

SUR LE MODE DE FORMATION
DES
GROTTES ET DES VALLÉES SOUTERRAINES

RÉPONSE
A LA NOTE CRITIQUE DE M. A. FLAMACHE

PAR

E. Van den Broeck

Conservateur au Musée Royal d'Histoire naturelle de Belgique, à Bruxelles.

Dans la communication qu'il a présentée à la Société, en sa séance du 16 avril dernier, sous le titre : *Sur la formation des grottes et des vallées souterraines*, notre collègue et ami, M. A. Flamache, a exposé les objections que lui a suggéré l'examen critique de ce qu'il appelle la **théorie chimique** de M. E. Dupont et la **théorie chimico-mécanique** de M. E. Van den Broeck, d'après lesquelles ces deux collègues expliqueraient, suivant des vues qui leur seraient absolument personnelles, la formation des grottes et des vallées souterraines. C'est surtout à l'**action chimique** qu'il s'en prend, car il termine et résume la partie critique de son travail en disant :

« En résumé trois objections sérieuses peuvent être produites contre la théorie qui avance que les cavités observées dans le calcaire ont été fournies par de l'eau acidule filtrante :

» 1° L'action chimique de l'eau acidule filtrante ne s'étend qu'à de faibles profondeurs;

» 2° Si la caverne était préexistante il devrait y avoir des culs de sac dans les galeries. Au lieu d'être la rare exception, ce devrait être la règle.

» 3° L'argile de dissolution trouvée dans les cavernes ne peut provenir exclusivement de leur masse. Elle a été apportée par des courants. »

Mes études antérieures sur les phénomènes d'altération et de dissolution des roches diverses de l'écorce terrestre par l'action chimique des eaux d'infiltration (1), ne me permettent pas de laisser sans examen contradictoire l'étude de M. Flamache. Je serai toutefois assez bref, car je pense que minime sera le nombre des géologues et des observateurs auxquels M. Flamache aura réussi à faire partager ses vues sur la localisation toute superficielle de l'action chimique dissolvante des eaux météoriques et sur le rôle, pour ainsi dire nul, qu'il leur accorde dans la formation plus profonde des grottes et des cavités souterraines. J'hésite d'autant moins à prendre la parole dans cet intéressant débat que j'espère pouvoir montrer à mon excellent confrère et ami qu'il n'a tort que par suite d'un véritable *malentendu*, basé sur la définition diversement comprise de l'expression « eaux d'infiltrations » et parce que les *conditions matérielles* de son dispositif expérimental sont tout autres que ce qui se passe dans la nature.

Écartons tout d'abord cette idée fautive de M. Flamache qu'il croit combattre une théorie chimique appartenant à M. E. Dupont et une théorie physico-chimique appartenant à M. Van den Broeck. L'erreur initiale de M. Flamache lui apparaîtrait à la simple lecture de la plupart des traités de géologie, d'hydrologie et des ouvrages traitant des cavernes et de la circulation souterraine des eaux. Il verrait que certains observateurs, comme M. Martel, ayant constaté, dans de nombreux cas, des érosions mécaniques — comme cela se remarque dans les rivières souterraines de certaines régions de la France, notamment dans les Causses — défendent un rôle parfois prépondérant pour l'*action mécanique*, sans toutefois nier aucunement l'action chimique. D'autres défendent — avec moins d'esprit systématique et exclusif que M. Dupont, il est vrai — l'intensité de l'*action chimique*; mais nombreux sont ceux qui, comme moi, reconnaissent que les deux facteurs entrent — ou sont entrés — en jeu, ici simultanément, mais avec des intensités variables; là isolément ou successivement; mais avec cette restriction que, considérée d'une manière générale, c'est l'*action chimique* qui a l'absolue prépondérance.

C'est donc à l'état actuel et synthétique de nos connaissances sur la formation des grottes et des cavernes que M. Flamache oppose ses vues personnelles, et non à ce que M. Dupont ou moi pensons de cette question.

(1) *Mémoire sur les phénomènes d'altération des dépôts superficiels, par l'influence des eaux météoriques, étudiés dans leurs rapports avec la géologie stratigraphique*, par ERNEST VAN DEN BROECK. — Mém. cour. et Mém. d. sav. étrang. de l'Acad. r. des sciences de Belgique, t. XLIV, 1880, 180 p., 1 pl., 32 fig. texte.

M. Flamache divise son étude en une *partie critique*, qu'il croit INATTAQUABLE, et en une *partie théorique*, qu'il reconnaît être sujette à objection, et il demande que toute controverse qui pourrait être soulevée au sujet de son travail veuille bien traiter à part les deux parties distinctes de son étude. Il en sera fait ainsi.

Examen de la partie critique du travail de M. Flamache.

M. Flamache conteste à l'action chimique des *eaux filtrantes* — dont la lenteur de circulation exclut tout phénomène mécanique connexe — le rôle qui lui attribue la formation, au moins initiale, des grottes et cavités du calcaire. Quels sont les faits qu'il oppose à cette thèse ?

Il annonce qu'une telle action est tout à fait SUPERFICIELLE et il croit pouvoir fixer à *deux ou trois mètres seulement* le parcours limité que les *eaux filtrantes* sont capables de faire en profondeur, armées de leur pouvoir dissolvant !

Réfutation sommaire des six ordres de faits avancés comme arguments par M. Flamache.

Six ordres de faits sont énumérés par lui en faveur de sa thèse :

« 1° Certains plafonds de cavernes, notamment dans la grande salle de la grotte de Han, sont à quelques mètres au-dessous de la surface du sol. Les fissures qui donnent de l'eau sont garnies de stalactites. L'eau arrive donc fortement chargée de bicarbonate de chaux. »

Voici donc nettement reconnu par M. Flamache *le principe initial* de la dissolution chimique du calcaire par l'acide carbonique des eaux pluviales. Or cette dissolution qui, comme résidu, donne lieu à la formation des concrétionnements calcaires appelés stalactites, ne peut se faire que corrélativement à l'élargissement des fissures par où l'eau s'est frayée un passage. Il y a donc formation chimique de cavité ou de vide tout au moins, là où il y avait primitivement du calcaire. Le *principe* du processus que combat M. Flamache se trouve donc nettement reconnu exact par lui-même. Quant à ce qui concerne la formation de la grotte de Han, d'où M. Flamache tire son premier argument, qui donc a jamais pu songer à l'attribuer aux quelques gouttes d'eau, chargées en effet de bicarbonate de chaux, qui suintent continuellement de la voûte ! Il serait péril d'insister sur ce point.

« 2° Dans les carrières de pierres calcaires, le remplissage des grands limés blancs, produits par la suée de la pierre, se remarque à quelques mètres de la surface du sol. Or, ce dépôt calcaire ne pourrait se produire si l'eau qui parcourt les fissures au moment de leur remplissage était chargée d'acide carbonique libre. »

Je suis bien fâché de devoir le faire remarquer à mon excellent ami M. Flamache, mais il commet ici une véritable *hérésie scientifique* en confondant les limés blancs cristallisés et spathiques de nos dépôts calcaires avec les concrétionnements dus aux actions post-tertiaires (en ce sens qu'elles sont surtout quaternaires et modernes) ayant amené la formation des cavernes du calcaire. Ces limés blancs, dont le processus générateur est bien différent, et dont l'âge a souvent devancé celui des grandes actions de plissement et de dérangement orogénique de nos terrains primaires, n'ont *absolument rien à voir* avec le sujet qui nous occupe. Ils s'observent, non seulement à quelques mètres de la surface du sol, mais encore dans les plus grandes profondeurs de nos calcaires, atteintes par l'investigation humaine. Dans les régions saillies et bouleversées de nos roches calcaires, on voit nettement les limés en question interrompus, coupés et rejetés, au même titre que les strates elles-mêmes, par les failles et cassures orogéniques ayant, après la fin du Primaire, affecté les massifs calcaires. Ce fait montre la haute antiquité des *limés* et leur absolue différence d'âge et de mode de formation, d'avec les stalagmites, stalagmites et concrétionnements calcaires, corrélatifs à la formation, toute récente relativement, des grottes et des cavités du calcaire. L'argument de M. Flamache n'a donc aucune portée réelle.

« 3° Dans les bancs de calcaire magnésien, partiellement dolomitisés, la transformation de la masse en dolomie s'observe sur une épaisseur de quelques mètres. En admettant avec M. Dupont que ce métamorphisme eût été produit par l'ablation chimique de l'excès de calcaire, celui-ci serait donc enlevé sur 2 ou 3 mètres *au plus* par les eaux acidules filtrantes qui ont parcouru la masse de dolomie supérieure sans abandonner leur acide carbonique libre. »

Ici encore l'argument présenté par M. Flamache pêche par la base. Certes on peut observer, dans certains cas, l'action de dolomitisation du calcaire localisé dans 2 ou 3 mètres. Mais on peut aussi l'observer sur des épaisseurs considérables. Ainsi, sans quitter les calcaires belges, M. Flamache pourrait observer fréquemment des épaisseurs de 50, 100 et 200 mètres de calcaires dolomitiques. Je soupçonne fort que c'est en

se basant uniquement sur les quelques mètres de calcaire dolomitique caverneux qu'il a vu avec nous à Namur, sous la conduite de M. Dupont, que M. Flamache a basé tout son argument. Dans le Trias du Tyrol, dans le pays de Salzbourg, il y a des massifs de calcaire dolomitique, connus sous le nom de Dolomie principale, ou de Grande Dolomie (*Hauptdolomit*) massifs qui sont puissants de 500 à 1000 mètres. Si notre séance se tenait à Salzbourg, après une excursion dans ces merveilleuses montagnes de marbre dolomitisé du Tyrol, M. Flamache aurait été forcé de nous déclarer alors que l'eau pluviale opère ses effets chimiques à *un kilomètre* de profondeur. Nous ne lui en demandons pas tant!

Quant aux causes qui permettraient ou empêcheraient, à partir d'une certaine profondeur, la continuation du processus chimique qui, d'après les idées acceptées par M. Flamache, aurait produit la dolomitisation des calcaires, elles ne dépendent pas uniquement, comme il paraît le croire, de la profondeur à laquelle, dans cette hypothèse, l'eau filtrante peut atteindre — ou a pu naguère atteindre — munie de ses pouvoirs chimiques, mais de *nombreux facteurs*, dont les plus importants seraient alors les variations ou alternances d'origine ou d'état de la *composition originnaire* de la roche, les causes d'écoulement rapide de l'eau, par suite de failles, cassures ou canaux circulatoires irrégulièrement répartis au sein de la roche et bien d'autres motifs encore; sans compter que le phénomène de la dolomitisation, lorsqu'il n'est pas *initial*, a pu se produire à des âges géologiques divers, pendant lesquels les conditions d'exposition, d'affleurement, d'orographie et aussi d'hydrographie superficielle et souterraine ont varié sans cesse et n'ont pu que dans certaines de leurs phases, contribuer à la production, partielle et localisée, de ce phénomène complexe de la dolomitisation. Pas plus que les deux précédents, cet élément ne saurait donc fournir d'argument sérieux appuyant les vues de mon honorable contradicteur.

Mais, en répondant à M. Flamache, je suis resté ici dans le domaine de l'*hypothèse* acceptée par lui en ce qui concerne l'âge relativement moderne du processus de dolomitisation de nos calcaires dolomitiques: devoniens et carbonifères. Il y a encore là une autre grosse objection de principe à soulever en ce qui concerne l'âge post-sédimentaire de ce processus; ce qui n'est nullement démontré comme une loi générale. Je préférerais laisser à un spécialiste le soin d'examiner ce point de vue, dont l'examen contradictoire m'entraînerait trop loin, mais qui — je puis cependant le garantir — sera des moins favorable à M. Flamache.

Je me bornerai à une objection que m'a suggérée, avec raison, notre collègue M. *Stainier*. Le calcaire, qui n'est pas perméable par lui-même, ne l'est que par ses fissures. Si la dolomitisation des calcaires magnésiens devait être uniquement attribuée à l'infiltration des eaux météoriques qui parcourent celles-ci, ce serait le *long des fentes et des fissures* que la dolomitisation devrait constamment se produire. Or on observe *très souvent le contraire* : c'est-à-dire des calcaires fissurés avec noyaux et filots dolomitiques *au centre* des blocs qui séparent les fissures; alors que le cas contraire, d'après M. *Stainier*, n'est pas observable. Que répondra à cela M. Flamache?

« 4° Dans trois aiguigeois de petite dimension observés par moi (et dont l'un a été observé par la Société lors de son excursion d'octobre 1894 à Rochefort), la coupe en long, effectuée par l'exploitation d'une des carrières visitées, donnait lieu à un canal sinueux, mais de section parfaitement constante. (Voir *Bull. Soc. belge de Géologie*, t. IX, 1095; *Mém.*, p. 358, fig. 1.) »

M. Flamache admet que la partie évasée ou en entonnoir, haute, dit-il, de 2 à 3 mètres, pourrait être due à l'action chimique sur les parois; mais il croit que les eaux étaient saturées à la base du canal d'écoulement, car si celui-ci avait été dû à une action chimique, le diamètre du dit canal aurait décré en profondeur.

Est-ce là un argument? D'abord, le canal indiqué par M. Flamache et qui n'était guère visible que de loin, au sommet des parois de la carrière, n'était-il pas simplement la section transversale d'une fente, d'une cassure ou d'une faille de la roche calcaire, fente dont les bords parallèles donnaient de loin l'impression d'un canal isolé.

L'action chimique d'ailleurs ne peut guère s'effectuer que soit dans des fissures relativement étroites ou bouchées par des dépôts meubles inertes : sables et argiles, où l'eau, retardée dans sa descente, a *le temps* d'opérer son action dissolvante, soit dans des voies et canaux rapprochés de l'horizontale, où le mouvement descendant du véhicule liquide qui engendre l'action chimique peut s'effectuer avec une lenteur suffisante pour amener la prolongation d'action, qui seule peut amener l'intensité du résultat dans la corrosion chimique.

Or, dans le cas de canaux soit verticaux, soit fortement redressés, comme celui que figure M. Flamache, la rapidité forcée de la descente constitue un obstacle au processus chimique : elle favorise plutôt alors une action mécanique initiale, appelée à se modifier en action chimique en profondeur. Si M. Flamache, au lieu de se borner à considérer les quelques mètres visibles du canal... ou de la fente se raccordant à l'en-

tonnoir du plateau que nous avons vu avec lui à Rochefort, avait pu en suivre sous terre la continuation et les ramifications, il aurait constaté, comme cela s'observe toujours en pareil cas, que partout où la descente de l'eau est *ralentie* et son séjour *prolongé*, l'action chimique de dissolution se manifeste avec une incontestable intensité.

Argumentation fournie par les dépôts phosphatés de la Hesbaye.

De l'affirmation qui précède voici un curieux exemple, que j'ai constaté être *le cas général* en ce qui concerne **la disposition des strates et poches phosphatées de la Hesbaye**, que je viens d'avoir l'occasion d'étudier en détail pendant mes levés géologiques des planchettes de Waremme et de Momalle; disposition sur laquelle des renseignements précis et concordants m'ont été fournis, en dehors de mes observations personnelles, par de nombreux exploitants de phosphate.

Un petit exposé préliminaire sera ici nécessaire pour l'intelligence du sujet, qui est une comparaison, justifiée à tous égards, destinée à montrer dans quelles conditions l'eau d'infiltration agit chimiquement pour dissoudre le calcaire avec le plus d'intensité. Au lieu d'apprécier des *vides et cavités*, il s'agit ici d'apprécier la proportion de *résidu phosphaté* que laisse après elle l'action dissolvante des eaux.

Le phosphate joue ici le rôle de l'argile rouge de dissolution des calcaires rocheux.

