

POUR LA  Édition française de Scientific American

SCIENCE

numéro collector

NOVEMBRE 2018
N° 1



Les paradoxes du TEMPS

Le temps
est-il
une illusion ?

Le temps
a-t-il
une fin ?

Le temps
est-il
un luxe ?

Le temps
est-il le même
pour tous ?

BEL : 00 € - CAN : 00 CAD - DOM/5 : 00 € - Réunion/A : 00 € - ESP : 00 € - GR : 00 € - ITA : 00 € - LUX : 00 € - MAR : 64 MAD - TOM : 0000 XPF - PORT. CONT. : 00 € - CH : 00 CHF - TUN/5 : 00 TND

Chez votre marchand de journaux
le 7 novembre

L'eau, le géologue et la Grande Guerre

Comment abreuver un million de chevaux à raison de 15 à 60 litres par jour et par animal ? Comment protéger de la boue les myriades d'hommes terrés dans les tranchées ? Tels étaient les défis des géologues, acteurs méconnus de la guerre de 14-18.

Août 1914. La progression des troupes allemandes en Belgique est fulgurante. L'armée a pénétré les Flandres du nord, des plaines basses lardées de canaux et de cours d'eau qu'une simple bande de dunes sépare de la mer du Nord. L'armée belge résiste difficilement. Le 21 octobre, en ultime recours, alors que les Allemands s'approchent de Nieuport, les Belges décident d'inonder artificiellement la plaine. Ils ouvrent les portes de l'écluse de la vieille Yser, par lesquelles l'eau de mer se déverse sur 4 kilomètres carrés dans la dépression du fleuve. Puis, dans la nuit du 29 au 30 octobre, des soldats belges rejoignent à bicyclette des écluses situées sur la ligne allemande et les ouvrent. Bientôt, non seulement 50 kilomètres carrés de terrains inondés barrent la route aux Allemands, mais les tranchées qu'ils avaient creusées alentour sont noyées et inexploitable.

Le revers de Nieuport a marqué les ingénieurs militaires allemands. Très vite, ils ont compris l'importance des connaissances hydrogéologiques dans la conduite de cette guerre. De fait, la géologie a contraint chaque instant de la Première Guerre mondiale. Comme par le passé, dès le début du conflit, la topographie a

guidé la guerre de mouvement. Il fallait prendre les points hauts pour s'y retrancher et ancrer son artillerie en surplombant de préférence les rivières, véritables barrières naturelles. Mais le rôle clé de la géologie, et notamment de l'hydrogéologie, est vraiment apparu lorsque, à l'automne 1914, le front s'est stabilisé du fait de la puissance inédite de l'artillerie. Le conflit est alors devenu une guerre de position, qui ne faisait pas partie de la stratégie. Il imposa des contraintes nouvelles comme l'approvisionnement en eau et en matériaux, la construction d'abris et de tranchées, l'exploration du sous-sol. C'est ainsi que, pour la première fois, des géologues ont été employés pour leur métier durant un conflit. En examinant cette guerre avec des yeux de géologue, on mesure à quel point le rôle de cette discipline y a été essentiel, en particulier pour la gestion de l'eau.

DE L'EAU POTABLE POUR LES SOLDATS

Avec la stabilisation du front fin 1914, les puits existants ne suffisaient plus à approvisionner les soldats et leurs chevaux en eau potable, et les eaux de surface sont polluées. Or, en moyenne, un cheval consomme entre 15 et 60 litres d'eau par jour, et les Français ont mobilisé un million de chevaux. Pour son corps expéditionnaire >



© Coll. La contemporaine, cote VAL 416.108

L'ESSENTIEL

> La Première Guerre mondiale fut le premier conflit où l'on employa des géologues pour leur métier.

> Lorsque la ligne de front s'est figée, fin 1914, l'eau et l'espace souterrain sont devenus particulièrement convoités.

> En étudiant les spécificités du sol tout le long de cette ligne,

des géologues britanniques, allemands, français et australiens ont aidé les armées à s'approvisionner en eau et à éviter les nappes phréatiques lors du creusement des tranchées et des galeries souterraines.

