

l'évolution thermochimique et dynamique des fluides du bain, notamment en simulant les mouvements de convection dans les différentes couches. « *Il y a une vingtaine d'années, au moment de la conception de l'AP1000, les moyens de calcul numérique n'étaient pas suffisants pour aborder ces questions, mais aujourd'hui on peut appréhender ces phénomènes* », précise Florian Fichot.

Intégrés au logiciel de simulation des accidents graves de l'IRSN (Astec), ces nouveaux outils ont permis de réaliser des études de sensibilité. Chaque réacteur ayant ses spécificités, il est en effet indispensable d'envisager le plus de cas possible, tant en termes de scénario accidentel qu'en termes de composition chimique et de quantité d'acier dans la cuve.

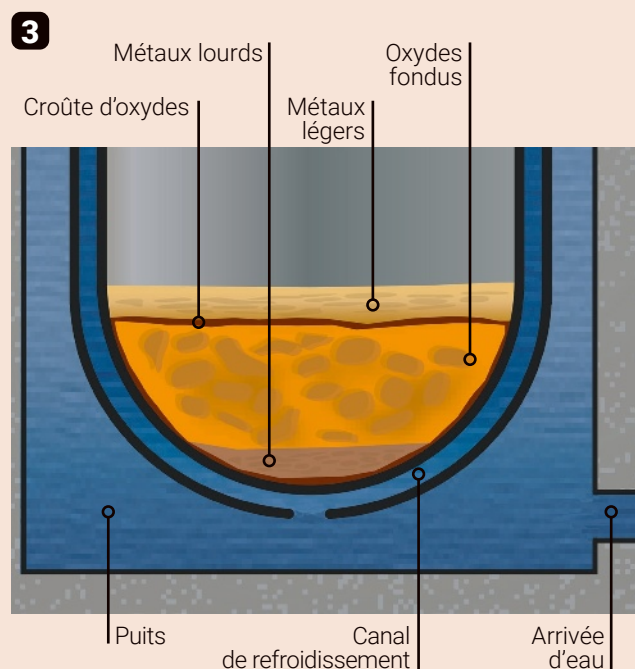
PROCESSUS CRUCIAL DE STRATIFICATION

L'ensemble de ces études montrent le rôle crucial du processus de stratification, c'est-à-dire de la séparation en couches distinctes des phases composées d'oxydes de celles composées de métaux. L'évolution de cette stratification au cours des premières heures de l'accident – et les états transitoires par lesquelles elle passe – est particulièrement déterminante pour savoir si le flux de chaleur est trop élevé et où il risque de percer la cuve. Une stratification transitoire en trois couches est possible : une partie du métal fondu se répartit au-dessus de la couche d'oxyde et l'autre au-dessous. Ce qui modifie le profil de température et peut conduire à des situations critiques liées à un effet de focalisation de flux thermiques sur la paroi de la cuve. Les calculs indiquent que la couche métallique supérieure peut concentrer le flux de chaleur maximal : elle reçoit en effet 50 % de la puissance thermique dégagée par le corium qu'elle transmet par convection vers les parois. Plus cette couche est mince, pour des masses d'acier faibles, plus le flux, « focalisé » au niveau du contact, est élevé. On peut ainsi atteindre ou dépasser un flux

thermique de 2 mégawatts par mètre carré là où la couche métallique se réduit à 10 centimètres d'épaisseur. Ces effets dits « de concentration de flux », en particulier lors des phases transitoires, peuvent engendrer des situations critiques et dangereuses, capables de faire fondre localement et rapidement la paroi de la cuve. Toute évaluation de la marge de sûreté doit en tenir compte. L'épaisseur minimale de la paroi atteinte est donc un paramètre clé à évaluer. C'est ce qui a été fait lors d'un exercice commun de simulation d'un scénario d'accident de référence : six équipes partenaires, utilisant chacune son logiciel, ont déterminé cette épaisseur minimale pour un réacteur de 1 000 mégawatts ayant une paroi de cuve de 15 centimètres au départ. L'ensemble des résultats la situe entre 3 et 7 centimètres avec une dispersion de $\pm 40\%$. Ce scénario de référence, choisi parce que déjà simulé pour le réacteur américain AP1000, n'est toutefois pas le plus critique. Des configurations plus pénalisantes tant en termes de réacteur que de scénarios ont été simulées avec le logiciel Astec. Elles montrent que la situation la plus critique conduit à un flux thermique maximal de 2 mégawatts par mètre carré et à une épaisseur de cuve minimale d'environ 2 centimètres.