Dans la région considérée (la Hesbaye) la constitution géologique est, en règle générale, la suivante, représentée par la figure diagrammatique ci-contre.

Un épais manteau de limon quaternaire (A), pouvant atteindre et dépasser de 10 à 15 mètres, recouvre tantôt une nappe, tantôt des îlots sporadiques de sable oligocène tongrien (B), d'origine marine. Audessous du Tongrien, et souvent aussi directement sous le limon, s'observe un épais cailloutis de silex (C) non roulé (sauf localement dans ses parties supérieures) et qui représente l'accumulation *sur place* du *résidu siliceux insoluble* des divers étages crétacés de cette région.

C'est au processus *chimique* de dissolution de la roche calcaire, par les eaux météoriques, qu'est dû l'enlèvement du massif calcaire, dont les strates séparaient naguère les bancs ou rognons de silex et c'est à la suite de ce phénomène que s'est produite l'accumulation de ceux-ci (1).

(1) J'ai été l'un des premiers, et le premier en Belgique tout au moins, à signaler cette origine, par processus chimique de dissolution dû aux eaux météoriques, appliquées à l'amas à silex de nos plaines hesbayennes (Voir mon *Mémoire sur les*

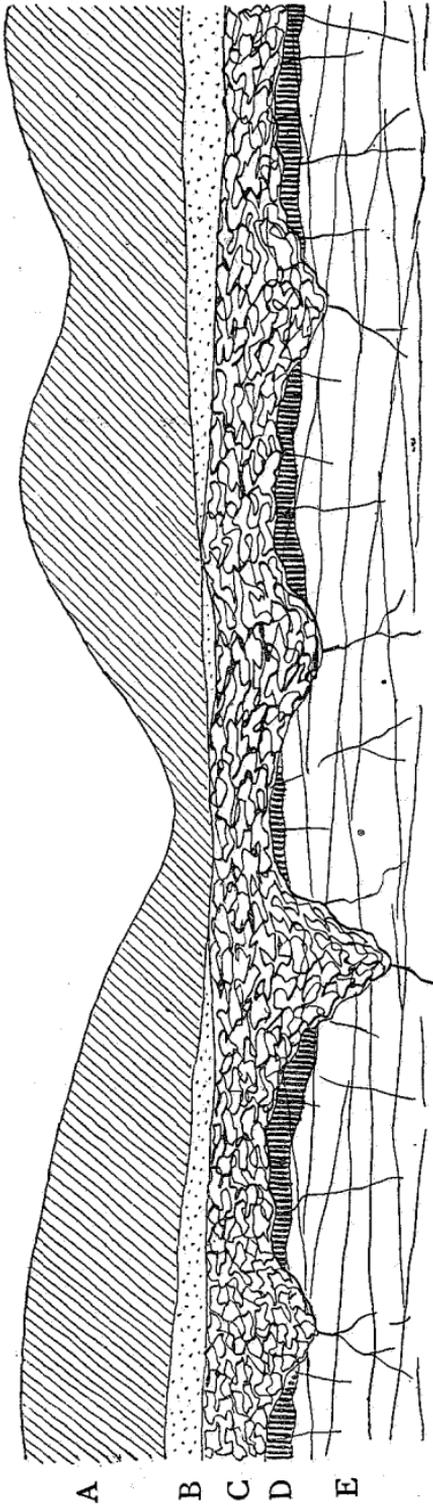


FIG. I.

Coupe diagrammatique, montrant la composition du sol et du sous-sol des plaines de la Hesbaye et les relations existant entre la disposition et le développement du phosphate — résidu de dissolution chimique du calcaire crayeux — et la diversité des conditions topographiques externes et géologiques internes.

A. Limon quaternaire.

B. Sable oligocène tongrien.

C. Amas de silex accumulés par dissolution sur place de la craie.

D. Poches phosphatées, particulièrement développées sous les plateaux, absentes aux points de « dérangement » de l'amas de silex.

E. Craie des niveaux inférieurs, avec silex rares ou absents.

Ce cailloutis de silex, dont l'épaisseur varie, non seulement avec l'intensité des phénomènes d'attaque, mais encore suivant le nombre, le rapprochement et l'épaisseur variables des silex que contiennent régionalement les diverses assises crétacées, présente une puissance qui varie généralement de 3 à 4 et 6 mètres. Parfois il atteint le double d'épaisseur et l'on y observe aussi des accidents, des « dérangements » comme les appellent les exploitants phosphatiers, qui amènent des épaissements locaux de l'amas ou du cailloutis siliceux. (Voir le diagramme fig. 1) (1). Parfois au contraire l'épaisseur et l'allure du cailloutis siliceux sont régulières, comme le montre la fig. 2, représentant une section vraie, relevée à l'aide de dix puits et sondages par M. le B^{on} M. de Lafontaine, aux environs de Viemme, et s'étendant de l'Est à l'Ouest, vers Donceel; document inédit que M. de Lafontaine a bien voulu me communiquer.

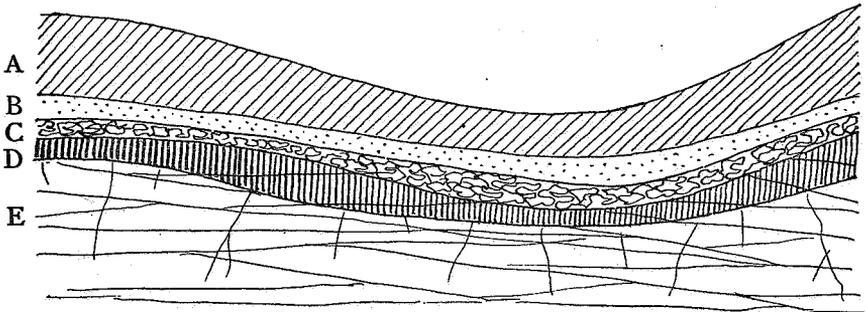


FIG. 2.

Dans cette figure les lettres A, B, C, D, E, ont la même signification que dans la figure précédente.

phénomènes d'altération, etc., de 1880 (page 129). Dans une étude, publiée à Liège en 1885, sous le titre : *Le conglomérat à silex et les gisements de phosphate de chaux de la Hesbaye*, M. M. Lohest est arrivé aux mêmes conclusions, et comme dans ce travail il n'a point été question de mon étude antérieure, l'auteur, dans un article publié en 1890 et intitulé : *Des Gisements de phosphate de chaux de la Hesbaye et de l'étendue de la zone où l'on peut espérer les rencontrer*, a bien voulu amicalement réparer cet oubli.

(1) Cette figure toutefois, pour constituer un diagramme complet, aurait pu utilement comprendre l'adjonction d'une poche d'approfondissement de l'amas de silex, sans épaissement de la hauteur verticale de celui-ci. Souvent il arrive en effet que l'amas de silex descend assez brusquement avec une inflexion correspondante de sa surface supérieure, qui forme alors une sorte de cavité ou de bassin, rempli de sable tongrien. Mais nous ne sommes plus alors en présence de véritables dérangements : c'est le cas normal, et fréquent d'ailleurs dans certains parages de la Hesbaye, des ondulations et inflexions locales moins accentuées et qui paraissent agir moins fortement sur le phosphate sous-jacent.

Un autre élément encore que la silice des rognons et des bancs cocheux de la craie, s'est accumulé, comme résidu, à la surface de elle-ci; c'est le *phosphate*, objet des exploitations souterraines de ces arages et désigné dans les figures 1 et 2 par la lettre (D). Il se présente sous forme soit de *nodules*, soit de *gravier* ou de *sable phosphaté*; ces divers facies étant soit mélangés, soit plus généralement classés en zones, plus ou moins distinctes, dans l'ensemble de la poche phosphatée. Tous ces éléments : nodules ou grains, se trouvaient préexistants dans la craie dissoute et on les retrouve d'ailleurs dans la roche crayeuse intacte ou bien durcie, sous forme de noyaux de fossiles, débris organisés divers : spongiaires, polypiers, coprolithes, moules de Foraminifères, etc., et sous forme de grains épars, à coloration foncée.

Rien n'est plus variable, en général, qu'une poche phosphatée, et le recouvrement phosphaté de la craie, sous les silex (dont les interstices sont, par le fait de la descente des eaux d'infiltration, laissé passer et s'accumuler vers le bas les résidus phosphatés des massifs crayeux préexistants intercalés) est d'une irrégularité d'allures, d'épaisseur, de composition, et parfois aussi de teneur en phosphate, fort préjudiciables aux exploitants.

On remarquera par parenthèses, que l'action d'érosion, *purement chimique*, due aux eaux d'infiltration qui ont donné naissance au résidu phosphaté, s'est produite en Hesbaye à des profondeurs pouvant atteindre, au moins dans la partie occidentale de cette région, 20 et 25 mètres. Voici déjà décuplée la zone d'influence, localisée à 2 ou 3 mètres d'après M. Flamache (1).

(1) Dans son état de publiée à Liège en 1890 (Ann. Soc. Géol. de Belg., t. 17 Mem., et intitulée : *Le phosphate de chaux de la Hesbaye*), M. J. SCHMITZ a figuré des coupes montrant (comme, par exemple, celles de divers puits creusés à Voroux-les-Liers) la présence de poches phosphatées sous 16 mètres de limon et 8 mètres d'amas de silex, soit à 24 mètres du sol.

Ce n'est pas seulement dans les plaines de la Hesbaye que l'on constate les notables profondeurs auxquelles s'est effectuée l'action chimique dissolvante des eaux d'infiltration qui ont produit les poches phosphatées. Ainsi M. Stainier m'a dit avoir vu, entre autres développements en profondeur de résidu phosphaté, une poche à Orville (Pas-de-Calais), qui, sous 3 mètres de conglomérat à silex et de limon, descendait, en un entonnoir de 10 mètres de diamètre, à 24 mètres de profondeur sous ce recouvrement. Le phosphate avait donc été élaboré par les eaux d'infiltration, armées de leur pouvoir dissolvant, à 27 mètres sous le sol.

A Beauval, dans la Somme, M. Stainier a vu des poches de phosphate de 15 mètres de profondeur, sous 5 mètres de dépôts recouvrants. L'action dissolvante s'y était donc opérée à 20 mètres de profondeur.

Les poches de 10 mètres étaient extrêmement communes dans cette région. A Viesly et à Briastre (Cambrésis) M. Stainier a reconnu, par sondages, quantité de poches

En cherchant à me rendre compte s'il ne serait pas possible de découvrir quelque *loi*, ou tout au moins quelque *tendance générale* du phosphate à se développer dans telle condition plutôt que dans telle autre, au point de vue de ses relations avec l'orographie d'une contrée donnée, j'ai commencé par constater, aussi bien par mes observations personnelles, que par les résultats de l'expérience prolongée des exploitants, les faits suivants :

A) Chaque fois que l'amas de silex s'enfonce brusquement dans le massif crayeux, soit par dérangement, soit par ondulation accentuée il y a absence ou diminution considérable de la matière phosphatée.

B) Dans les régions où le sol superficiel est constitué par une *dépression* et particulièrement par un *valonnement prolongé*, en forme de vallée sèche, le phosphate se montre moins riche et moins épais qu'ailleurs.

C) Très souvent — mais ici les faits d'observation sont trop peu nombreux encore pour que je puisse conclure avec la même certitude — c'est dans la région *occidentale* d'un valonnement dirigé S.-N. que le phosphate se montre le plus développé : le flanc *oriental* paraît moins fourni.

D) C'est surtout en dessous des *sommets* et des *plateaux* que le phosphate paraît présenter son développement et ses éléments de richesse les plus favorables, et ceci constitue un fait absolument général.

E) Il arrive fréquemment que dans les localités ou régions où se fait, approximativement ou complètement, la coïncidence de la surface à résidu phosphaté de la craie avec la zone d'oscillation de la nappe aquifère, on constate le développement assez accentué du phosphate, qui cependant alors, à moins d'épuisement trop onéreux pour être rémunérateur, ne peut être exploité.

Que signifie cet ensemble des faits :

Dans le premier cas (A), la disposition et l'épanouissement de l'amas de silex indiquent que les eaux d'infiltration ont trouvé en ces points localisés des chemins plus *directs* et *plus rapides* qu'ailleurs pour se

ayant de 1 à 3 mètres de puissance, sous 8 mètres de limon calcaireux et 2 mètres de sable landenien, soit atteignant une profondeur totale de 13 mètres.

Dans le Cambrésis, M. Stainier a acquis la certitude que l'action dissolvante s'est opérée après le dépôt du limon quaternaire. Les eaux souterraines n'avaient donc pas épuisé leur pouvoir dissolvant par un passage lent à travers les épaisseurs de 8 mètres et plus de limon calcaireux. Il est vrai qu'il faut tenir compte de la circulation *latérale* des eaux souterraines.

ordre dans les profondeurs du massif crétacé. Que ces « dérangements » du cailloutis à silex soient dus à un phénomène de faille, ou à un tassement localisé avec rupture d'équilibre, soit à une autre cause défavorable à la facile circulation des eaux souterraines, il n'en résulte pas moins ce fait que le phosphate *n'y existe plus*, alors que sa mise en liberté hors de la gangue crayeuse a dû être une action forcément corrélative à celle de l'épaississement localisé du silex. Ou bien il y a eu *entraînement mécanique*, après la mise en liberté du phosphate, entraînement précisément produit par ce fait que dans un tel cas les eaux avaient un écoulement rapide; ou bien il y a eu *dissolution du phosphate lui-même* par suite de l'intensité et du renouvellement continu de l'action chimique, qui, à l'aide du temps et ailleurs, finit — les expériences de laboratoire le prouvent — par avoir raison des substances les plus réfractaires en apparence à de telles actions (1).

(1) Il résulte d'analyses effectuées, en 1884, par M. l'ingénieur J. Verwins, que les eaux alimentaires de la ville de Liège, qui proviennent exclusivement de l'infiltration des eaux météoriques au travers du massif crétacé de la Hesbaye et par conséquent de l'amas de silex et de phosphate qui le recouvre, contiennent environ 1 gramme de phosphate de chaux par mètre cube (0gr.00091 par litre).

Or, si l'on consulte la statistique officielle de la consommation d'eau fournie annuellement à la ville de Liège par son réseau de drainage dans la craie de la Hesbaye représentant actuellement un développement de plus de 12.000 mètres de galeries), nous trouvons, par exemple, pour la période du 5 avril 1893 au 4 avril 1894, un débit de 5.633 786 mètres cubes. La présente année 1894-95 et les suivantes sont appelées à indiquer une diminution de consommation, mais non de production, par suite du placement de compteurs placés et à placer en vue de préserver les gaspillages de certains établissements, qui n'en étaient pas munis. Bien que la réduction de consommation soit un facteur indifférent dans les calculs qui vont suivre, je réduirai, pour la facilité de ceux-ci, le chiffre indiqué ci-dessus à 5.632.000^{m³}, un minimum assuré de production annuelle que peuvent fournir les galeries. Cela représenterait donc 15.640^{m³} par 24 heures, alors, qu'en réalité, la production peut être portée à 16 ou 17.000^{m³} par jour.

Or avec la proportion, infime en apparence, indiquée tantôt, d'après M. Verwins, de phosphate de chaux dissous dans l'eau de la distribution liégeoise, on arrive cependant à une valeur *journalière* de plus de 14 kilogrammes de phosphate de chaux dissous, par voie chimique souterraine, dans l'eau alimentaire de la ville de Liège.

Quant à la silice, si répandue dans nos terrains crétacés et dont l'analyse a montré que cette même eau contenait 247 grammes par m³, la valeur *journalière* de cette substance dissoute par elle s'élevait (toujours calculée d'après le débit en chiffres ronds, mais amoindris, de 1893-94) à 3863 kilogrammes.