LES AUTEURS



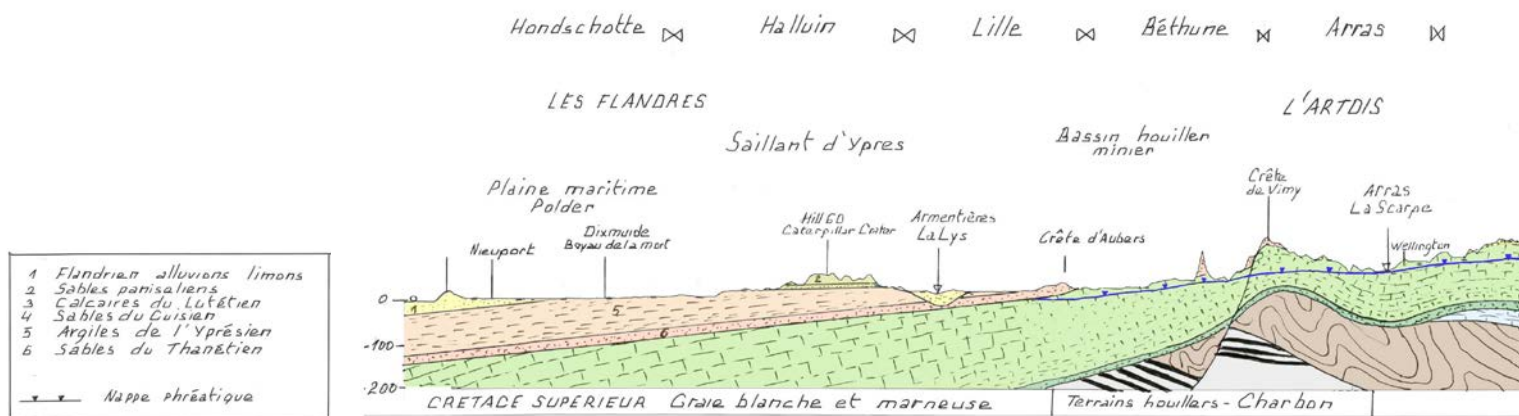
FRANCK HANOT
géologue, créateur
de la société CDP
Consulting, à Blois



FRÉDÉRIC SIMIEN
géochimiste,
responsable des
éditions du BRGM,
à Orléans



Un soldat remplit sa gourde grâce à un réservoir d'eau stérilisée le 4 janvier 1917 à Lamotte-en-Santerre, dans la Somme, au milieu d'une boue collante.



> (1,5 million d'hommes et 500 000 chevaux et mules en 1916), l'armée britannique estime à 76 000 mètres cubes les besoins quotidiens en eau potable, soit environ 25 piscines olympiques. À cela s'ajoute l'eau pour les boulangeries et les boucheries de campagne, le lavage, les locomotives, la fabrication du béton pour construire les abris... L'enjeu est considérable. Il est donc nécessaire de procéder à des forages et de protéger leur aire de captage des pollutions.

L'armée française est en terrain connu. Grâce aux connaissances géologiques de son service de l'eau potable, elle a déjà foré des milliers de puits dans la région sans l'aide des hydrogéologues académiques et n'éprouve pas immédiatement le besoin de faire appel à eux, même si, peu à peu, des géologues civils, tel le pétrologue et géologue de terrain Charles Barrois, directeur des laboratoires de Lille, sont mis à disposition comme conseillers. En revanche, pour les armées britannique et allemande, la situation est tout autre. La géologie du terrain leur est complètement inconnue. De plus, ils n'ont pas de service géologique dédié aux applications militaires.

En juin 1915, face aux difficultés d'approvisionnement en eau dans le nord de la France, le *War Office* dépêche un géologue du Service géologique britannique. Bill King est affecté au commandant en chef du génie. Son premier travail consiste à compiler les données géologiques pour déterminer les secteurs favorables à l'implantation de puits. Sous son impulsion, l'armée britannique se dote aussi d'un matériel dérivé des techniques de forage pétrolier pour atteindre l'eau en profondeur, moins susceptible d'être polluée. Il supervise ainsi les emplacements d'au moins 470 forages d'eau, dont certains sont toujours utilisés. Sur cette base, son équipe établit une carte hydrogéologique de la Somme.

En mai 1916, le major australien Edgeworth David vient renforcer l'équipe. Les Allemands sont en train de prendre l'avantage dans la guerre sous terre et il doit aider à reprendre le dessus. Son apport majeur est de déterminer,

dans les Flandres, la profondeur et l'extension du niveau d'argile bleue du Thanétien, un étage géologique vieux de 56 à 59 millions d'années. Cette couche est en effet la plus adaptée au creusement de tunnels pour placer des mines sous les lignes ennemies – un élément décisif dans la préparation de l'attaque de la crête Messines-Wytschaete, programmée à l'été 1916.

