de départ pour une exposition qui porterait sur : "L'Homme et le paysage : 200000 ans d'adaptation au changement" au Liban avait pour objectif principal de montrer comment on identifie et on perçoit le changement dans l'environnement à différentes échelles de temps. L'exposition serait ciblée sur le grand public et, surtout, sur les scolaires et se déroulerait à l'Université Saint-Joseph de Beyrouth (Liban).

Un travail de collaboration avec le Musée de la Préhistoire de l'Université Saint-Joseph de Beyrouth et la Maison de l'Orient et de la Méditerranée, Université de Lyon-Bernard met en lumière les changements naturels et anthropiques qui ont affecté le paysage naturel au Liban depuis les derniers 200.000 ans et jusqu'à l'Holocène et la perception de ces paysages dans le temps court (derniers 200 ans). L'exposition s'est tenue à l'Université Saint-Joseph pour le grand public et les scolaires et valorisent les travaux conduits dans le cadre du programme ANR Paléo Syr-Paléo Lib.

Le paysage actuel est le résultat d'une longue histoire, en constante évolution lente ou rapide. Il est un milieu de vie, d'échanges sans cesse renouvelés, d'adaptations aussi. L'équilibre qui s'installe peu à peu entre la végétation, la faune, le sol, le relief d'un endroit donné est souvent rompu par les interventions de l'Homme. À notre échelle de temps, les transformations induites par les variations climatiques peuvent être considérées comme relativement lentes, mais leurs effets peuvent être importants. Quant aux changements provoqués par l'Homme, ils peuvent être rapides et violents et peuvent être parfois quasi irréversibles. Pour mieux comprendre ces évolutions et ces changements, l'exposition a proposé l'évolution du paysage sur trois temps :

- **le XIXe et le XXe siècle** : un temps court durant lequel l'influence des activités humaines a été le facteur dominant, essentiel, de l'évolution, souvent rapide, des paysages. La photographie en est un des témoins privilégiés puisqu'elle nous offre des images de cette réalité.

- **l'Holocène** : les douze mille dernières années ont vu fluctuations climatiques et interventions humaines œuvrer de concert pour transformer en profondeur les paysages. Des archives sédimentaires, des vestiges archéologiques (sites d'occupation, aménagements hydro-agricoles) nous permettent de retracer une histoire mouvementée.

- **Le Pléistocène** : nous nous intéresserons aux 200.000 dernières années, documentées par des carottages effectués dans le poljé de Yammouné et par les stalagmites des endokarsts libanais (Develle et al., 2011 ; Nehme, 2013 ; Verheyden et al, 2008 ; Nehme et al., 2015). Pour

cette période, seuls des changements climatiques, importants, ont profondément transformé, à plusieurs reprises, les paysages.

6. Skills/Added value transferred to home institution abroad

La bourse octroyée à Mme Nehmé a permis la réalisation du projet de recherche tout en intégrant plusieurs équipes pluridisciplinaires en Belgique (Université de Mons ; VUB, IRScNB, Service géologique de Belgique) et de mettre en lien plusieurs projets en cours (BISPEEM,) et en construction (Géopark Lesse et Lomme, centre d'Archaeosciences) au sein de l'IRNScB.

La mobilité a permis également au chercheur d'acquérir de nouvelles méthodologies (géochimiques) de laboratoire et l'accès à des sites géologiques emblématiques (Han-sur-Lesse) dans le cadre du projet Géopark « Lesse et Lomme » (dossier en cours de validation par l'UNESCO). Le gain d'expertise sur le karst belge et en particulier concernant Han-sur-Lesse a permis l'obtention d'un mandat 'chercheur supplémentaire' de Mars à Décembre 2016 pour un projet de climatologie dans le réseau de Han-sur-Lesse afin de mieux comprendre le comportement climatologique et les liens avec l'enregistrement du climat dans les spéléothèmes (en cours).

Le programme Non EU postdoc fellow a permis de contribuer au rayonnement de la Politique scientifique belge par la publication des résultats de la recherche menée : 3 publications internationales ; 3 résumés de communications dans des conférences internationales ; 1 chapitre dans un livre en cours de publication, 4 résumés de communications dans des conférences nationales).

Le rayonnement de la Politique scientifique belge s'est traduit par de nouvelles collaborations internationales (Université de Savoie-Mont-Blanc-Laboratoire EDYTEM UMR 5204 ; Université Saint-Joseph de Beyrouth-Liban ; British Geological Survey-UK) dans le cadre de plusieurs projets en cours de montage, faisant ainsi des structures scientifiques belges (IRNScB ; VUB) des partenaires privilégiés pour la recherche paléoclimatique au Levant.