Quant au calcaire lui-même, cet élément, j'allais dire cet aliment principal de la dévorante action chimique des eaux d'infiltration, il se retrouve dissous dans les eaux de Liège à raison de 2 k. 748 gr. par mètre cube; ce qui représente un apport journalier de 42978 kilogrammes. Enfin le résidu total de 0gr.3454 de résidu solide trouvé par l'analyse par litre d'eau de la nappe crétacée de la Hesbaye, représente un

Dans la première hypothèse, M. Flamache devra reconnaître que ce qu'il appelle ma théorie *chimico-mécanique* trouve de bons exemples dans cette action de l'eau météorique sur la roche calcaire de la Hesbaye ; dans la seconde, nous aurions ici une démonstration frappante de l'énergie, à la profondeur de 20 à 25 mètres, du processus chimique dont M. Flamache croit « avoir mis à néant toute la théorie » lorsqu'on s'écarte de 2 à 3 mètres de la surface du sol.

Dans le deuxième (B) des cas énumérés plus haut, et que représente bien la coupe vraie de la figure 2, les dépressions et le valonnement du sol coïncidant avec l'amincissement et l'appauvrissement du résidu phosphaté, donnent lieu à un raisonnement identique au précédent. En cas de vallée sèche notamment — et j'entends ici englober comme

ensemble d'actions dissolvantes fournissant plus de 54000 kilogrammes de résidu chimique par jour à la minime saignée de cette nappe, qui entre dans les conduites de la distribution précitée.

M. Flamache, qui croit l'action dissolvante des eaux météoriques localisée dans les 2 ou 3 mètres superficiels des formations calcaires, se figure-t-il ce que les chiffres précédents représentent comme *enlèvement annuel de matière*, rien que pour la zone, si minime relativement, **circonscrite par le drainage de la ville de Liège**. C'est une dissolution ANNUELLE de plus de **5 125** kilogrammes de *phosphate de chaux*, de **1 391 104** kilogrammes de *silice* et de **15 millions 476 736** kilogrammes de *calcaire* et d'un ensemble total de **19 millions 452 928** kilogrammes de substances, préexistantes dans la craie, éliminées par l'*action chimique* des eaux d'infiltration, agissant entre 20 et 25 mètres de profondeur.

Je rendrai peut-être ces chiffres plus tangibles encore en les transformant en tonnes (de 1000 kilos) et en ajoutant que l'**enlèvement par voie chimique** des matières que dissout l'eau pluviale recueillie dans les drains de la ville de Liège représente, au bout d'un an, **19.453 tonnes** de résidus divers, dont 15.477 tonnes de calcaire, 1391 tonnes de silice et plus de 5 tonnes de phosphate de chaux. Or les 12 kilomètres de galeries drainantes de la ville de Liège ne constituent qu'une saignée insignifiante dans l'énorme réservoir du terrain crétacé aquifère de la Hesbaye. L'imagination reste confondue lorsqu'on songe à l'ampleur du phénomène considéré dans son ensemble, et sous l'action prolongée des siècles et des périodes géologiques post-crétacées ; étant donné que ces 19.453 tonnes représentent annuellement la charge de **1945 wagons**, soit de 97 longs trains de marchandises, composés de 20 wagons, contenant chacun 10 tonnes de matières ; le tout chimiquement enlevé *en une année* au sous-sol par la minime saignée que subit le plateau crétacé hesbayen pour alimenter la ville de Liège.

On s'étonnera moins après cela que l'observation géologique nous apprend que l'accumulation des rognons et bancs de silex, épais de 4, 6, 8 mètres, et plus localement, qui recouvrent, comme résidu sur place de dissolution crayeuse, le massif crétacé de la Hesbaye et du Pays de Herve, fournissent la preuve d'un *abaissement de niveau* très sensible de ces régions, uniquement dû à l'action des eaux météoriques d'infiltration.

Il est certain, en tout cas, que les chiffres indiscutables qui précèdent, permettent d'apprécier le travail grandiose d'érosion chimique qui, depuis d'innombrables

lles de simples sillons séparant les ondulations du vaste plateau de Hesbaye — il y a souvent, grâce à l'amincissement de limon dans les dépressions et grâce aussi aux affleurements de l'amas à silex, de véritables filets et ruisseaux souterrains, qui tout naturellement accentuent et, surtout après les pluies d'orage avec ruissellement, ont s'arrêter sur la surface crayeuse souterraine et coulent avec facilité dans l'amas de silex sus-jacent. Pour les mêmes motifs que précédemment, que le fait soit dû à l'action mécanique des eaux tendues plus rapides, ou à l'intensité du processus chimique, résultant de son renouvellement, les éléments phosphatés auront toutes les chances d'être *entraînés ou dissous* et probablement que les deux processus physique et chimique s'y conjoignent en une même action limitatoire.

Si, au lieu de se faire à la surface, l'action dissolvante se fait dans les profondeurs du sol de l'immense plaine crétacée hesbayenne et ils montrent, mieux que tout commentaire, quelle énergie déploient, même en attaquant aux substances les moins solubles, telles que la *silice* et le *phosphate de chaux*, ces merveilleuses actions chimiques souterraines du grand laboratoire de la nature, qui sont ici uniquement dues à l'infiltration profonde des eaux météoriques, c'est-à-dire à l'action de *la goutte d'eau* qui descend en terre et y rencontre du *calcaire*.

Partout d'ailleurs, l'ampleur et l'intensité de l'action dissolvante ont été reconnues et mises en lumière par les maîtres de la science.

C'est ainsi, par exemple, que le Professeur *J. Prestwich*, dans son Adresse Présidentielle de 1871 à la Société géologique de Londres, a fait observer que le calcaire harrié à l'état de *dissolution* par les eaux de la Tamise, s'élève annuellement au volume fabuleux de 400.000 tonnes! Les massifs de craie et de calcaire oolithique entraînés par l'infiltration souterraine et attaqués chimiquement par les eaux qui constituent le bassin hydrographique de la Tamise, se voient donc enlever, par **corrosion chimique**, *plus de 1000 tonnes de calcaire par jour!*

Credner (TRAITÉ DE GÉOLOGIE) montre qu'une colline de gypse de 33 mètres de hauteur, située dans une région où il tomberait par an 1 mètre d'eau pluviale, aurait entièrement disparu en 30.000 ans, par le seul fait de la *dissolution chimique*. Il rapporte qu'on a calculé que les rivières qui prennent naissance sur le Teutoburgerwald et les Haars apparaissent au jour après avoir enlevé annuellement par dissolution à ces montagnes calcaires, 36.000 m³ de carbonate de chaux.

Il dit encore que des fleuves comme le Rhin, le Danube, la Rhône et l'Elbe, contiennent un minimum de 1/8000 de substances minérales *en solution*. Il en résulte que ces fleuves, sur un espace de 8000 ans, conduisent à la mer une masse de résidu de dissolution chimique *égale à celle des eaux qu'ils y déversent annuellement*.

L'auteur cite enfin une source du Valais qui, à elle seule, enlève par dissolution de l'intérieur de la terre, plus de 200 m³ de roche gypseuse par an. Or, comme on connaît, ajoute l'auteur, au moins 20 sources sédimentaires dans cette contrée, on s'explique « par les cavités qu'une action semblable doit former et les effondrements qui s'ensuivent nécessairement, les tremblements de terre fréquents qui, au cours d'un siècle et demi (jusqu'en 1854) ont été observés en Suisse, au nombre de 1019. »

Que nous voici donc loin de la thèse de M. Flamache, localisant à 2 ou 3 mètres de la surface, l'action chimique de dissolution des eaux d'infiltration!

Dans le troisième des cas (C) que j'ai énumérés nous trouvons, s'il se confirme d'une manière générale, une nouvelle application des mêmes vues. En effet, dans nos plaines belges c'est de l'Ouest que nous viennent les pluies et particulièrement les pluies d'orage et à régime d'écoulement torrentiel et de ruissellement. Les talus, les pentes et les flancs, toujours plus escarpés, des vallées exposées aux vents et aux pluies d'Ouest doivent donc être plus particulièrement le siège du phénomène de *ruissellement superficiel et immédiat*, défavorable à l'infiltration lente et continue des eaux météoriques. Quant à l'action mécanique des eaux de ruissellement rassemblées dans les bas niveaux elle ne peut ici acquérir quelque intensité que sous le thalweg même des dépressions dont il a été question dans le cas précédent et quand le ruisseau souterrain coïncide avec le niveau, favorable à l'écoulement, cailloutis de silex. Nous rentrons donc alors dans le cas précédent soit d'entraînement, soit de dissolution de phosphate mis en liberté.

Dans le quatrième cas (D) le plus généralement acquis, nous y trouvons la preuve que c'est en coïncidence avec les points où l'eau souterraine s'étale — ou s'est naguère étalée — en nappes d'imprégnation soit continue, soit alternée, mais *avec des mouvements de translation ralentis*, que l'action chimique de dissolution calcaire, suffisante pour accumuler un fort volume de résidus phosphatés, n'a toutefois — comme là où ces mêmes eaux sont plus en mouvement et plus vite renouvelées — pu amener la dissolution du phosphate lui-même.

Le cinquième cas considéré (E) nous amène exactement aux mêmes conclusions, qui ne sont guère, on le voit, favorables aux vues de M. Flamache, ni sur la profondeur minima à laquelle, d'après lui, s'arrête l'action chimique des eaux météoriques ou d'infiltration, ni sur le peu d'importance qu'il attache à une théorie qui, dit-il assez irrévérencieusement, est mise « à toute sauce » par la science quand il s'agit d'expliquer des ablations calcaires.

Si je me suis quelque peu étendu sur les cas de dissolution chimique que fournit notre calcaire crayeux de la Hesbaye dans ses relations avec le gisement *des amas phosphatés*, c'est parce que j'ai pensé qu'il y avait tout intérêt à attirer l'attention des chercheurs et des exploitants sur la possibilité de chercher, dans cette voie, à éliminer, ou à diminuer tout au moins, certains des éléments aléatoires des recherches et des explorations, pour lesquelles la science doit s'efforcer de découvrir sinon des règles, qui ne seront jamais absolues, du moins des indications pratiques.

Je ne présente d'ailleurs les remarques ci-dessus que comme matière observation et à vérification plus générale, bien que j'aie tout lieu de s croire très sérieusement fondées.

Reprenons maintenant l'examen des faits sur lesquels M. Flamache ppuie sa manière de voir.

« 5° C'est un fait bien connu des hydrologues que les eaux recueil- es en terrain calcaireux atteignent leur degré hydrotimétrique maxi- um aussitôt qu'on les prélève à quelques mètres au-dessous de la urface. »

Mais il ne pourrait en être autrement, et d'ailleurs M. Flamache ne aperçoit-il pas que cette constatation ne peut que desservir sa thèse.

Jusqu'à quelques mètres au-dessous de la surface et généralement partout, en surface, la zone d'affleurement du calcaire est dans un itat de division, de fissurage et de discontinuité rocheuse, qui en fait un véritable *filtre*, dans lequel se perdent une partie des eaux météoriques.

L'action chimique est certainement *intense* dans cette zone et les eaux qui s'y trouvent doivent avoir un degré hydrotimétrique élevé; mais si précisément en profondeur il n'en est plus ainsi, c'est que les eaux qui descendent plus bas, — non plus par ce même lacis capil- laire ou relativement étroit, — mais par des fentes et canaux plus larges (où la descente s'*accélère* et ne laisse pas aux facteurs chimi- ques qu'elle contient le temps d'agir comme (dans les zones superfi- cielles), **restent munies de leur pouvoir dissolvant**. Qui pourrait prétendre en effet que les engouffrements persistants ou temporaires, soit par l'effet de crues ou d'orages, qui font disparaître sous terre — par la voie des grandes fractures, failles, diaclases et par la voie des aiguigeois, puits naturels, etc. — des torrents d'eau, comme cela est la caractéristique dans les régions calcaires; qui pourrait prétendre, dis-je, que ces engouffrements dépouillent, à 2 ou 3 mètres de la surface, l'eau météorique de sa teneur en acide carbonique. Or, ce ne sont pas les eaux filtrantes localisées dans la zone superficielle et d'affleurement auxquelles la science attribue la formation des grottes et des cavités du calcaire : ce sont les *eaux filtrantes* amenées en *profon- deur* par le dispositif, si fréquent en terrain calcaire, des *engouffre- ments et disparitions* d'eau de surface, qu'elles soient périodiques ou continues; pluviales, torrentielles, de ruissellement ou fluviales, soit persistantes, soit de crues temporaires.

En faisant converger tout son raisonnement autour des *eaux fil- trantes* de la zone *superficielle*, absolument négligeables en la matière,

et en passant sous silence le rôle prépondérant et si capital des *eaux filtrantes* amenées directement dans les *régions profondes* et auxquelles seules il aurait dû s'attacher, M. Flamache maintient la question dans le *terrain des malentendus*, ainsi que je le disais en commençant cette note.

Je passe au 6° et dernier argument de fait fourni par M. Flamache.

« 6° M. Dupont lui-même n'a-t-il pas, dans un récent travail, rappelé les faits des chandelles de calcaire qui se produisent sous les voûtes aux dépens du mortier? Or ces voûtes n'ont que quelques décimètres d'épaisseur. » L'auteur ajoute : « Ces faits naturels, que l'on pourrait multiplier, montrent que l'action dissolvante de l'eau filtrante chargée d'acide carbonique, *n'atteint pas les parties profondes* des massifs calcaireux et qu'elle est saturée de calcaire dès les premiers mètres de son parcours. »

Non seulement l'analyse rationnelle que nous venons de faire met à néant les divers ordres de faits sur lesquels s'appuie M. Flamache, mais, chose curieuse, cette analyse a mis en lumière que mon honorable contradicteur s'est strictement maintenu dans un ordre de faits uniquement localisés dans la zone superficielle et d'affleurement, qui n'était pas en cause.

Le 6^{me} et dernier argument est typique à cet égard. M. Flamache n'a fourni absolument aucune donnée relative aux actions qui se passent en profondeur, et quand il a cru le faire, comme dans le cas des *limés blancs* et dans celui où il s'occupe de la *dolomie*, — qu'il ne paraît pas savoir exister sur de grandes épaisseurs, et dont il croit le processus générateur bien connu — il s'est absolument mépris sur la signification des arguments mis en avant. Or nous arrivons cependant, en admettant le raisonnement de M. Flamache, à conclure hardiment, de la formation toute superficielle, de *stalactites* au plafond de la grotte de Han et de la présence de *chandelles calcaires* sous la mince voûte d'un pont « que l'action dissolvante de l'eau filtrante chargée d'acide carbonique *n'atteint pas les parties profondes des massifs calcaireux!* C'est d'une logique de raisonnement assez discutable.

En ajoutant que cette eau filtrante est « saturée de calcaire dès les premiers mètres de son parcours », il oublie, ou ignore peut-être, que la descente des eaux météoriques ou courantes qui descendent au sein des massifs calcaires s'effectue suivant *deux processus* distincts : l'un d'infiltration lente et toute superficielle, par les voies multiples et étroites de la zone de débit superficiel (et c'est celui qui produit les stalactites de la grotte de Han et les chandelles calcaires de la voûte.

es ponts) : l'autre, d'engouffrement rapide et profond par les voies, plus localisées, mais plus larges, des failles, cassures et aiguigeois, qui amènent directement dans les profondeurs, où elles arrivent avec leurs propriétés chimiques intactes, les eaux, en volume bien plus abondant que les premières, qui, devenues principalement *filtrantes en profondeur*, agissent surtout par *dissolution* et donnent lieu à la formation des cavités du calcaire.

Le dispositif expérimental de M. Flamache.