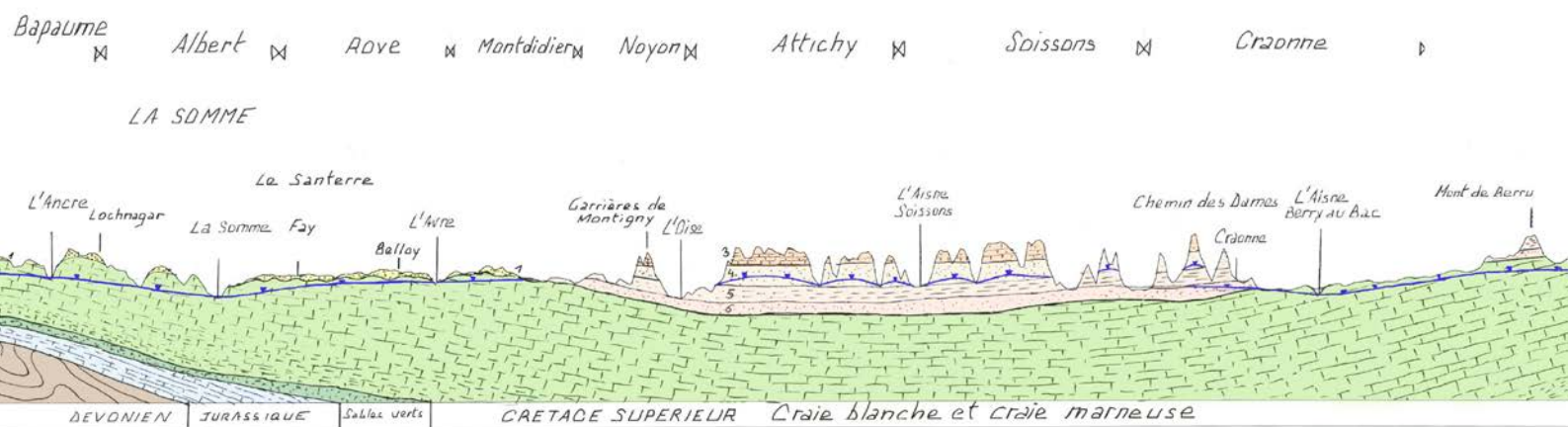
De leur côté, les Allemands ont vite les mêmes préoccupations. Début 1915, les géologues des unités combattantes sont réaffectés dans une unité semi-militaire sous le commandement de Hans Philipp, professeur de géologie à l'université de Greifswald. Ils réalisent des cartes d'approvisionnement en eau à l'échelle 1/50 000 avec des indications sur la qualité et la quantité. L'un des plus grands systèmes mis en place par les Allemands semble être un réseau d'alimentation en eau du côté de la crête Messines-Wytschaete. L'eau pour approvisionner les soldats provient de quatre puits de profondeurs comprises entre 156 et 256 mètres situés dans les environs d'Halluin, à une quinzaine de kilomètres à l'est. Les 6 000 mètres cubes pompés quotidiennement alimentent 2 000 robinets sur une superficie de 155 kilomètres carrés. Par la force des choses, la géologie militaire allemande gagne peu à peu la meilleure expertise du terrain : elle a sous sa responsabilité 3 000 kilomètres de ligne de front, contre 600 kilomètres pour les Français et 150 pour les Britanniques. C'est en effet elle qui fournit les informations topographiques et géologiques à ses alliés austro-hongrois, bulgares et turcs.

LE CAUCHEMAR DU MARMITAGE

Gérer l'eau ne consiste pas seulement à assurer son approvisionnement. L'eau peut aussi représenter un obstacle et, là encore, la connaissance du terrain est indispensable pour la contrer. Pour la première fois, une guerre s'accompagne d'un bombardement dense et continu d'obus. Ce « marmitage » de l'artillerie transforme le sol en une boue collante où