Se pose alors la question de la résistance mécanique de la cuve, non seulement pendant l'accident mais aussi à long terme. Selon les premières analyses réalisées dans ce sens – essentiellement des travaux numériques sur les lois de comportement de l'acier à différentes températures et sous différentes contraintes, même en cas de surpression de 20 bars, soit 10 fois celle considérée comme la plus probable – la paroi réduite localement à 2 centimètres pourrait suffire à retenir 100 tonnes de corium.

Que nous enseigne le projet IVMR, achevé en 2019, plus globalement sur la sûreté du dispositif de rétention en cuve pour les réacteurs de 1 000 mégawatts et plus ? Selon cette approche, une marge de sûreté équivalente à celle des réacteurs de deuxième génération pour lesquels la stratégie IVR a été adoptée *a posteriori* et certifiée dans plusieurs pays d'Europe (VVER-440) pourrait être atteinte. À condition de respecter certains éléments de conception, c'est-à-dire de disposer d'au moins 50 tonnes d'acier dans le fond de cuve et de systèmes de circulation d'eau capables de retarder de 6 à 12 heures la fusion du cœur. Sans cela, la marge de sûreté serait nettement réduite donc discutable, voire insuffisante. ■



NOTES

- > À partir d'une certaine valeur du flux thermique, appelée « flux de chaleur critique » (CHF), se produisent des phénomènes thermohydrauliques qui provoquent une baisse brutale de l'efficacité du transfert de chaleur.
- > IVMR : In-vessel melt retention
- > La marge de sûreté est donnée par le rapport entre l'épaisseur minimale de cuve atteinte et l'épaisseur à partir de laquelle la cuve rompt, sous le chargement le plus probable (1 à 2 bars de surpression).
- > La troisième génération désigne les réacteurs conçus à partir des années 1990.

RÉFÉRENCES

- > Projet IVMR : https://www.irs.fr/FR/Larecherche/Organisation/Programmes/projet_ivmr/Pages/Projet-IVMR.aspx
- > Main outcomes from the IVR code benchmark performed in the IVMR project, L. Carénini et al, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 146 (octobre 2020), 107612.
- > Modelling issues related to molten pool behaviour in case of In-Vessel Retention strategy, L. Carénini, F. Fichot, N. Seignour, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 118, p. 363–374, 2018.

L'ESSENTIEL

> Il y a 9 000 ans, près de Pétra, en Jordanie, une fillette d'environ 8 ans a été enterrée avec, sur elle, un collier de près de 2 600 perles.

> La richesse de la tombe pourrait faire croire que l'enfant était de haut rang social.

> Cette conclusion est contredite par le fait que, dans les villages de cette époque néolithique du Moyen-Orient, seuls des enfants recevaient un tel traitement funéraire.

L'AUTRICE



MARION BENZ
archéologue
à l'institut d'archéologie
du Proche-Orient ancien
de l'université libre de Berlin

L'enfant au collier de Ba'ja

Il y a 9 000 ans, les habitants d'un village néolithique à Ba'ja, en Jordanie, ont enterré un enfant orné d'un somptueux collier de 2 600 perles dans une tombe soigneusement édifiée. Que révèle ce traitement spectaculaire ?

Il est midi. La découverte d'une tombe extraordinaire a transformé le premier jour de fouille de Hala Alarashi en une épreuve d'endurance. La force du soleil rend le travail en montagne quasiment impossible. Depuis un bon moment déjà, les ouvriers et la plupart des archéologues sont partis se réfugier à l'ombre pour faire la sieste. Mais pas tous : le contenu de la tombe est trop précieux pour que les spécialistes puissent s'autoriser une pause. La sueur au front, Hala dégage minutieusement une minuscule perle du sable. Puis elle réfléchit à la façon de photographier l'étape de la fouille à laquelle l'équipe est parvenue. Avant de prendre son cliché, elle tente d'éloigner les mouches des ossements délicats de l'enfant inhumé il y a neuf mille ans... En vain : les insectes disputent la moindre part d'ombre aux humains.