Pour démontrer expérimentalement sa thèse, M. Flamache s'est dressé à un dispositif de laboratoire.

« Avec quatre planchettes on forme un tube carré de 0^m.10 de côté et de 2 mètres de hauteur. Ce tube est rempli de *fragments calcaires* et le sable de façon à figurer le *mieux possible une fissure en roche calcaireuse*.

» Un flacon supérieur A, rempli d'eau maintenue saturée d'acide carbonique par un courant de gaz, laisse tomber à la surface du tube une goutte de dissolution toutes les secondes. Cette eau est recueillie dans un flacon inférieur B, après avoir filtré à travers le tube vertical. »

M. Flamache nous annonce que jamais l'on n'a trouvé d'acide carbonique libre dans l'eau recueillie, qui mettait cinq jours pour passer du flacon A dans le flacon B. Le débit représentait ici 4000 m³ par hectare-jour, et comme la saturation de l'eau en acide carbonique représente un gramme par litre, M. Flamache, à tous égards, se croit très rassuré sur ce fait qu'il a fourni à l'expérience les conditions les moins avantageuses pour sa thèse, en admettant celle-ci fondée.

Aussi il conclut : « *Il me semble résulter clairement de ce qui précède que l'eau filtrant capillairement à travers les fissures où elle se trouve en contact avec du calcaire a, au bout de quelques mètres de parcours, atteint un degré de saturation calcaire qui lui interdit toute dissolution subséquente. Elle atteint donc les profondeurs sans aucune faculté dissolvante spéciale et incapable de créer la moindre cavité.* »

Il va même plus loin; il ajoute que cette eau, en profondeur, possède une faculté obstruante remarquable, bouchant des fissures (ce sont sans doute les « limés blancs » qui sont ici en vue), incrustant par ci, fermant par là et finissant par « combler les vides inférieurs avec le carbonate de chaux dissous » dans les zones superficielles. La conclusion finale, dit M. Flamache, est donc que l'action chimique des eaux filtrantes est, non pas d'ouvrir, mais de *boucher des cavernes!*

Et voilà cependant où l'on en arrive, par suite de simples malentendus et par le fait d'expériences où l'on s'imagine avoir réalisé les conditions offertes par la nature.

Qui cependant n'aura été frappé par les deux passages que j'ai soulignés plus haut, décrivant le dispositif imaginé par mon honorable contradicteur. Ce tube aux parois non calcaires, mais rempli de fragments calcaires, évidemment brisés dans ce but en menus fragments, aux cassures et surfaces fraîches, voilà le dispositif qui prétend figurer le mieux possible une *fissure* en terrain calcaire! Cela n'est pas sérieux, et il faut n'avoir jamais examiné avec attention la cavité et les parois d'un canal soit d'aiguigeois, soit de faille ou de cassure dans la roche calcaire pour songer à faire une telle assimilation.

Quand dans un aiguigeois ou dans une fente on rencontre des pierres isolées, ce sont généralement des cailloux roulés : silex, phtanites, grès ou quartzites, toutes roches non solubles n'enlevant rien aux propriétés chimiques des eaux descendantes. Il y a des terres : limons, sables et argiles, qui sont plus ou moins dans le même cas : il y a surtout des *argiles rouges* de décomposition antérieure qui, par leur plasticité et leur disposition incrustante, *protègent* sur de grandes surfaces *les parois calcaires qu'elles tapissent*. Si l'on évalue par le calcul la surface libre, et fraîchement apte à l'attaque, que renferme le tube *rempli de fragments calcaires* de M. Flamache, et ce qu'elle représente de développement, sur les deux mètres courants de son dispositif, on sera stupéfait de constater que pour atteindre *une telle surface libre d'attaque calcaire* dans une fente tapissée de terre et d'argile, comme les canaux et diaclases du calcaire le sont généralement, il faudrait la prolonger à des profondeurs tellement considérables que l'expérience devient absolument sans portée et illusoire, absolument comme les six ordres de faits avancés par M. Flamache en faveur de ses vues.

L'argumentation fournie à M. Flamache par la morphologie des cavernes.

Mais notre estimable contradicteur fournit encore d'autres bases d'argumentation, qu'il tire de la morphologie des cavernes.

J'ai réuni, en les réduisant par la photographie, les trois diagrammes qu'il présente pour illustrer son raisonnement.

Dans ces trois figures le tracé en demi-cercle appelé *chavée* représente, avec les zones externes qui les continuent au delà de *A* et de *B*, la partie du cours primitif d'une rivière qui suivait ce tracé avant d'avoir pris partiellement un cours souterrain (représenté par des

lignes pointillées) par la voie d'une caverne sinueuse, figurée dans la partie supérieure des trois diagrammes. Ce cours souterrain étant acquis, la chavée — comme c'est le cas à la grotte de Han — ne sert plus qu'à recevoir temporairement en temps de forte crue, l'excès d'eau qui ne peut passer par le cours sinueux souterrain entre *A* et *B*.

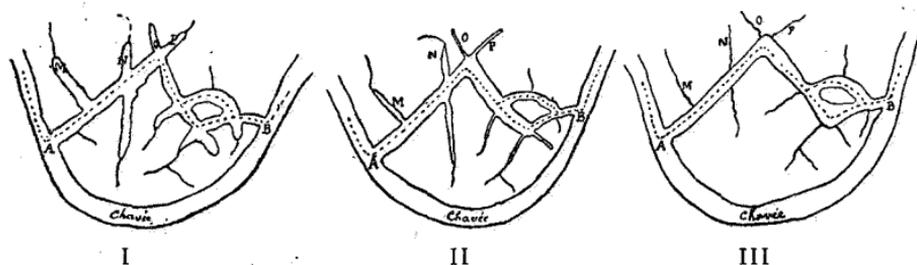


FIG. 3.

Synthèse diagrammatique, d'après M. Flamache, des formes que devraient présenter les grottes parcourues par un cours d'eau dans l'hypothèse : I) de l'action chimique seule comme processus d'ablation ; II) d'une action chimique préalable, complétée localement par une action mécanique ultérieure ; III) d'une action purement mécanique d'ablation.

La thèse de M. Flamache est celle-ci :

A) En admettant la formation des cavités souterraines par la seule action chimique, il n'y a pas de raison pour que celles des galeries formées qui auront servi ultérieurement à conduire souterrainement l'eau de la rivière se montrent d'un diamètre plus grand que les autres, où l'eau courante n'a pas passé. On obtiendra donc l'aspect offert par le diagramme I.

B) En admettant qu'une action mécanique, due à l'introduction de la rivière, se soit adjointe à l'action chimique primitive, il y aurait forcément *agrandissement* des couloirs par où passe la rivière et l'on obtiendrait l'aspect général synthétisé par le diagramme II.

C) En admettant que la rivière, c'est-à-dire l'action mécanique a seule agi, parmi un lacis d'étroites fentes préexistantes, il y aurait un contraste considérable entre la dimension des galeries parcourues par l'eau courante et celles des fentes primitives : de plus, il y aurait *absence absolue* de ces galeries en cul-de-sac, de moyenne grandeur, qui sont particulièrement bien représentées dans le diagramme II par MNOP.

Or, d'après M. Flamache, la nature ne nous fournit pas les cas synthétisés par les cas I et II et ne nous présente, lorsqu'on étudie la disposition des cavernes, que le cas représenté par le diagramme III.

Émettre une telle affirmation revient à condamner soi-même la thèse que l'on veut défendre. Il suffit, pour constater combien M. Flamache se trompe encore ici, de feuilleter rapidement les ouvrages qui fournissent des plans détaillés de cavernes en terrain calcaire, dans tous les pays. Les beaux ouvrages de M. Martel : *Les Abîmes* (1), *Les Cévennes* (2), les intéressantes publications de la Société française de Spéléologie (3), en fournissent les preuves irréfragables, fournies par les grottes de l'Hérault, de l'Ardèche, du Gard, du Tarn et de bien d'autres régions. Il ne faut même pas sortir du pays pour en avoir la démonstration non moins certaine.

Le plan de la grotte de Han, qui, relevé surtout pour l'usage des touristes, ne figure pas — il l'annonce d'ailleurs — quantité de galeries, dont la plupart sont en cul-de-sac et dont une partie sont encore bouchées, montre cependant d'une manière frappante combien M. Flamache s'est mépris en synthétisant par le diagramme III le dispositif souterrain d'une grotte parcourue par un courant d'eau. Il ressort très nettement du plan précité, si incomplet au point de vue qui nous occupe (et qui se trouve reproduit fidèlement dans ses éléments topographiques principaux par M. É. Dupont (4), dans le tome VII de notre *Bulletin* — voir pl. 13, fig. 1 —) que les galeries parcourues souterrainement en tout temps par la Lesse sont les plus larges : que celles inondées par les crues intérieures et par le flux périodique de cive souterraine sont de dimensions moyennés et que celles qui ne sont atteintes que par l'afflux périodique annuel seul sont les plus étroites. De plus, on peut y compter facilement 25 *culs-de-sac*, parmi lesquels on peut citer la galerie des *Petites Fontaines*, longue de 55 mètres ; les *Mystérieuses*, cul-de-sac d'environ 60 mètres ; la *Galerie perdue*, long boyau d'environ 70 mètres, à issue unique ; sans compter les nombreux couloirs sans issues autres que d'étroites fentes, que les guides de la grotte pourraient montrer à M. Flamache afin de lui démontrer l'existence de nombreux *culs-de-sac* que les *eaux*

(1) *Les Abîmes, les eaux souterraines, les cavernes, les sources, la spéléologie*, par E. A. MARTEL. — Paris, Ch. Delagrave, 1894. Un fort vol. in-4°, 578 pages, av. nombreuses planches, cartes, photographies et plans.

(2) *Les Cévennes et la région des Causses*, par E. A. MARTEL. — Un vol. in-4°, 468 p., av. planches, cartes et plans. Paris, Ch. Delagrave, 1894.

(3) *Spelunca. Bulletin de la Société de Spéléologie*. Paris, Bulletin trimestriel (E. A. MARTEL, secrétaire général, gérant).

Mémoires de la Société de Spéléologie, Paris. (6 mémoires parus.)

(4) *Les Phénomènes généraux des cavernes en terrains calcaires et la circulation souterraine des eaux dans la région Han-Rochefort*, par É. DUPONT (Bull. Soc. belge de Géol., t. VII, 1893. Mém. pp. 190-297 ; pl. XII et XIII).

courantes n'ont pu parcourir ni former. Même sur des espaces restreints on voit les grottes de nos régions montrer parfois de nombreux culs-de-sac, que l'action mécanique d'eaux courantes serait impuissante à expliquer. Je n'en citerai, comme exemple, que celui que M. Flamache aurait pu trouver, sans aucune recherche, dans le travail de M. Dupont qu'il combat et qui est fourni par le plan de la caverne de *Goyet* (voir *Dupont (ante)*, p. 220 des *Mém.*, tome VII (1893) de notre *Bulletin*). On y constate nettement, sur un espace inférieur à 400^m2, six digitations de galeries en cul-de-sac bien accentué.

C'est par centaines d'exemples analogues, *contraires à l'affirmation de M. Flamache*, que l'on pourrait répondre rien qu'en feuilletant quelques ouvrages et mémoires fournissant des plans de grottes dans les calcaires de tous pays.

Pour en revenir aux plans des grottes de Han et de Goyet, documents précis qui paraissent avoir échappé à l'attention de M. Flamache, je dirai qu'ils constituent, le premier surtout, la meilleure démonstration qui se puisse donner du bien fondé du diagramme n° II, que M. Flamache déclare *inexistant* dans la nature, alors qu'en réalité il est le cas *le plus général*, montrant qu'à une action chimique initiale et préexistante, indiquée par les galeries en cul-de-sac, élargissement chimique de fentes primitives, est venue souvent s'adjoindre, dans le cas de cavernes ou cavités parcourues par des eaux courantes, une action mécanique postérieure.

Mais il y a mieux encore. Non seulement dans son point d'engouffrement ordinaire (trou de Belvaux) la Lesse s'enfonce dans le calcaire par trois ouvertures distinctes et *fort étroites*: non seulement le point d'engouffrement périodique du trou d'Enfaule consiste en une ouverture peu développée, qui s'étrangle rapidement en *d'étroits canaux*; mais encore il y a dans l'ensemble des galeries parcourues, tant constamment que périodiquement, par la Lesse souterraine, une *tendance générale et constante à l'élargissement graduel*, contrastant éloquemment avec les tendances contraires à l'apaisement des eaux souterraines. C'est absolument l'opposé de ce qui arriverait si l'action mécanique de la rivière était, comme le voudrait M. Flamache, le seul processus du creusement souterrain, et l'étréouissement des voies d'entrée constitue à elle seule un argument défavorable à sa thèse.

Pour en revenir aux diagrammes de mon honorable contradicteur, la vérité est que *chacun* des cas synthétisés par M. Flamache peut se présenter dans la nature, avec cette différence que celui qu'il considère comme général est tout à fait exceptionnel et que, des deux autres, celui qui est réellement *le plus général* (fig. 3, n° II) est le cas dont il dit « qu'il n'a pas lieu » !

Mais aussi notre honorable contradicteur se fait-il étrangement illusion en croyant que le problème du creusement et de l'élargissement des cavernes parcourues par un cours d'eau est contenu *tout entier* dans ces deux facteurs : action chimique, action mécanique et même dans ce dernier seulement, synthétisé par son diagramme (fig. 3, n° III), qui ne décèle qu'une action purement mécanique.

Aperçu sommaire sur les multiples facteurs du creusement des cavernes, négligés par M. Flamache.

Il n'est cependant pas difficile de se rendre compte que de multiples facteurs accessoires doivent entrer en jeu, tels que les divers états, plus ou moins localisés, de discontinuité de la roche calcaire, de sa massivité originelle (calcaire construit ou de récif) ou de sa stratification plus ou moins accentuée, se combinant avec le fracturage local résultant des ondulations, tortions, faillages, redressements et plissements de la roche, lesquels, ainsi que les caractères précédents, varient d'un point à un autre de parcours d'une même rivière souterraine, surtout lorsqu'on se trouve dans des régions de roches calcaires plissées et redressées, comme dans les calcaires des terrains primaires de la Belgique.

L'action chimique, comme l'action mécanique, varie ses effets suivant les différences de dureté et de composition des divers bancs rencontrés dans un même massif calcaire, suivant le degré de rapidité des eaux souterraines d'infiltration ou d'écoulement plus localisées, et c'est la pente variable et diverse des canaux et conduits souterrains qui règle elle-même cette rapidité, de concert avec les dispositifs de siphonnage, de barrages souterrains et de libre cours, que nous ne pouvons généralement atteindre chez nous, comme a pu le faire si fréquemment M. Martel en d'autres régions calcaires. Enfin, les causes d'écroulement souterrain, causes multiples elles-mêmes et variables d'intensité dans un même parcours souterrain, constituent encore *un facteur puissant* d'élargissement *local* des galeries souterraines, abstraction faite des forces physiques et chimiques d'érosion de l'eau elle-même.

Les variations et les excès de pressions dus aux crues périodiques se combinant avec le siphonnement, la proportion d'éléments sableux et caillouteux que l'entraînement en profondeur des eaux extérieures peut parfois amener comme outils supplémentaires et localisés de l'ablation calcaire, sont, avec bien d'autres encore, parmi lesquelles il ne faut pas oublier les tremblements de terre, autant de causes qu'avec les données géologiques M. Flamache passe complètement sous silence, alors que ce sont autant de facteurs tantôt accessoires, mais parfois très importants, du processus d'érosion souterraine et d'évidement des grottes et cavernes.

Les différences des régimes orographiques et hydrographiques anciens d'avec les conditions actuelles.