COUPE GÉOLOGIQUE LE LONG DE LA LIGNE DE FRONT

Du rivage belge à la frontière avec la Suisse, la ligne du front occidental vers l'automne 1914 recoupe des entités géologiques et hydrogéologiques très différentes. Ces terrains appartiennent pour la plupart au bassin de Paris, vaste cuvette encadrée au nord par la plaine des Flandres et à l'est par le massif des Vosges. La craie du Crétacé supérieur, épaisse d'environ 500 mètres (en vert) affleure dans l'Artois, dans la Somme et en Champagne. Cette roche assez homogène contient une importante nappe phréatique. Elle est couverte localement, comme au Chemin des Dames, par des couches d'âge tertiaire peu épaisses contenant de petites nappes phréatiques à l'origine de nombreuses sources.



pataugent les fantassins pendant des semaines. Celle-ci envahit les tranchées et devient un piège mortel pour les hommes qui ne parviennent pas à s'en extraire. D'autant que la période du conflit est très humide: 648 jours de pluie ou de neige sur les 1563 jours de guerre. Or deux types de terrains sont particulièrement redoutés dans ce cas, car l'eau y est plus susceptible de recouvrir les cratères d'obus: les terrains argileux, peu perméables à l'eau, et ceux où des eaux souterraines sont présentes à faible profondeur. En Picardie, par exemple, l'eau est contenue dans des sables, sous pression sous une mince couche d'argile. Un obus suffit à traverser cette couche et à mettre à nu les nappes phréatiques.

L'armée britannique estime à 76000 m³ les besoins quotidiens en eau potable

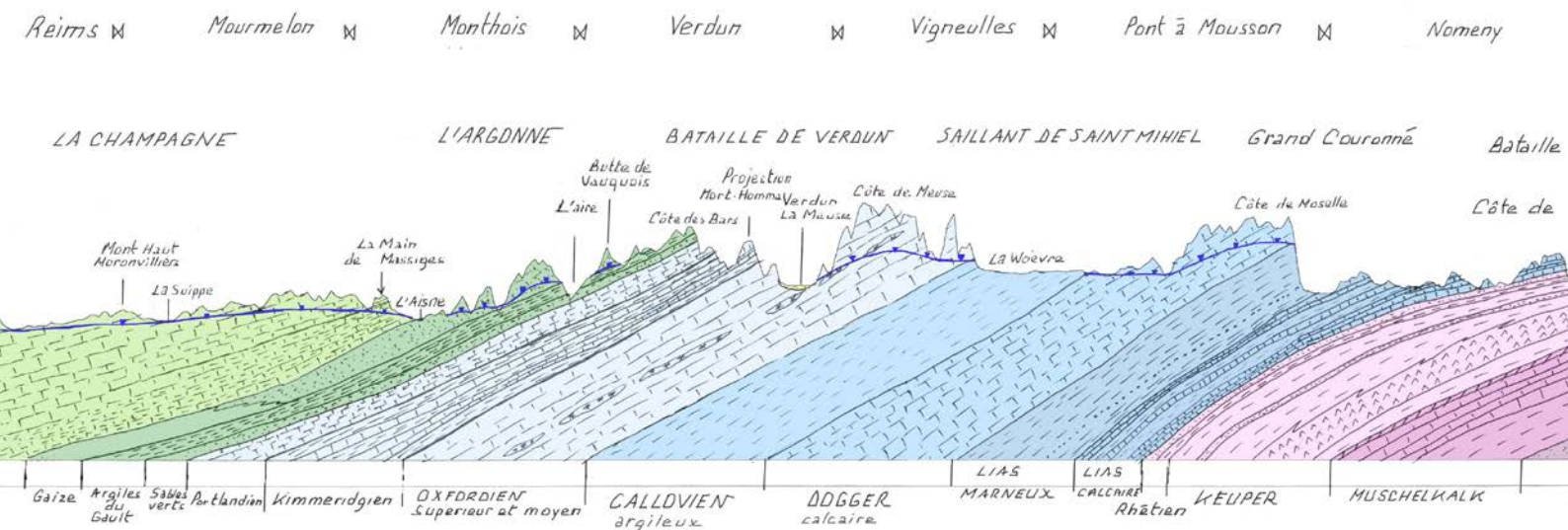
La présence d'eau en profondeur doit aussi être connue avec précision afin de l'éviter lorsque l'on creuse des galeries souterraines pour progresser ou séjourner à l'abri de l'ennemi. Or la répartition de l'eau en surface et en profondeur dépend de la nature des roches. Un calcaire ou un grès poreux et fracturé font un excellent réservoir aquifère pouvant contenir jusqu'à 40% d'eau, tandis que l'argile ne contient pas d'eau et joue un rôle d'écran. La pluie alimente les couches aquifères par

infiltration. Ce phénomène détermine en profondeur un contact entre une tranche supérieure sèche où les vides contiennent de l'air, car l'eau ne fait que transiter, et une tranche inférieure saturée, où les vides contiennent de l'eau. Ce phénomène est dynamique, car les sources alimentant les cours d'eau vidangent ces mêmes aquifères. Des couches d'argile plus ou moins épaisses compliquent le mécanisme en créant des zones où l'eau est totalement absente. Les stratégies adoptées dépendent de tous ces paramètres et varient selon les régions.