Hala Alarashi est une archéologue du Cepam (Culture et environnement, Préhistoire, Antiquité et Moyen Âge), un laboratoire de l'université de Nice-Sophia-Antipolis. Elle est venue renforcer l'équipe d'archéologues étudiant le village néolithique de Ba'ja, dans le sud de la Jordanie. Cette équipe est codirigée par Hans-Georg Gebel, Christoph Purschwitz et moi-même, tous de l'université libre de Berlin.

Sur les indications de Manfred Lindner, spécialiste allemand de la ville nabatéenne de Pétra, Hans-Georg Gebel a découvert Ba'ja en 1984 et, depuis, y a mené plusieurs campagnes de fouilles. D'une superficie d'environ 1,5 hectare, le village >



A. Costes, Ba'ja N.P.



Un an et demi de travail a été nécessaire pour reconstituer ce collier à partir des multiples perles de calcaire rouge, de coquillage blanc, de turquoise et d'hématite trouvées dans la tombe de l'enfant de Ba'ja. À part le double collier central, tous les enfillements de perles rejoignent l'anneau de nacre irisée, découvert dans la même tombe.

> est perché sur un plateau flanqué de montagnes et entouré de gorges atteignant 70 mètres de profondeur. Avant d'y parvenir, il faut franchir des éboulis et des parois rocheuses. Certains passages ne sont pas praticables sans échelle ou corde. Eau, nourriture, pelles, truelles, brouettes... : tout le matériel nécessaire à une fouille doit être apporté à dos d'homme. Mais le site est si intéressant que, avec l'accord du service jordanien des antiquités, nous y avons tout de même lancé un nouveau projet de recherche de trois ans.

Quand, pendant l'été 2018, l'équipe est tombée sur un coffre de pierre – une « ciste » (selon le terme utilisé en archéologie) –, Hans-Georg Gebel n'était guère surpris car,

deux ans plus tôt, son équipe avait déjà trouvé une tombe d'adulte similaire. « Nous nous attendions à la présence de tombes dans cette maison, explique-t-il, car les habitants du village enterraient en règle générale leurs défunts dans des sépultures aménagées sous les sols de leurs maisons. Toutefois, la plupart des défunts étaient enterrés dans des tombes collectives où, de temps en temps seulement, nous découvrions quelques perles au milieu des amas d'os. Personne ne s'attendait donc au mobilier de la tombe de cet enfant ! » De fait, c'est bien l'une des tombes d'enfant les plus élaborées du début du Néolithique que les archéologues ont découverte contre le mur oriental d'une maison de Ba'ja.

Ses anciens habitants l'ont construite en ménageant, dans une sorte de « granito » – un mélange de graviers et de calcaire – qui recouvre le sol et dans le sédiment dur sous-jacent, un trou de 1,30 mètre par 1 mètre et profond d'environ 40 centimètres. À l'ouest et au sud de la fosse, ils ont érigé deux petits murs en pierres sèches. Après avoir dressé une dalle contre le mur sud et une autre contre la paroi nord de ce trou, ils ont fermé le caveau ainsi formé à l'aide d'une grande dalle. Ils ont ensuite recouvert le tout de plusieurs couches de morceaux plats de grès blanc brillant, qu'ils avaient préparés en fracturant des dalles juste avant l'enterrement. Ils ont enfin déposé sur l'ensemble une couche

C'est l'une des tombes d'enfant les plus élaborées du début du Néolithique

© H.-G. K. Gebel, Ba'ja N.P.



de plâtre blanc, comme s'ils voulaient sceller la tombe pour l'éternité. De fait, pendant neuf mille ans, personne ne l'avait rouverte...