Lorsque M. Flamache annonce (p. 362) que toute caverne est ou a été le lit d'une rivière souterraine il se montre plus clairvoyant, bien qu'il présente lui-même cette affirmation comme « quelque peu hardie », mais s'il en saisissait bien toutes les conséquences, il aurait dû reconnaître qu'il ne faut pas mettre seulement les dimensions *actuelles* d'une galerie souterraine en corrélation avec les causes *actuelles* : cours d'eau à processus mécanico-chimique et eaux filtrantes à processus exclusivement chimique, mais encore et très souvent, avec les conditions *DISPARUES d'autres régimes hydrographiques, pluviométriques et orographiques* que ceux qui s'observent de nos jours.

Il est bien exact en effet que la grande majorité des cavernes ont vu naguère, surtout pendant l'époque quaternaire, des eaux courantes parcourir — et contribuer sans doute à élargir mécaniquement, en même temps que chimiquement — des galeries aujourd'hui absolument à sec et abandonnées par les eaux filtrantes et courantes. La question des dimensions de ces galeries et de ces cavernes aujourd'hui « perchées sur le flanc des collines » ou plus bas, mais actuellement privées d'eau, doit donc être mise en rapport, non pas seulement avec les causes *actuellement existantes*, mais encore avec un ensemble de *facteurs anciens* d'érosion chimico-physique, qu'il n'est pas toujours facile de reconstituer.

Il ne faut pas perdre de vue, d'une part, l'action descendante, sur le régime hydrographique, tant souterrain que superficiel, du grand phénomène quaternaire du *creusement des vallées* : d'autre part, les *oscillations séculaires du sol* et, particulièrement en nos parages, le relèvement quaternaire des altitudes de nos plateaux rocheux du sud — relèvement qui tendait à accentuer les effets du premier phénomène. — Ces deux facteurs, combinés, ont eu pour résultat de faire couler naguère, tant à la superficie du sol que dans le sein des masses calcaires sillonnées de fentes et de canaux — qui se sont élargis en cavernes — tout un lacs de courants, les uns visibles, les autres cachés, qui occupaient alors des niveaux absolument asséchés aujourd'hui par suite des progrès du phénomène de creusement des vallées.

Je ne suppose pas que M. Flamache niera un tel état physique antérieur de nos contrées? Il lui suffira d'ailleurs, pour se convaincre de sa préexistence, de s'en tenir au fait, aisément constatable en bien des régions de la Haute Belgique, de la présence, non seulement

d'amas de cailloux et de sédiments manifestement fluviaux, au sommet des anciennes plaines qui, relevées de nos jours, constituent nos hauts plateaux calcaires et autres de la région primaire, mais encore de la présence de ces mêmes éléments, accompagnés de sables et de limons stratifiés et à caractères incontestablement fluviaux, qui peuvent encore s'observer, généralement sous les limons ossifères, dans certaines des cavernes situées au-dessus des plus hautes crues possibles de notre régime hydrographique actuel.

On peut donc conclure que bien des galeries et cavernes qui se trouvent dans une telle situation, si elles doivent leur *origine* et une partie de leur développement à l'action *chimique* dissolvante des eaux météoriques et d'infiltration ancienne, et cela à une époque où le sol des plateaux était moins relevé qu'aujourd'hui — ou bien, si l'on préfère ne pas soulever cette thèse du relèvement quaternaire, antérieurement à la phase principale du creusement des vallées — que ces galeries et cavernes, dis-je, doivent leur élargissement et leurs dimensions ultimes aux actions *chimiques et mécaniques*, soit isolées, soit plutôt combinées, du ruissellement interne ancien et des affluents souterrains de cours d'eaux *disparus*. C'est par *exception* que, dans leur phase actuelle d'alluvionnement, ayant succédé à celle du creusement, nos cours d'eau actuels peuvent encore exercer à l'air libre une action *mécanique* sensible, mais la double action chimique et mécanique peut parfaitement subsister dans leurs affluents et cours souterrains.

Ce sont les « ancêtres » des cours d'eau de la phase de creusement qui ont laissé leurs traces indélébiles sur nos hauts plateaux, sous forme de traînées et d'amas de cailloux roulés, témoins d'un régime torrentiel non ou peu localisé : ce sont leurs « descendants » dégénérés et impuissants à l'attaque mécanique — par suite de l'aplanissement graduel des thalwegs fluviaux et de la cessation du phénomène de relèvement du sol — qui, de nos jours, serpentent paresseusement au fond des vallées actuelles, dont le profil est figé... dans l'attente de nouveaux relèvements du sol, à venir, et qui feront renaître une nouvelle phase de creusement.

Quant à déterminer la part respective à faire, dans l'édification de ces galeries et cavernes à mi-côte, aux deux facteurs de l'action chimique et de l'action mécanique, c'est un problème d'ordre et d'intérêt *purement locaux* et sans synthèse générale. Dans chaque cas particulier il faudrait, pour y arriver, se livrer à de minutieuses observations et utiliser une *méthode rigoureuse de recherches*, bien coordonnées.

Le mode d'ouverture des cavernes.

Je profiterai de ce petit exposé pour dire que j'ai grand'peine à accepter, malgré toute l'autorité qui s'attache au nom de son promoteur, l'idée émise par M. É. Dupont, au sujet de l'origine trop spéciale, me paraît-il, qu'il attribue au *mode d'ouverture* à l'air libre des cavernes, parfois sans autre issue interne apparente, que l'on observe, comme dans le Trou des Nutons et bien d'autres encore, sur le flanc abrupt d'une profonde vallée.

D'après M. Dupont de telles cavernes, uniquement dues à l'érosion chimique, étaient très généralement *closes et isolées* au sein du massif rocheux et ce serait la circonstance fortuite d'une coïncidence avec la zone de creusement de la vallée dans la masse du massif calcaire qui aurait mis au jour ces cavités.

Je ne prétends nullement que cela ne soit exceptionnellement ou parfois réalisable, mais j'incline plutôt à croire, d'abord que l'absence d'autre issue n'est souvent qu'une *apparence*, due à des actions de remplissage sédimentaire ou stalagmitique qui *cachent* les débouchés internes préexistants (1); ensuite, que si la thèse de M. Dupont peut surtout s'appliquer à de petites cavités, comme il s'en rencontre par élargissement chimique localisé d'une fente ou d'un conduit quelconque ayant naguère servi à amener de l'eau souterraine, il ne peut s'étendre facilement aux *grandes cavités*, c'est-à-dire aux grottes d'une certaine étendue, soit en hauteur soit en largeur. Je persiste à croire, jusqu'à preuve du contraire, que de telles cavités importantes, telles que le Trou des Nutons lui-même, ne représentent que les vestiges, coudes, culs-de-sacs, irrégularités et digitations, voire même des parties tronçonnées du réseau principal, de lacis caverneux préexistants et anciens, qui naguère servaient, en tout ou en partie, de lits

(1) Dans la grotte de Rochefort, par exemple, j'ai trouvé une dent d'*Ursus spelæus* dans des conditions de gisement qui montraient clairement qu'il doit exister, outre les quatre ouvertures d'aiguigeois du plateau, et dont deux servent d'entrée et de sortie à la grotte, une communication supplémentaire avec les flancs ou le bas de la vallée, laquelle communication, autrefois accessible aux fauves, est actuellement bouchée et cachée par les terres et les stalagmites.

Dans ce cas-ci M. Dupont est d'ailleurs du même avis, par suite de l'observation qu'il a faite de la présence d'ossements d'*Ursus spelæus* non roulés, ni rongés par les hyènes, ni brisés à la manière des Troglodytes. La caverne contenait un ancien repaire d'Ours, et comme ils ne pouvaient entrer par les orifices actuels, il devait y en avoir un autre plus accessible. J'ignore pourquoi M. Dupont n'a pas admis la possibilité très générale de cas analogues ou identiques, et il me paraît que les cavernes closes de toutes parts et isolées au sein du massif calcaire doivent au contraire constituer une infime exception, du moins quand il s'agit de cavités de quelque importance.

souterrains aux cours d'eau dont le thalweg s'est successivement, avec les progrès du creusement, abaissé — en abandonnant ces anciens lits supérieurs — jusqu'au niveau du fond actuel des vallées.

On ne saurait prétendre, autrement que sous forme d'affirmation dépourvue de preuves à l'appui, que la *corrosion chimique seule*, comme le voudrait M. Dupont, a, antérieurement à la phase de creusement des vallées, entièrement produit ces cavernes, dont tant, en Belgique, sont devenues célèbres par les découvertes ethnographiques de M. Dupont lui-même. Ce qui d'ailleurs tend à confirmer cette manière de voir, c'est que dans un bon nombre de nos cavernes, non seulement il existe des couches à composition ou à alternances limoneuses, ainsi que des roches et des cailloux roulés, plus rationnellement rapportables les uns et les autres aux éléments rocheux, limoneux et caillouteux roulés, des **plateaux voisins et recouvrants**, qu'aux régions d'*amont* du cours d'eau dans la vallée duquel s'observent les dites grottes.

De tels apports *verticaux*, dûment constatés comme tels, depuis ces dernières années, pour un grand nombre de nos grottes belges, n'ont donc rien de commun avec les apports et les inondations de la rivière elle-même, qui n'a agi comme véhicule que dans des cas relativement rares et d'une haute antiquité, généralement antérieurs au dépôt des formations ossifères.

On peut signaler encore — ainsi que cela a été constaté dans une nombreuse série de cavernes classiques de la rive droite de la Lesse — que les *argiles rouges de décomposition calcaire* ont été remaniées et mélangées de sable et de limons à blocs, qu'il semble, parfois bien difficile également, à cause de leur nature et de leur disposition, de rapporter généralement, comme le voudrait M. Dupont, à la rivière ayant façonné la vallée principale. Ces cavernes devaient souvent et doivent parfois encore servir de canaux et de débouché à des afflux, adventifs ou latéraux, de ruissellement interne, ou à des aiguigeois de plateau ayant représenté et représentant encore, les uns les ruisseaux et cours d'eau engouffrés, les autres les eaux de ruissellement torrentiel et pluvial, avidement bues par le calcaire, par la voie de ses fentes, failles, cassures et canaux : multiples conducteurs anastomosés des eaux de surfaces chargées de limons et de dépôts meubles de toute espèce.

Quelques mots au sujet des progrès récents de la science en ce qui concerne le mode de remplissage des cavernes.

Comme on vient de le voir, je me sépare ici nettement de M. *Éd. Dupont* dont, à l'exemple de nombreux confrères, plus autorisés que moi en la matière, je ne puis plus actuellement admettre comme fondée

a thèse sur le mode de remplissage des cavernes et sur la corrélation d'âge et d'origine qu'il a voulu établir entre les dépôts de celles-ci et les sédiments fluviaux extérieurs.

Comme il y a peu d'années encore, au *Congrès d'anthropologie et d'archéologie préhistorique de Paris*, en 1889, je n'étais nullement rallié aux vues, nouvelles pour moi, que présentait alors en ce sens M. Max Lohest, en opposition à celles de M. Dupont (voir pp. 68-69 et 72-73 des « Communications et Discussions » dans le *Compte-Rendu du Congrès*), je me crois obligé de signaler que l'évolution qui s'est opérée dans mon esprit a été amenée par l'exposé méthodique, accompagné de faits précis et concordants, que de nombreux auteurs, qui se sont occupés de l'âge et du remplissage des cavernes, ont fait, tant en Belgique qu'à l'étranger, des éléments nouveaux de la question.

Déjà *Desnoyers* en 1849 (1), *W. Boyd Dawkins*, en 1862 (2) et enfin *Fraas*, en 1872 (3), avaient, pour des grottes étudiées en France, en Angleterre et même en Belgique (trous Magrite et du Frontal), montré que la *circulation souterraine des eaux sauvages des plateaux* pouvait, concurremment avec des actions locales internes, amener dans l'intérieur des grottes des sédiments terreux et meubles divers, que l'on croyait naguère uniquement apportés par les crues et alluvionnements des cours d'eau.

Plus récemment, M. Noulet (4), dans l'Ariège, a montré l'identité des matériaux de remplissage : blocs rocheux, cailloux, sables d'une caverne de cette contrée, avec les matériaux du plateau recouvrant.

C'est en 1886 que la thèse de M. Dupont fut pour la première fois combattue en Belgique, du moins après les observations préliminaires de Fraas, émises au Congrès de Bruxelles. MM. J. Fraipont et Max Lohest, dans deux Mémoires consacrés aux découvertes faites par eux à la grotte de Spy (5) ont rattaché à l'action des eaux pluviales s'infiltrant

(1) Article : *Grottes* dans le Dict. d'Hist. Nat. de d'Orbigny, Paris, 1849, p. 371.

(2) *On a Hyæna-den at Wookey-Hole, near Wells. Q. J. G. S.*, 1862, Londres, p. 115.

(3) *Sur le remplissage des cavernes.* (Congrès intern. d'Anthrop. de Bruxelles, 1872, p. 151.)

(4) *Cavernes de l'Ombrie (Ariège)*, Lyon, 1882.

(5) *La race humaine de Néanderthal ou de Canstadt, en Belgique*, par J. FRAIPONT et MAX LOHEST. (Bull. Acad. roy. de Sciences de Belgique, 3^e série, t. XII, n^o 12, 1886, voir pp. 32-39 du tiré à part.)

Idem. — *Recherches ethnographiques sur des ossements humains, découverts dans des dépôts quaternaires d'une grotte à Spy et détermination de leur âge géologique* par J. FRAIPONT et MAX LOHEST. (Archives de Biologie, t. VII, 1887, pp. 587-757, pl. 17 à 20, voir pp. 682 à 692.)

dans les roches calcaires et y donnant naissance à des circulations d'eau souterraines, l'origine de la formation des grottes et en ont rationnellement conclu : 1° que les grottes ne peuvent nullement être considérées comme antérieures au creusement des vallées, 2° que la hauteur des grottes au-dessus du fond des vallées ne peut constituer un facteur déterminatif de leur âge.

Ces travaux toutefois n'avaient pas suffisamment attiré mon attention, absorbée par le domaine de la géologie tertiaire, lorsqu'au Congrès de Paris, en 1889, je me refusai à admettre les vues, nouvelles pour moi, exposées par M. Lohest. Mais, depuis 1888 jusqu'à nos jours, les études se sont rapidement succédé et MM. *Boule* en France (1) *Fraipont* et *Tihon* en Belgique (2) ainsi que les observations de nombreux fouilleurs de cavernes tels que MM. *J. Braconier*, *P. Destinez*, *M. de Puydt* et *Max Lohest* ont mis **définitivement hors de doute**, après l'examen soigneux de plus d'une trentaine de grottes belges, que le remplissage des cavernes *par voie verticale* et sous l'influence du *ruissellement des plateaux* calcaires recouvrants, constitue, avec l'apport dû aux actions locales internes (dissolution et causes atmosphériques), la *règle générale*, tandis que l'alluvionnement fluvial paraît constituer l'infime *exception*.

Il est à remarquer qu'une telle action de ruissellement et d'apport vertical avait, dès 1872, été reconnue par Fraas jusque dans certaines cavernes de la Lesse, que M. Dupont avait cependant présentées comme bases de son argumentation en faveur de la corrélation sédimentaire avec des dépôts fluviaux extérieurs.

Dans une quinzaine de grottes de la vallée de la Méhaigne fouillées par MM. Fraipont et Tihon, il a été reconnu que ni cailloux roulés, ni limons stratifiés ou non, ni limons blocailleux ou autres ne pouvaient représenter les alluvions anciennes de la rivière.