GUERRE DES TAUPES DANS LES FLANDRES

L'eau de la plaine des Flandres fait de cette zone un enfer pendant tout le conflit. Les terrains de cette plate région sont constitués d'argile et de sables de l'Yprésien (vers 50 millions d'années), définis d'après la ville d'Ypres, en Belgique. Le réseau de drainage détruit en octobre 1914 laisse rapidement place à une constellation de trous d'obus remplis d'eau. Le soldat ne peut évoluer que dans les tranchées spécialement équipées de caillebotis. Un arc de collines composé des Monts des Flandres domine la région d'Ypres par l'est et le sud. Ces reliefs sont le siège de la guerre des mines dans des lieux tels que Hooge, Zillebeke, Hill 60, Caterpillar Crater, Saint-Éloi, the Bluff, Wytschaete...

L'objectif est de détruire l'ennemi en positionnant sous ses lignes, à quelques dizaines de mètres de profondeur, des charges d'explosif pouvant atteindre 40 tonnes. Placer ces charges nécessite le creusement de galeries inclinées partant de la surface et recoupant des couches de sables et d'argiles. Si creuser dans les argiles ne présente aucun danger, atteindre une couche de sable gorgée d'eau risque de noyer la galerie, ne laissant aucune chance aux tunneliers. Les géologues militaires du Commonwealth, en particulier les Anglais et les Australiens, sont mobilisés pour mener des études préliminaires afin de limiter les risques.



Plus au sud, séparant la plaine des Flandres des plaines crayeuses du nord du bassin de Paris, le relief des collines de l'Artois est jalonné de hauts lieux tels que Notre-Dame-de-Lorette et la crête de Vimy. Au cours des combats de 1915, les Français perdent environ 40000 hommes dans le borbier du flanc nord de Notre-Dame-de-Lorette – un lieu décrit comme un paysage de cauchemar où boue et restes humains sont mêlés. Il est vrai qu'une faille coupe la butte, préservant au nord les argiles du Tertiaire. En 1916, les alliés mettent à profit l'absence d'eau dans le relief de la crête de Vimy pour y creuser des galeries afin d'y placer des mines et désorganiser l'ennemi. Le jour de Pâques 1917, ils percent les lignes et avancent sur plusieurs kilomètres. Les Canadiens, qui y ont gagné en émancipation vis-à-vis de la tutelle britannique, considèrent cette victoire comme l'acte fondateur de leur nation.

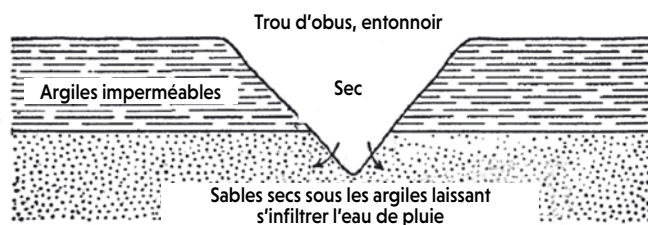
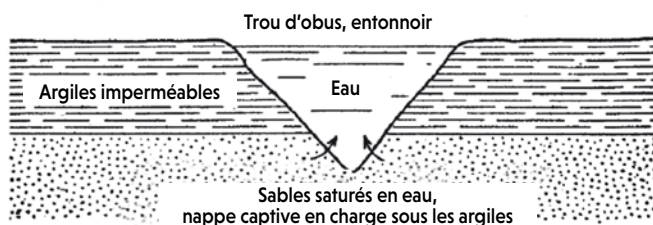
C'est la même absence d'eau sur une épaisseur d'environ 30 mètres dans la craie dite dénuyée qui, plus au sud, sous la ville d'Arras (faubourgs Ronville et Saint-Sauveur), permet l'aménagement par des tunneliers néo-zélandais de cantonnements souterrains capables d'accueillir 25000 soldats britanniques. Néanmoins, malgré l'effet de surprise avec des soldats jaillissant de terre, la bataille d'Arras, du 9 avril au 7 mai 1917, se solde par d'importantes pertes et un gain limité sur le terrain.