Le matin où Hala Alarashi est arrivée sur le chantier, cette structure était encore pleine de sable. Nous avons passé la matinée à la fouiller minutieusement au pinceau, couche après couche. « Nous craignons qu'il ne s'agisse que d'un monument funéraire sans défunt, c'est-à-dire d'un "cénotaphe", se rappelle Hala. Nous allions abandonner quand les premières perles et fragments d'os colorés en rouge ont émergé ».

Le corps de l'enfant – qui, d'après la gracilité de sa mâchoire et de son squelette, serait une fillette d'environ 8 ans – avait été placé dans la cavité en position accroupie, le dos contre la dalle nord, et les cuisses dirigées vers le sud. Les os étaient colorés d'un pigment rouge foncé, probablement de l'ocre, dont un grand morceau était placé devant les jambes du défunt. Quant aux perles, rien au début n'annonçait leur nombre. « Nous avons commencé par les numéroter une à une, puis il y en a eu des centaines, puis des milliers et au bout de sept jours de travail, nous en avions près de 2600, se rappelle Hala. Vers la fin, nous avons prélevé les perles par groupes entiers, même si nous avons tout de même dessiné chacune d'elle sur nos croquis. » La découverte d'un anneau de nacre, servant à

UNE PETITE FILLE MORTE DE CAUSE INCONNUE

La mandibule et les dents de l'enfant au collier suggèrent qu'il s'agirait d'une fillette âgée d'environ 8 ans. La détermination du sexe sera plus certaine si les généticiens de l'institut Max-Planck de science de l'histoire humaine, à Iéna, en Allemagne, parviennent à extraire de l'ADN de l'os pétreux (partie de l'os temporal, dont la forte épaisseur favorise la préservation de l'ADN). Julia Gesky, l'anthropologue de l'équipe, a étudié de près ces os au sein du laboratoire de l'Institut archéologique allemand à Berlin, mais sans déceler, jusqu'à présent, de signes de maladie ou de blessure. Au Néolithique, les maladies infantiles tuaient sans doute beaucoup. En l'absence de traitement, même une otite ou un rhume peuvent être fatals, rappelle Julia Gesky ; et, en hiver et au printemps, les nuits dans la région de Pétra sont souvent glaciales.

accrocher de multiples enfilements de perles, nous a renseigné sur l'emploi des perles : elles faisaient partie d'un grand collier. Mais que faire de tant de matériel ?

Grâce à nos partenaires jordaniens de l'université du Yarmouk, à Irbid, et au service jordanien des Antiquités, nous avons eu la permission d'emprunter pour une année les perles et l'anneau de nacre afin de faire reconstituer le collier. Et, grâce à divers soutiens (ceux de la fondation Franz et Eva Rutzen, de la DFG – la Fondation allemande pour la recherche – et de l'association scientifique Ex Oriente fondée par des chercheurs de l'université libre de Berlin, dont Hans-Georg Gebel), nous avons pu financer rapidement la recherche sur le collier, de sorte que Hala Alarashi et, dans le cadre de son projet de master, Alice Costes, de l'Académie des Beaux-Arts de Stuttgart, ont pu commencer à le reconstituer méticuleusement.

Alice et Hala ont nettoyé puis décrit les 2586 perles mises au jour. Celles qui étaient trop fragiles – près d'un tiers – sont restées à Stuttgart afin de les préserver. Alice a restauré l'anneau de nacre, qui servait à distribuer les enfilements de perles à partir de la poitrine de l'enfant sur laquelle il reposait. Trente ans plus tôt, l'équipe de Hans-Georg Gebel avait déjà découvert un tel anneau à Basta, un village néolithique contemporain de Ba'ja distant de quelque 25 kilomètres au sud-est, ce qui ➤



© Spektrum der Wissenschaft/Emde-Gratlik

Le site de Ba'ja (à gauche) ne couvre guère plus de 1,5 hectare, mais il s'agit quand même de ce que les archéologues nomment un « mégasite », c'est-à-dire un gros village néolithique, d'une emprise pouvant aller jusqu'à 15 hectares, où vivaient ensemble des centaines, voire des milliers de gens et leurs animaux. Nombre de mégasites datant du Néolithique précéramique B récent, abandonnés au cours du VII^e millénaire avant notre ère, ont été découverts dans la région de Pétra, en Jordanie (carte ci-contre).