Il y a dans ces travaux de nos confrères : MM. *Boule*, *Fraipont*, *Tihon* et *Lohest* un ensemble de **faits précis**, indiscutables comme portée, qui n'auront pu manquer de frapper M. Dupont et lui auront sans doute fait virtuellement abandonner ses vues, bien que jusqu'à

(1) *Matériaux pour l'histoire primitive de l'homme*, 3^e série, t. V, p. 406 (1888). (Bull. Soc. philomatique de Paris, 8^e série, t. I, p. 83, 1889). — *La Grotte de Reinbach*, Lyon (1889). — *Note sur le remplissage des cavernes*. (L'Anthropologie, 1892.)

(2) *Explorations scientifiques des cavernes de la Vallée de la Méhaigne*, par J. FRAIPONT et F. TIHON. (Mém. cour. et autres Mém. de l'Acad. roy. des Sciences de Belgique, t. 43, 1889.)

Idem. Deuxième communication. — *Ibid.*, t. 44, 1896 (reçu pendant l'impression de la présente étude).

Les cavernes et leurs habitants, par J. FRAIPONT, Paris, 1896 (Bibl. scient. cont.) (Id.)

présent il se soit borné à ne modifier ouvertement de ses thèses antérieures que celle qui tendait à établir une corrélation entre l'âge des cavernes et leur hauteur et celle qui avait trait à l'origine de l'argile rouge (1).

Il y a lieu de remarquer que les thèses, alors nouvelles et toutes personnelles, que soutenait, il y a 30 ans, M. Éd. Dupont au sujet du classement des dépôts des cavernes et de leurs relations avec le terrain quaternaire extérieur de la Lesse et de la Meuse (2) avaient laissé assez sceptiques les savants commissaires chargés d'examiner le travail. L'un d'eux, M. *d'Omalius*, regrettait le manque de faits paléontologiques et archéologiques en faveur de ces vues et considérait que les rapprochements stratigraphiques proposés par M. Dupont n'étaient « pas suffisamment appuyés pour qu'ils pussent être considérés comme définitivement acquis à la science » ; l'autre, M. *Van Beneden*, tout en admettant qu'il y avait là des rapprochements heureux, était d'accord avec son collègue pour dire que l'étude présentée à l'Académie contenait « des vues un peu hasardées et non suffisamment étayées de faits ». Il dit aussi dans son rapport : « M. Dupont a si bien rattaché le dépôt quaternaire des grottes, souvent si tumultueusement désordonné, au dépôt paisible et comparativement régulier des vallées et des plateaux, que je serais tenté de le regretter, si par hasard, les travaux ultérieurs faisaient crouler ce bel échafaudage » (3).

Si je cite ces appréciations, si foncièrement sceptiques, des deux illustres savants belges chargés d'examiner les vues de M. Dupont, c'est parce qu'elles me mettent plus à l'aise pour signaler aujourd'hui, en combattant incidemment ici les vues de cet auteur, que ce qui fait précisément la force de l'argumentation contraire défendue par MM. *Fraas*, *Boule*, *Fraipont*, *Lohest*, *Tihon* et d'autres encore, c'est un ensemble concordant *de faits précis et irréfutables*, à l'appui de la thèse nouvelle à laquelle je me suis rallié et à laquelle on doit espérer, me semble-t-il, voir M. Dupont se rallier à son tour, comme il l'a déjà fait pour les deux points de vue signalés plus haut.

Je dois ajouter que la circonstance qui m'a récemment amené à m'occuper de ce sujet intéressant du remplissage des cavernes, en relation si intime avec la question d'origine de celles-ci et du mode de

(1) Voir *Bull. Soc. belge de Géologie (loc. cit.)*, t. VII (1893). Mém., pp. 204 à 206 et 213 à 214.

(2) *Étude sur le terrain quaternaire des vallées de la Meuse et de la Lesse dans la province de Namur*, par Éd. DUPONT. (Bull. Acad. roy. de Sciences de Belgique, 2^e série, t. XXI, n^o 5.)

(3) *Rapports de MM. d'Omalius et Van Beneden*, sur le travail précédent. (Bull. Acad. roy. des Sciences de Belgique, 2^e série, t. XXI, 1866, n^o 3, pp. 203-206.)

circulation des eaux sauvages, pluviales et torrentielles, dans les fentes et conduits naturels des massifs calcaires, a été la lecture, toute fortuite, de la dernière étude (*Notes sur le remplissage des cavernes*), publiée en 1892, par M. *Boule*, sur la matière en question.

Désireux d'approfondir le sujet, dont je constatai immédiatement les relations avec la question traitée ici, je me suis récemment adressé à M. le Professeur *J. Fraipont*, qui a eu l'obligeance de m'envoyer ses tout derniers travaux, parus après la présentation, mais avant l'impression de la présente étude.

Je me suis autorisé — un peu irrégulièrement peut-être — de cette circonstance pour compléter mon texte et tirer ainsi parti de ces études nouvelles et appuyer mes vues personnelles de l'expérience de spécialistes dont il se fait que je partage entièrement la manière de voir, basée sur de nombreuses séries de faits concordants, tant à l'étranger qu'en Belgique.

C'est la remarquable étude de M. *Marcelin Boule* intitulée : *Notes sur le remplissage des cavernes*, qui me paraît synthétiser le mieux, ou du moins de la manière la plus générale, la question évoquée par ce titre. Aussi je me permettrai de résumer brièvement son travail. Cet auteur, d'accord en cela avec MM. *Fraipont*, *Tihon*, *Lohest* et bien d'autres, signale que les progrès accomplis depuis ces dernières années dans l'étude des terrains quaternaires ne permettent plus de continuer à attribuer un rôle important ni aux « courants diluviens » ni aux grandes inondations quaternaires comme facteurs du remplissage des grottes à limons ossifères. Il combat, avec d'excellents arguments de fait, l'analogie que M. *Dupont* et quelques rares auteurs ont cherché à établir entre les dépôts de l'intérieur des cavités souterraines et les dépôts alluviaux de l'extérieur, et il s'élève aussi contre cette conséquence que les dits auteurs en tiraient en déclarant que l'âge des dépôts ossifères des cavernes est d'autant plus ancien que leur niveau est plus élevé au-dessus des cours d'eau actuels.

J'ai rappelé tantôt que, depuis 1893, M. *Dupont* paraît toutefois avoir renoncé à cette dernière vue, qui peut donc être considérée comme définitivement abandonnée.

M. *Boule* montre enfin, par des observations précises sur le mode d'introduction limoneuse et argileuse qu'il met en lumière — et qui paraît bien être *la vraie caractéristique* du remplissage des cavernes à sédiments ossifères, — que l'on ne peut continuer à soutenir, en thèse générale, que l'ouverture et le remplissage des grottes sont contemporains du creusement des vallées.

C'est à une action lente et assez continue, d'infiltrations d'eaux soit terreuses ou boueuses, soit chargées d'argile rouge de décomposition,

parfois aussi, mais plus exceptionnellement, de sédiments plus grossiers : sables, graviers et cailloux, — infiltration qui s'opère tant par ruissellement externe et interne que par la voie des fissures, canaux, aiguillois et multiples cavités communicantes des massifs calcaires, — c'est, dis-je, à cette action, toute spéciale et trop souvent méconnue jusqu'ici, que M. *Boule*, comme nos confrères belges précités, attribue *la majeure partie* des éléments de remplissage des cavernes ossifères, dont il distingue d'ailleurs les dépôts caractéristiques des alluvions fluviales stratifiées anciennes, caillouteuses, graveleuses et sableuses — nullement ossifères celles-ci — qui constituent, mais bien plus rarement, le substratum des premiers et les vestiges reculés d'anciens cours d'eau souterrains. Les actions atmosphériques et chimiques internes complètent, bien entendu, l'action du remplissage et en constituent le second facteur.

La coupe que fournit, entre autres, M. *Boule*, de la salle dite des Crevasses, dans la grotte de Gargas (Hautes-Pyrénées) est fort démonstrative à ce double point de vue, et elle montre en même temps qu'à une époque reculée de l'érosion ayant creusé la vallée, il y avait, à d'assez hauts niveaux, une rivière souterraine, d'une plus grande antiquité que la période de remplissage des cavernes par les limons ossifères.

L'examen et l'analyse attentive faits par l'auteur des travaux de M. *Dupont* sur les cavernes de Belgique lui ont permis, dit-il, d'interpréter sans difficulté, suivant ses vues, les faits exposés par le géologue belge, dont les idées théoriques sont cependant, dit M. *Boule*, en contradiction à peu près absolue avec la thèse défendue par l'auteur de ces intéressantes observations. Il en résulte donc que MM. *Boule*, *Fraas*, *Fraipont*, *Lohest*, *Tihon*, et d'autres encore, sont bien d'accord pour attribuer aux cavernes de la Lesse et de la Meuse un mode de remplissage n'ayant rien de commun avec les phénomènes de l'alluvionnement des vallées.

Les causes premières de l'évolution fluviale et des variations de régime hydrographique superficiel et souterrain.

Il me paraît difficile, dans cette étude amenée par ma réponse aux critiques de M. *Flamache*, de passer sous silence le **facteur originel** qui a régi naguère l'évolution du réseau hydrographique, tant superficiel que souterrain, dont les vestiges internes ont été partiellement conservés sous forme de grottes, tant sur les flancs des vallées que dans le massif calcaire des plateaux séparatifs, et dont les sédiments caillouteux et sableux à allure fluviale sont parfois conservés eux-mêmes, comme dans la grotte de Gargas et comme en certaines cavernes belges.

Ce facteur, j'y ai déjà fait clairement allusion p. 391, en parlant des différences du régime orographique ancien avec les conditions actuelles de relief du sol. Je l'identifie tout entier, je m'empresse de le dire, avec cette action encore mystérieuse, mais indéniable, des *grands mouvements séculaires* du sol, dont l'étude rationnelle et complète reste encore à faire. Ce sont ces mouvements de lentes oscillations : relèvement et abaissement régionaux, qui ont, dans nos plaines, modifié si profondément l'orographie et l'hydrographie de nos régions depuis les débuts de la période quaternaire jusqu'à nos jours.

Les preuves de tels mouvements ne consistent pas seulement dans le fait que le creusement de certaines de nos vallées s'est effectué dans des conditions qui, sans ce facteur orogénique, seraient *contraires aux lois de la physique* : telle la traversée, en aval, de massifs actuellement plus élevés que les régions d'amont, ou même que les lieux d'origine des cours d'eau, mais encore et surtout dans les incontestables *déplacements géographiques* des cours d'eau pendant et depuis la période quaternaire, déplacements qui ont parfois fait passer d'un bassin dans un autre des affluents entraînés, dans leur action érosive, par ces mouvements du sol.

Les résultats concordants, relatifs au Rhin, à la Moselle, à la Meuse et à l'Escaut, si bien mis en lumière par MM. Schumacher (1), Grebe (2), Wohlgemuth (3), Lorié (4) et Van Overloop (5) en ce qui

(1) E. SCHUMACHER, *Die natürliche entwicklung des Strassburger Landes*, br. gr. in-8°, 52 p., 3 pl. (Extr. de *Strassburg und Seine Bauten*. Strassbourg, 1894.)

(2) *Ueber Thalbildung auf der linken Rheinseite, insbesondere über die Bildung des untern Nahethales* von H. GREBE. — Jahrb. d. k. preuss. geol. Landesanstalt für 1885. Berlin, 1886, pp. 133-164, pl. III et IV. (Voir l'intéressante analyse de cette étude, publiée par M. H. FORIR, sous le titre : *De la formation des vallées de la rive gauche du Rhin et particulièrement de la vallée de la Nahe*, dans la BIBLIOGRAPHIE du tome XLV (1885) des Annales de la Société géologique de Belgique.)

(3) WOHLGEMUTH. *Sur la cause du changement de lit de la Moselle, ancien affluent de la Meuse*. Association française pour l'avancement des sciences. Session de Paris, 1889, pp. 403-408. Voir aussi, pour ce qui concerne la dérivation de la *Toul* de l'ancien réseau moséen, au profit du Rhin, les travaux de *Boblaye* (1820), *Buvignier* (1852), *Husson* (1864), et *Godron* (1896) qui, sans aborder le fond de la question au point de vue géologique, ont signalé la présence des galets de la *Toul* (actuellement haute Moselle) dans la région d'amont de la Meuse.

(4) *Les Métamorphoses de l'Escaut et de la Meuse*, par J. LORIÉ (traduction modifiée et revue d'un mémoire en néerlandais, publié dans le *Journal de la Société de Géographie des Pays-Bas* (1894). — Bull. Soc. belge de Géologie, t. IX, 1895. Mém., pp. 50-77, pl. III et IV.)

(5) *Les Origines du bassin supérieur de l'Escaut*, avec une planche et deux cartes. par EUGÈNE VAN OVERLOOP, 1 vol. in-8°. Hayez, 1889.

concerne les déplacements de ces cours d'eau ; ceux obtenus et exposés tout dernièrement par M. Davis (1) en ce qui concerne toute la vaste région arrosée par la Seine, la Meuse et la Moselle, tout cet ensemble de faits si hautement intéressants, si frappants — quoique encore à peine connus et appréciés chez nous — montre l'existence réelle de telles influences générales dans nos plaines et leur rôle inévitable dans l'évolution comme dans les variations de leur régime hydrographique, qui naturellement devait se modifier d'après les états successifs d'*altitude* et de *pente* du sol et du thalweg des cours d'eau.

De même que les eaux courantes superficielles se sont localisées et abaissées de plus en plus jusqu'au fond actuel des vallées, de même ainsi les *tributaires souterrains* de ces rivières et les zones d'infiltration de l'ancien lacis circulatoire des massifs calcaires ont eu leurs étages et canaux supérieurs abandonnés successivement pour des zones plus basses, où se localise actuellement, avec des proportions mutuelles, variables selon les circonstances, la double action mécanique et chimique qui perpétue, dans les profondeurs, le travail qu'elle a édifié naguère plus haut au sein des massifs calcaires ; travail dont les grottes et cavernes inaccessibles aux eaux du régime hydrographique moderne sont les irrécusables témoins.

Ceci m'amène à *préciser* ma pensée en ce qui concerne l'âge relatif des cavernes considérées au point de vue de leur *hauteur* au-dessus d'une vallée donnée. Il est certain qu'il faut abandonner la thèse, trop absolue, autrefois défendue par M. Dupont, et qu'il y a lieu de reconnaître que des grottes peuvent avoir été creusées ou élargies à *divers niveaux indifféremment* après le creusement plus ou moins total des vallées. Mais il y a lieu, me paraît-il, de ne pas généraliser d'une manière trop absolue en un sens contraire aux vues naguère développées par M. Dupont et d'admettre, de même que le cours d'eau extérieur le plus élevé, qui a commencé à façonner le sillon descendant de la vallée, devait être plus ancien que celui qui a parachevé le dit sillon, de même aussi *un certain nombre* de grottes au moins, qui

Les Origines du bassin inférieur de l'Escaut, avec une planche et une carte par EUG. VAN OVERLOOP, 1 vol. in-8°, Hayez, 1889.

Le texte de ces deux brochures a été refondu en une seule étude, publiée en 1890 comme annexe au Bull. de la Société belge de Géologie, sous le titre : *Les Origines du bassin de l'Escaut*. Une planche et deux cartes, Bruxelles, Hayez, 1890.

Quelques mots de rappel au sujet de l'hydrologie du bassin de l'Escaut, par EUG. VAN OVERLOOP. — Bull. Soc. belge de Géologie, t. IX, 1895. Bull. d. séances (4 juin 1895), pp. 71-76.