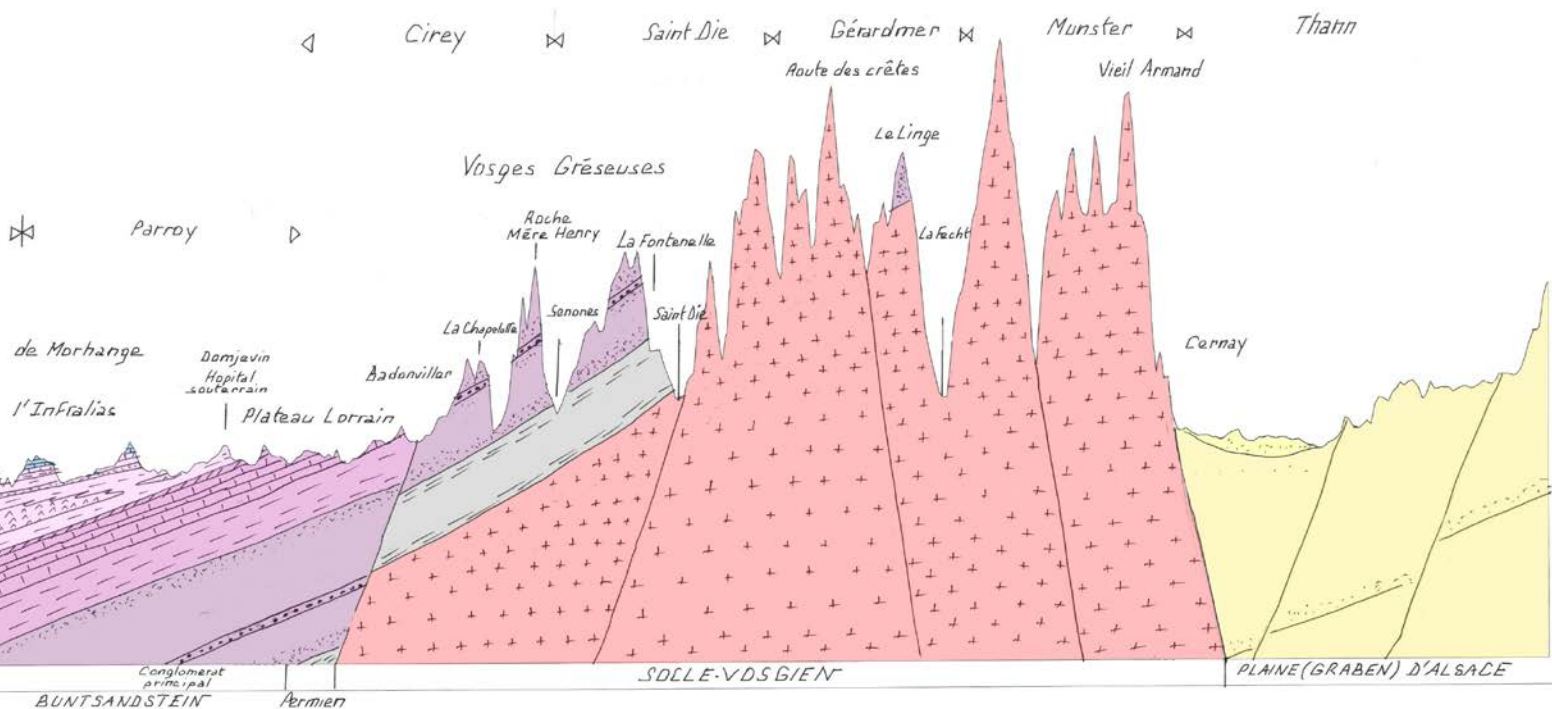
Pour préparer la bataille de la Somme, de nombreux ouvrages souterrains sont aussi creusés au nord de la rivière éponyme, dans une craie parfaitement sèche sur plusieurs dizaines de mètres. Elle démarre le 1^{er} juillet 1916 avec dix-neuf explosions simultanées considérables. Au sud de La Boisselle, les mineurs gallois ont placé 27 tonnes d'explosif (ammonal) à 16 mètres de profondeur sous les lignes allemandes, dont l'explosion laisse un cratère toujours visible de 90 mètres de diamètre pour 30 de profondeur.