(1) *La Seine, la Meuse et la Moselle*, par W. M. DAVIS. — Annales de géographie. Paris, 5^e année, n° 19 du 15 octobre 1895 (pp. 24-59).

représentaient les affluents souterrains successifs pendant la phase graduelle de descente du régime hydrographique découvert et souterrain, peuvent devoir leur étayement et leur âge correspondant à une localisation *successivement rabaissée* des phénomènes d'écoulement fluvial. On peut donc admettre en principe qu'il peut subsister de la thèse primitive de M. Dupont certaines applications, dont l'observation ultérieure des faits est appelée à fournir la mesure exacte.

L'argile rouge, résidu de la dissolution du calcaire, et la base d'argumentation qu'elle fournit à M. Flamache.

L'argile rouge, résidu de la dissolution du calcaire, ne pouvait manquer d'attirer l'attention de M. Flamache dans une étude où l'attaqué de la roche calcaire fournit l'objet d'une thèse critique aussi développée. Mais lui fournit-elle une base d'argumentation plus solide que les précédentes? C'est ce que nous allons examiner.

M. Flamache reconnaît que cette argile rouge se rencontre abondamment sur les plateaux, d'où elle provient à l'évidence de la dissolution du calcaire superficiel par les eaux acidules. Donc, aucune contestation sur l'origine de l'argile. Mais, examinant le cas des cavernes isolées et à mi-côtes — dont le Trou des Nutons, dans la vallée de la Lesse, lui semble représenter un bon type — mon honorable contradicteur fait remarquer que ces cavernes possèdent des *couches épaisses* de cette argile rouge, reliquat de la décomposition du calcaire, qui par lui-même, dit-il, contient moins de 5 % d'argile.

L'auteur dit ensuite : « D'après la théorie de M. Dupont (la théorie exclusivement chimique), l'argile rouge rencontrée dans une de ces cavernes ne peut provenir que du résidu de la seule masse calcaire de cette caverne; car le mode d'amenée de l'eau exclut tout apport non dissous. Or, en admettant que cette argile ait la densité du calcaire, ce qui n'est pas loin de la vérité, chaque mètre de hauteur du dépôt argileux représente la dissolution de vingt mètres au moins de calcaire. Le Trou des Nutons (1) contient *cinq ou six mètres d'épaisseur d'argile*. On ne peut donc prétendre que le Trou des Nutons ait fourni seul ce résidu. Dès lors il y a apport; ce qui exclut la filtration des eaux.

Voilà, en tout et pour tout, à quoi se réduit l'argument présenté par M. Flamache, au sujet de l'argile rouge des cavernes, et voilà l'*unique fait* sur lequel il base sa troisième conclusion *générale*, rappelée en

(1) La hauteur du Trou des Nutons est d'environ 17 mètres au maximum.

tête de la présente notice : « L'argile de dissolution trouvée dans les cavernes ne peut provenir exclusivement de leur masse. Elle a été apportée par des courants. »

Le débat va prendre ici une allure assez curieuse. Si, pour ce qui concerne la présence d'apports non chimiques dans le Trou des Nutons et dans d'autres cavernes encore, je suis d'accord avec M. Flamache — qui est cependant tombé ici dans une erreur d'appréciation sur l'épaisseur de l'argile rouge — je dois combattre son mode d'argumentation et sa généralisation, qui montrent que notre estimable collègue n'a guère fait appel aux vraies méthodes d'investigation scientifique.

D'abord il aurait pu se dire que le cul-de-sac constitué par le Trou des Nutons n'est vraisemblablement que le dernier vestige, excentrique ou latéral, d'une caverne *plus étendue*, dont la majeure partie occupait naguère une partie de l'espace actuellement englobé dans l'immense cavité ou sillon de la vallée ; dès lors l'argile rouge accumulée en ce recoin, qui pouvait être plus bas que le reste, peut, sans difficulté — même en admettant la thèse de M. Dupont d'une érosion purement chimique — représenter le résidu au vingtième, d'un massif dissous, *infinitement plus considérable* que le vestige de cavité aujourd'hui respecté par l'érosion de la vallée. C'est dire que tout calcul proportionnel devient un simple *jeu d'esprit*, sans fondement assuré, sans valeur scientifique, faute de pouvoir apprécier exactement à *quel cube de calcaire réellement dissous* correspond la masse observée d'argile rouge.

Admettons toutefois l'hypothèse invraisemblable que le Trou des Nutons représenterait une caverne complète, ou n'ayant guère eu d'extension latérale primitive. Comment et sur quelles bases M. Flamache établit-il son appréciation ? Il a examiné une figure schématique fournie par M. Dupont, un simple *croquis* de la caverne des Nutons ayant pour but de figurer, sans détail, la superposition et les relations mutuelles des dépôts que renferme la dite caverne. Ce diagramme de M. Dupont (voir *Bull. Soc. belge de Géologie*, tome VII, 1893, p. 215) renvoie le lecteur à la figure originale, détaillée, publiée par le même auteur dans le tome XX (1865) de la 2^e *Sie* du *Bulletin de l'Académie royale des sciences de Belgique* (voir p. 824).

Si M. Flamache, avant d'établir un calcul réclamant une certaine précision dans ses données, s'était donné la peine de recourir à la *coupe détaillée originale*, il aurait constaté que l'observation directe, due aux fouilles naguère pratiquées dans le Trou des Nutons, n'a fait rencontrer que 2^m.50 d'épaisseur au *maximum* d'argile rouge, au lieu des 5 à 6 mètres que lui attribue M. Flamache. De plus, le fait que

cette argile est interstratifiée de sable, et a donc été remanié mécaniquement par des eaux ruisselantes ou courantes, ou bien ne s'est produite que pendant des périodes alternantes et interrompues, a été parfaitement mis en lumière par M. Dupont; ce fait s'oppose à laisser prendre cette argile comme étalon des mesures proportionnelles entre le volume du résidu d'altération du calcaire et la masse dissoute de celui-ci.

On voit donc que si d'une part M. Flamache peut avoir raison, contre M. Dupont, de ne pas considérer le Trou des Nutons comme dérivant uniquement d'un processus d'ablation chimique, il a eu tort de se servir, avec des données dont il a plus que doublé la valeur numérique réelle, d'un si mauvais exemple pour baser *sur lui seul* cette généralisation erronée que, en principe, l'argile de dissolution trouvée dans les cavernes ne peut provenir exclusivement de la masse de calcaire ayant servi à former celle-ci.

Il y a tant d'autres cavernes, bien mieux conditionnées que le Trou des Nutons pour l'étude, intéressante certainement, du rapport cherché et qui eussent pu fournir à M. Flamache des données autrement précises et où, en particulier, les dimensions réelles de la cavité en jeu ne présentent pas l'aléa considérable qui permet de considérer le Trou actuel des Nutons comme un simple vestige de caverne étendue. Dans les travaux anciens de M. Dupont, assurément publiés sans parti pris ni idée préconçue sur le point en débat — puisqu'à cette époque l'argile rouge, dont j'ai, en 1880, fait connaître la véritable signification, était encore alors attribuée à une action geysérienne, ou d'origine interne et filonienne, — M. Flamache aurait pu s'éclairer plus sérieusement sur les proportions moyennes et générales que prend le volume du résidu d'argile rouge par rapport à la masse calcaire enlevée pour constituer la caverne. C'est ainsi que dans le *Trou de la Naulette*, caverne haute de 9 mètres en certaines parties, et de 13 mètres en d'autres, le plancher calcaire de la grotte ne contenait qu'une couche d'environ 0^m.25 d'argile rouge. Ceci représente, pour les régions hautes de 9 mètres, 1/36^e et pour celles hautes de 13 mètres, 1/52^e de résidu. Nous voici donc bien en dessous de la proportion de 1/20 qui est admise par M. Flamache pour accorder au résidu une origine purement chimique.

Dans le *Trou du Sureau*, haut de 17 mètres, il n'y avait qu'une couche, assez localisée encore, de 0^m.50 d'argile rouge; ce qui représente 1/34^e de la hauteur dissoute, dans l'hypothèse d'une action purement chimique. Dans le *Trou du Chêne*, il n'y en avait guère que 0^m.15 à 0^m.20. Dans le *Trou du Frontal* enfin, haut de 20 mètres et où l'origine purement chimique de la grotte aurait, suivant la formule de

1/20^e admise par M. Flamache, pu amener l'accumulation normale d'un mètre d'argile rouge, il n'y en avait que des *traces*, sans épaisseur appréciable. C'est assez dire qu'il serait puéril de vouloir s'attacher à des calculs de ce genre, faussés par l'action de multiples agents, notamment par l'ablation ultérieure d'une partie des résidus de dissolution et surtout par des actions sédimentaires fluviales ou *d'écoulement souterrain ancien* et moderne, ayant remanié et altéré les rapports proportionnels réels des divers dépôts étudiés.

C'est ainsi que dans certaines cavernes, surtout localisées le long de la rive droite de la Lesse, l'argile rouge est plus développée, comme dans les Trous des Nutons, de Furfooz et de Chaleux par exemple, que dans les cavernes citées plus haut ; mais alors ces argiles sont interstratifiées ou mélangées de sables et de cailloux roulés, indiquant nettement des actions, soit de ruissellements et d'infiltrations internes, soit peut-être de remaniements mécaniques ultérieurs, à déterminer.

Sur ce *point spécial* donc, malgré l'inexactitude de son raisonnement et de ses conclusions, M. Flamache est dans le vrai en combattant la théorie uniquement chimique de M. Dupont, quand il nous dit que certaines grottes ont pu être remaniées et mécaniquement agrandies par l'eau courante.

Mais en ce qui concerne le *fond essentiel* de sa théorie, qui consiste à voir dans les *eaux courantes* souterraines le facteur *unique* de la formation et de l'élargissement des cavités, galeries et cavernes du calcaire, nous avons vu qu'**aucune partie de son argumentation ni de ses exemples** n'a résisté à l'analyse que nous venons d'en faire. Successivement ses six ordres de faits, rencontrés tantôt, son dispositif expérimental et ses observations sur l'argile rouge de dissolution se sont effondrés devant l'examen consciencieux, et dépourvu de tout parti pris, qui vient d'en être fait.

Résumé sur le mode d'argumentation de M. Flamache.

L'erreur de M. Flamache provient, comme je le disais en commençant, d'un malentendu, dont une question de mots fait en grande partie le fond.

Fermant les yeux sur ce qui se passe dans les profondeurs des massifs calcaires, où existent et agissent, armés de tout leur pouvoir chimique, des eaux d'infiltration, amenées dans ces niveaux inférieurs par l'engouffrement des eaux de ruissellement, des eaux temporaires et fluviales, descendant rapidement et par de larges canaux : aiguigeois, failles et grandes dislocations des massifs calcaires, M. Flamache n'a

eu en vue, comme eaux d'infiltration, que celles qui imprègnent, par descente lente et pour ainsi dire capillaire, la zone superficielle, où l'action chimique est intense et localisée, comme il le dit, sur quelques mètres principalement. Mais qui a jamais songé à attribuer à ces eaux superficielles, d'infiltration lente et d'action toute localisée, la formation des cavités et des grottes situées dans les profondeurs des massifs calcaires ?

Tout le raisonnement de mon honorable contradicteur est cependant localisé dans l'examen de ce qui se passe à *la surface* des massifs calcaires ; action qui n'a *aucun rapport direct* avec le processus de formation des cavernes.

Un apologue.

Qu'un petit apologue me soit permis, qui fera bien saisir la situation.

Sous un toit abandonné, disloqué par l'ouragan, un plafond reçoit les averses ; il est percé : l'eau ruisselle d'étage en étage et inonde la maison ; trous, cavités et moisissures envahissantes ne manquent pas de se produire jusque dans le rez-de-chaussée, sous l'action désagrégeante du temps et de l'humidité combinés. De ce toit un expert, appelé à examiner ce qui est arrivé, étudie, examine *les tuiles* et ce qui se passe sur chacune d'elles. Il y localise toute son attention et observe bien d'ailleurs. De ce que les gouttes d'eau qu'il voit tomber sur ces tuiles n'en imprègnent qu'une minime épaisseur et ne parviennent pas, quand il pleut, à humecter ni à affecter la face inférieure des dites tuiles, l'expert conclut et s'en va déclarant au propriétaire étonné, qu'il est *impossible*, vu l'arrêt superficiel de l'action de l'eau pluviale sur les tuiles, que des dégâts intérieurs, des actions corrosives et malfaisantes aient pu se produire par l'action de cette même eau de pluie au sein du bâtiment...

Les *tuiles* représentent la zone superficielle des massifs calcaires, que mouille l'infiltration des eaux pluviales ; l'*expert* c'est M. Flamache, qui a localisé toute son attention sur cette zone de surface ; les *interstices* entre les tuiles, qui permettent le ruissellement intérieur, ce sont les *aiguigeois, bétaires, failles, et fentes accidentelles* des massifs calcaires, qui permettent la pénétration d'abord rapide, et localisée au sein de ceux-ci, des eaux qui descendent ensuite, subdivisées et ralenties, transformées alors en eaux filtrantes, restées armées de tout leur pouvoir chimique.

Si l'exemple est quelque peu trivial peut-être, la comparaison me paraît singulièrement justifiée.

Pour en finir avec la première partie du travail de M. Flamache, je puis conclure en disant que des « trois objections sérieuses » rappelées en tête de la présente étude, objections que mon honorable contradicteur a crues *irréfutables* contre la théorie qui avance que les cavités observées dans le calcaire ont été formées par de l'eau acidule filtrante, aucune n'a résisté à l'analyse impartiale des faits, et ce qui ressort le plus clairement de cette défaite de l'action *exclusivement mécanique*, défendue par M. Flamache, c'est que la thèse de l'action *purement chimique*, défendue par M. Dupont, ne saurait, à elle seule non plus, la remplacer pour expliquer tous les faits observés. La vérité paraît résider dans l'adoption de la thèse *physico-chimique*, qui tient compte des facteurs multiples et variables qui entrent en jeu dans la formation des cavernes.

C'est bien à tort que M. Flamache m'attribue la paternité de cette thèse, car en la défendant je crois simplement me faire l'organe d'un nombreux groupe d'observateurs qui, sans idée préconçue, tiennent compte des faits et constatent la diversité des facteurs qui entrent en jeu dans cette question du mode de formation et d'agrandissement des grottes et des cavités souterraines.

Examen de la partie théorique du travail de M. Flamache.

J'arrive maintenant au^e second point de la communication de M. Flamache : son exposé « d'une théorie, peut-être hasardée, pour expliquer, sans intervention nécessaire de l'action chimique profonde des eaux filtrantes, la formation de cavités dans les roches. »

L'auteur ne nie pas cette action chimique, principalement dans les calcaires, mais il la croit superficielle. Il avoue qu'une grosse objection l'attend toutefois. On lui demandera comment, si l'on abandonne l'action chimique comme facteur principal, on pourra expliquer que *les grottes ne se rencontrent que dans les terrains calcaires ?*

Voyons en effet comment il répond à cette question toute naturelle.

M. Flamache nous dit : « A cela je réponds *que je n'en sais rien.* » Après ceci la cause pourrait être considérée comme entendue; mais continuons à suivre le raisonnement de notre contradicteur, fort embarrassé cette fois !

« Il est fort difficile, dit-il, de réfuter une objection négative et je pourrais répondre par une objection du même genre en disant : si l'action chimique de l'eau acidule filtrante sur le calcaire est le seul facteur du phénomène, comment expliquez-vous que la *moindre* fissure dans *tout* calcaire ne devienne pas le siège d'une cavité? »

A la réponse : je n'en sais rien, que M. Flamache se voit forcé de donner lorsqu'il méconnaît l'action chimique en profondeur, il est intéressant d'opposer le fait que c'est précisément **parce que c'est SEULEMENT dans le calcaire** qu'une telle action chimique est POSSIBLE, que l'on ne constate pas de grottes dans les schistes, dans les grès, dans les granites, dans les psammites et dans toutes les autres roches en général, où elles ne constituent tout au moins qu'une infime exception et sont alors dues à d'autres causes.