La Champagne pouilleuse où le front se stabilise pendant quatre ans est le pays de la soif, un désert blanc où la poussière de craie dessèche la bouche. Les rares points d'eau nécessitent des corvées sur des distances de plusieurs kilomètres. L'eau est essentiellement souterraine et, contrairement aux armées allemandes et britanniques, équipées de foreuses et de pompes, rien n'a été prévu pour les poilus français. L'intensité des combats rase des villages de la carte. Les dégâts sont tels que de grands espaces seront conservés en l'état et convertis en terrains d'essais (Moronvilliers) ou d'entraînement militaire (Suippes).

En Argonne, région couverte de forêts au relief marqué, la butte de Vauquois est un site emblématique. C'est la zone d'affleurement de la gaize, une roche particulière de couleur verdâtre, à la fois poreuse et légère, mais relativement résistante. La butte de Vauquois constitue

Selon le terrain, un trou d'obus est vite inondé en cas de pluie ou reste sec, le sol drainant les eaux de pluie.





une butte témoin culminant à 285 mètres. L'érosion l'a modelée et séparée de la couche initiale, lui faisant dominer les environs d'une hauteur de 120 mètres. À partir du 21 février 1916, Vauquois voit son rôle de poste d'observation renforcé. La géologie particulière de cette butte témoin dénoyée (sans nappe phréatique) et cette roche si propice au creusement de galeries (17 kilomètres sont percés) permettent une guerre souterraine folle, au cours de laquelle sont recensées 519 explosions. En quatre ans de conflit, près de 15 000 hommes trouvent la mort sur cette petite parcelle de Lorraine (8000 Français, 6300 Allemands et 100 Américains).

UN HÔPITAL DANS LES MARNES DE LA LORRAINE

En Lorraine, à l'est de Nancy, la ligne de front d'octobre 1914 fluctue également très peu pendant quatre ans. La topographie de cette zone se caractérise par de molles ondulations de quelques dizaines de mètres. Les terrains constituant le soubassement correspondent aux marnes du Keuper inférieur, un étage géologique vieux de 230 à 220 millions d'années. Creuser des galeries dans ces marnes ne présente *a priori* pas de difficulté, car les couches aquifères sont pratiquement inexistantes et, par conséquent, il est rare que les eaux envahissent les conduits. Les sapeurs allemands profitent de leur connaissance du terrain pour creuser des mines vers le sud sous les lignes françaises depuis Leintrey. L'explosion du 11 juillet 1916 pulvérise une grande partie d'une compagnie du 162^e régiment d'infanterie et laisse place à des entonnoirs d'une cinquantaine de mètres de diamètre et de vingt mètres de profondeur. Plus au sud, à Domjevin (côté français), un hôpital destiné à soigner les blessés intransportables est mis en

chantier à partir de juillet 1916 dans une butte constituée des mêmes marnes. Il ne sera jamais mis en service, car il est planifié pour une offensive prévue le... 14 novembre 1918.

La guerre dans le Massif des Vosges présente de nombreux défis techniques. Les combats souterrains sont menés là où le relief, la géologie et l'hydrogéologie le permettent. L'eau ne doit pas être un obstacle dans le creusement d'ouvrages souterrains atteignant parfois 80 mètres de profondeur dans les grès relativement tendres du Trias inférieur (vers 250 millions d'années), comme à La Chapelle. Elle est vitale sur les crêtes pour alimenter les troupes, mais aussi pour fabriquer le béton des abris là où le creusement dans la roche trop dure est impossible.

Les connaissances des géologues ont ainsi joué un rôle fondamental dans le déroulement de la Grande Guerre. Et si elles ont été précieuses pour l'approvisionnement en eau et le creusement des galeries, elles ont aussi été fort utiles pour de nombreux autres aspects méconnus et insolites, comme l'établissement de cartes de praticabilité pour les tanks ou l'expertise des matériaux des compas d'aviation et des cristaux de quartz, qui ont servi à développer les premiers sonars, destinés à détecter les sous-marins, ou encore pour répondre à la grande demande de minerais et de pétrole. Aujourd'hui, alors que l'on commémore le centenaire de la fin des combats, des géologues continuent d'apporter leur expertise aux conflits modernes. Mais d'autres scrutent toujours les champs de bataille de la Première Guerre mondiale. Ils y étudient à présent son impact en termes de pollution chimique ou recherchent des cavités dangereuses à sécuriser. Les géologues n'en ont pas fini avec la Grande Guerre. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Hubé, 14-18, **Tremblements de guerre**, BRGM éditions, 2018.

F. Hanot et F. Simien, **De la guerre, de la géologie, de la pétrole**, BRGM éditions, 2017.

E. P. F. Rose et J. D. Mather, **Military aspects on hydrogeology**, GSL Special Publications, 2012.

A. H. Brooks, **The use of geology on the western front**, USGS, 1920. <https://on.doi.gov/2NKBvso>

R

ENDEZ-VOUS

P.78 Logique & calcul
 P.84 Idées de physique
 P.88 Science & fiction
 P.92 Chroniques de l'évolution
 P.96 Science & gastronomie
 P.98 À picorer

UN GRAPHE UNIVERSEL ET SINGULIER

Qu'un seul nombre puisse contenir, dans ses décimales, tous les autres est déjà un fait étrange et troublant. Mais le monde des graphes présente une situation analogue encore plus surprenante, qui frôle le paradoxe.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
 professeur émérite
 à l'université de Lille
 et chercheur au Centre
 de recherche en
 informatique, signal
 et automatique de Lille
 (Cristal)



Jean-Paul Delahaye a récemment publié : **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

Les nombres universels contiennent toutes les images numériques, tous les textes possibles, et tous les nombres finis ou infinis, y compris eux-mêmes une infinité de fois. De même, le « graphe universel de Rado » contient tous les graphes finis ou infinis. Il existe cependant une différence importante entre ces deux universels : il y a une infinité de nombres universels, alors que le graphe universel de Rado est unique. Il est l'un de ces objets mathématiques aux propriétés déconcertantes dont les chercheurs découvrent l'existence avec stupeur et émerveillement. Aventurons-nous dans ce monde étrange de l'universalité mathématique.

LES NOMBRES UNIVERSELS

En choisissant successivement des chiffres au hasard $a_1, a_2, a_3, \dots$, par exemple avec un dé à dix faces et en les prenant comme les décimales successives d'un nombre commençant par 0, on définit un nombre réel u compris entre 0 et 1 : $u = 0, a_1 a_2 a_3 \dots$. Nous considérons ici l'écriture des nombres en base 10, mais ce que nous allons affirmer s'étend à toute base de numération.

Si votre dé est équilibré, c'est-à-dire si chaque face tombe avec une probabilité de $1/10$, le nombre u est un nombre universel, ou « nombre univers », ou « nombre disjonctif ». Par définition, cela signifie que toute suite finie de chiffres se situe quelque part après la virgule, en un seul bloc, dans les décimales de u .

Dans u , vous trouverez donc par exemple 20 fois de suite le 7, ou 1000 fois de suite le 0,

ou la séquence 19982018. Cela signifie aussi que si vous codez la photo de votre grand-père par une suite de chiffres, par exemple avec un million de chiffres lus comme des niveaux de gris et qui, disposés en un carré de 1000 pixels sur 1000, reproduisent la photo, alors cette photo de votre grand-père est quelque part dans ce nombre universel. Bien sûr, dans u , il y a aussi la photo de votre chat, celle de Georg Cantor, celle de la tour Eiffel en construction en janvier 1888, celle de Neil Armstrong posant le pied sur la Lune le 20 juillet 1969, etc. En utilisant un codage où deux chiffres consécutifs définissent un numéro de lettre, vous trouverez aussi dans le nombre universel u le texte des *Éléments* d'Euclide, la déclaration universelle des droits de l'homme en serbo-croate, *Le Capital* de Karl Marx écrit en français à l'envers et en supprimant la page 666, et même le texte de cet article ou le récit en dix pages de votre journée de demain. Je n'insiste pas, à vous d'imaginer.

La méthode du dé à dix faces pour définir un nombre universel n'est pas parfaitement satisfaisante, car elle fait intervenir le hasard et qu'il faut attendre un temps infini pour en disposer ! Une autre méthode, cette fois déterministe, proposée par David Champernowne, un ami d'Alan Turing, consiste à écrire les uns derrière les autres les chiffres des entiers : le nombre de Champernowne $Ch = 0,1234567891011121314151617181920212223\dots$ est universel. Concaténer les nombres premiers donne aussi un nombre universel.

Par définition, les nombres universels contiennent toutes les suites finies possibles de ➤