Le contraste des deux réponses paraîtra sans doute frappant comme criterium de la valeur de l'argumentation !

Puisque l'auteur remplace par un artifice oratoire la réponse à la demande qu'il s'est faite infructueusement, répondons pour lui à la seconde question, derrière laquelle il croit victorieusement retrancher son impossibilité de résoudre la première.

Oui, toute fissure dans le terrain calcaire *est* ou *sera* le siège d'une cavité (agrandissement ou caverne : ceci n'est qu'une question de quantité). Il n'y a même à cela aucun doute, mais pour que ce processus puisse s'effectuer, il faut naturellement aussi que l'eau d'infiltration puisse agir. Dès que celle-ci sera mise en présence de la fissure, elle agira, et l'élargissement, la cavité si l'on veut, se formera. De même, au point de vue mécanique, toute roche, quelque dure qu'elle soit, peut être creusée, érodée, affouillée en sillon torrentiel, puis en vallée, par un flux d'eau courante : mais tant que le torrent ne sera pas mis en contact avec la roche en vue, celle-ci naturellement ne pourra être excavée.

Quelques secondes avant qu'éclata l'orage de mai 1865, dont les conséquences ont été si bien décrites naguère par M. Éd. Dupont (1), les dures roches calcaro-siliceuses du ravin de Falmigneul, près Dinant, offraient au torrent dévastateur qui s'y précipita avec furie, un plancher rocheux de 3 à 4 mètres plus relevé que celui constaté par M. Dupont après le dit orage, soit quelques heures plus tard. Le dit ravin, profond de 70 mètres, a été tout entier, suivant M. Dupont, creusé de la sorte depuis l'époque quaternaire (2). Les facteurs d'ablation, qu'ils soient mécaniques ou chimiques, n'agissent que *par intervalles* et *dans des conditions déterminées*. Donc, ce qui n'est pas encore dissous ni élargi actuellement, en matière d'érosion chimique, le sera inévitablement

(1) *Étude sur cinq cavernes de la Lesse et sur le ravin de Falmignoul*, par Éd. DUPONT. — Bull. Acad. r. des sciences de Belgique, t. XXIII, 1867.

(2) Ne voilà-t-il pas un précieux élément de mesure à utiliser pour l'étude du phénomène de relèvement général du sol pendant la phase quaternaire du creusement des vallées? Il y aura à revenir sur cette observation et sur les réflexions qu'elle suggère.

quand l'occasion propice se présentera, et à la demande sceptique de M. Flamache je réponds nettement que toute fissure du calcaire peut et même *doit* devenir tôt ou tard le siège d'élargissements et de formation de cavités. Comme la roche si dure du ravin de Falmignoul, *elle attend son heure* et les conditions qui doivent amener son attaque.

La théorie de M. Flamache consiste à expliquer la formation des cavités et des grottes des roches fissurées par l'action érosive, *quelle qu'elle soit, des eaux courantes*. Sur le point de savoir si cette action érosive est plutôt *physique* que *chimique* il ne se prononce pas. Il reconnaît manquer de faits précis pour se décider à cet égard, et tout en pensant que « la prépondérance doit plutôt appartenir à l'action mécanique, il ne lui répugnerait pas de l'attribuer, s'il le fallait, à l'action chimique » ... déclaration qui est singulièrement en contradiction avec la première partie de son travail, où il signale si nettement cette action chimique comme localisée seulement dans les 2 ou 3 mètres superficiels des massifs calcaires.

M. Flamache établit ensuite cette proposition :

« *Le creusement des vallées souterraines a lieu par les mêmes causes et suivant les mêmes lois que celui des vallées à l'air libre.* »

Il y a certes dans les deux cas des *lois* et des *causes* dont le principe est commun aux deux processus. Mais ce qui agit à titre exceptionnel et localisé dans l'un, devient un facteur général et très actif dans l'autre.

Exposé sommaire des principales différences des facteurs d'érosion à l'air libre et dans les cavités souterraines.

Il peut y avoir certaines *similitudes* dans les principes d'érosion souterraine et à l'air libre, mais il y a d'énormes divergences dans l'APPLICATION des facteurs.

M. Flamache ne croit-il donc pas que dans le cas de creusement à l'air libre, l'érosion mécanique est *puissamment aidée*, et cela d'une manière très générale, par les *galets et les cailloux roulés* de roches dures : quartzites, grès ou silex, qui pendant la phase de creusement d'un lit à l'air libre, dévalent et s'entrechoquent sur le thalweg et sur les bords d'une rivière creusée en terrain rocheux calcaire, surtout en temps de crue. Croit-il que sans l'action *des roches entraînées* par l'eau torrentielle, le ravin de Falmignoul aurait pu voir, pendant la durée d'un orage, son lit s'abaisser de 3 à 4 mètres, par le simple frottement de l'eau sur un plancher rocheux ? Or, qui pourrait contester que ce facteur des cailloux roulés est — du moins dans nos régions —

exceptionnel et peu développé dans nos rivières souterraines? Je suis, bien entendu, le premier à admettre qu'ailleurs il peut en être autrement, témoin certaines observations de M. Martel dans les calcaires jurassiques.

M. Flamache croit-il que l'*éboulement des parois latérales*, et les accidents divers qui en résultent, soient aussi fréquents dans les rivières souterraines — où je reconnais d'ailleurs qu'ils peuvent exister — que dans le cours des rivières en travail de creusement à l'air libre?

Par contre, les *écroulements* par rupture d'équilibre des *voûtes rocheuses*, et les *barrages* qui en résultent dans le cours souterrain des rivières, constituent des actions à influences diverses qui sont assurément spéciales au cours des rivières souterraines et y produisent soit des élargissements et agrandissements irréguliers et localisés, soit des comblements dont le processus ne trouve, ni dans l'un ni dans l'autre cas, aucune analogie dans les cours d'eau à l'air libre.

Peut-on comparer le lit et les parois *uniformément calcaires*, malgré leurs variations stratigraphiques relatives, d'un cours souterrain en massif calcaireux, à ceux d'une rivière encaissée dans le même terrain à l'air libre, où il y a des berges garnies de *dépôts plus récents et variés*; caillouteux parfois, qui constituent des *réserves* à éléments pondéreux et érosifs supplémentaires, que l'affouillement des rives met successivement à la disposition de l'action mécanique.

Peut-on admettre que l'action de l'universelle *loi des méandres*, ce puissant facteur de l'érosion mécanique à l'air libre, puisse s'effectuer avec la même intensité, la même ampleur, dans le chenal d'une rivière souterraine qu'à l'extérieur?

Les *apports variés de roches dures* qu'amènent, sous forme de cailloux roulés, les *affluents* des cours d'eau, ont-ils quelque représentant sérieux dans un cours souterrain, et ce facteur supplémentaire d'énergie mécanique pourrait-il y entrer en jeu?

M. Flamache n'admet-il pas que *la force vive ou mécanique* des eaux, à l'air libre, qui dévalent et bondissent parfois sur le thalweg des rivières en creusement et y acquièrent toute leur impétuosité, a mille et une occasions, dans le lit souterrain, de s'affaiblir et de se briser dans le lacis tortueux des canaux latéraux et adventifs, alternativement horizontaux, verticaux et obliques, montants et descendants, souvent amorcés en siphons, que le tracé irrégulier des diaclases et des fentes, même élargies, offrent comme obstacle, avec les barrages résultant des écroulements internes, à la course irrégulière des eaux souterraines? Les forces mécaniques doivent être singulièrement apaisées dans de tels trajets, où les résistances à l'écoulement et les pertes de charges sont

à tenir en sérieuse considération, et l'on en peut voir comme preuve la majestueuse lenteur, contrastant avec l'impétuosité de l'engouffrement initial, avec laquelle la Lesse, et bien d'autres rivières souterraines de nos régions — car nous ne voulons nullement généraliser — sortent de leur traversée rocheuse ! On a simplement l'impression d'un *trop plein* qui s'écoule et dans lequel toute force vive est éteinte, et c'est là un contraste instructif, comme je l'ai dit tantôt, avec l'*élargissement moyen sans cesse croissant*, des galeries souterraines où coule la rivière.

Mon honorable contradicteur croit-il enfin que l'*action chimique* des eaux courantes du tracé à ciel ouvert ait le temps matériel d'opérer partout sur son passage le mystérieux travail d'élaboration qui trouve son domaine de prédilection et d'énergie maximum au sein des eaux calmes, ou tout au moins ralenties par places, des grottes qu'elles parcourent.

Je suis persuadé, en réalité, que M. Flamache ne se dissimule pas l'*inégalité absolue* du rôle respectif des deux facteurs dans chaque cas.

A L'AIR LIBRE tout tend à favoriser l'*action érosive mécanique* : au SEIN DES MASSIFS CALCAIRES tout tend à en *réduire les effets*, du moins dans les régions dont nos massifs de calcaires primaires constituent le type, et où tout tend, par contre, à *augmenter la puissance corrosive chimique* des eaux courantes souterraines. Ce facteur, s'ajoutant à l'action chimique principalement, des eaux filtrantes et ruisse-lantes venant d'en haut à travers les fentes, failles, aiguigeois et dis-jonctions quelconques du massif calcaire, concourt à attribuer à l'action érosive chimique de ces régions souterraines une incontestable prépondérance.

Quelle est dès lors la *portée pratique* de la proposition formulée par M. Flamache. La similitude de *causes* et de *lois* n'a plus guère d'influence en présence de la *divergence générale des intensités respec-tives* de ces causes et de ces lois, suivant qu'il s'agit de parcours à l'air libre ou de parcours souterrains.

Résumé sur la partie théorique du mémoire de M. Flamache.

Tout l'exposé de la partie théorique du mémoire de M. Flamache se borne, comme commentaire de cet exposé, à fournir des représentations diagrammatiques ayant pour but de montrer qu'un *écoulement souterrain* peut se produire au sein de massifs calcaires fissurés, et l'exposé que nous étions en droit d'attendre de lui sur l'*origine méca-nique des cavernes* se borne à la mise en œuvre, fort rationnelle d'ailleurs, de la théorie classique *des vases communiquants* : rien de

plus, en faisant intervenir toutefois la pure *supposition* d'érosions mécaniques corrélatives au mouvement de circulation de l'eau souterraine.

Loin d'aborder la question d'une manière générale et systématique, l'auteur se borne à raisonner sur ce qui pourrait bien se passer dans un massif calcaire fissuré, en communication avec les méandres d'un cours d'eau. M. Flamache, se basant sur les différences de niveau de l'eau libre en amont et en aval, établit — mais qui songerait à le contester — que des communications souterraines de l'amont vers l'aval peuvent se produire, grâce au lacis fissuré du massif rocheux.

Sur ce fait réel, aisément vérifiable parfois, notre estimable contradicteur greffe sa thèse de l'action mécanique prépondérante ou même exclusive : il voit ces canaux souterrains s'élargir par érosion du courant qui opérerait, d'après lui, comme à l'air libre et il le voit arriver à lui tout seul à supplanter, sauf en cas de forte crue, alors que la *chavée* fonctionne, une partie du cours de la rivière à l'air libre. C'est ce qui indique son diagramme reproduit par le n° III de ma figure 3.

Mais une telle circonstance, qui constitue un élément essentiel dans la théorie des cavernes de M. Flamache, n'est en réalité qu'un cas très particulier, bien représenté par la Lesse à Han. Il exige un promontoire calcaire fissuré et un méandre en partie abandonné par une rivière, et dont le cours est devenu partiellement souterrain.

Absence de justification pour l'intensité invoquée en faveur de l'action mécanique.

Si la disposition invoquée par M. Flamache est réellement telle, dans un nombre donné de cas, comme à Han, s'ensuit-il pour cela que c'est à l'*action mécanique* du courant souterrain qu'est exclusivement due la formation des galeries souterraines? Pour que cette action mécanique — à part les phénomènes d'écroulement interne dont il y a lieu de tenir compte — puisse s'effectuer, une condition primordiale s'impose, qui bien rarement est rencontrée dans la nature. Il faudrait que la *différence de niveau* entre le point d'engloutissement et le point de sortie soit suffisante pour *favoriser sérieusement les effets mécaniques*. C'est ce qui n'est généralement pas le cas dans la région étudiée de nos massifs primaires à roches calcaires. Ainsi à Han même, il n'y a guère plus d'un mètre de dénivellation — j'ai pu m'en assurer avec précision — entre l'entrée et la sortie de la rivière, et cependant les eaux ayant circulé dans les fissures du massif intermédiaire auraient, s'il fallait en croire M. Flamache, creusé, par la simple action du courant agissant comme à l'air libre, des cavités pouvant atteindre

qu'à une centaine de mètres de hauteur, comme dans la salle du me! Même en faisant une belle part — qui leur revient d'ailleurs — *écroulements souterrains* corrélatifs au travail d'élargissement des grottes, est-il possible d'attribuer le creusement d'autres salles, sans écroulements admissibles — et que l'on sait atteindre à Han de 10 à 15 mètres de hauteur et plus — à l'action érosive de la Lesse seule? Cela n'est pas sérieusement soutenable et la vérité est que nous sommes ici, comme ailleurs en bien des grottes calcaires, en présence non pas du produit d'un phénomène simple et d'âge actuel, mais d'un processus complexe dans lequel les facteurs chimiques et mécaniques, ayant agi *à des niveaux successifs et descendants pendant* la durée du phénomène de creusement des vallées, et à des niveaux *quelconques depuis* lors, ont vu tour à tour leur action combinée et alternée, suivant un ensemble multiple de circonstances qui variaient, d'abord avec les progrès du creusement et de l'abaissement progressif du thalweg des vallées, ensuite avec les fluctuations des précipitations atmosphériques, et enfin avec les causes des ruissellements internes.

Le cas que M. Flamache a étudié pour un méandre de rivière courbant un promontoire de calcaire fissuré et qui se résume en une question de vases communicants, il l'applique ensuite aux *aiguigeois de plateau* et aux *aiguigeois de chavée*. Le raisonnement est le même : il doit y avoir circulation d'eau en vertu du principe des vases communicants. S'il y a circulation il y a courant souterrain et celui-ci agit comme à l'air libre, c'est-à-dire avec prépondérance tout au moins de l'action mécanique (car en finissant son étude M. Flamache n'ose plus rejeter absolument, comme il l'a fait dans la partie critique de son travail, l'action chimique en profondeur).

Or, cette ablation souterraine qu'avec la grande majorité des observateurs je maintiens être *chimique* avant tout, M. Flamache la considère comme essentiellement *mécanique*. De preuve il n'en fournit aucune. Il se base uniquement sur l'*assimilation*, qu'il a posée en principe, du processus de creusement des vallées souterraines avec celui du creusement à l'air libre : idée *absolument fautive*, qui a été longuement rencontrée plus haut et contre laquelle bien d'autres arguments encore pourraient être présentés.

La divergence des vues de M. Flamache dans les deux parties de son travail.

La prudente réserve que fait, dans la deuxième partie de son travail, M. Flamache en faveur de la détermination de l'action prépondérante qu'il n'aurait « aucune répugnance à retirer à la partie mécanique de

l'érosion souterraine pour le donner à la partie chimique » (v. p. 364) sauve la seconde partie de son travail d'un sort fâcheux, car il rend ainsi sa thèse admissible dans la mesure des divers cas particuliers étudiés par lui : mais c'est en même temps la condamnation formelle des conclusions de la *partie critique* de son étude, dans laquelle il établissait nettement la localisation des actions chimiques dans une faible zone superficielle des massifs calcaires.

Au cours de son travail il aura reconnu que cette voie allait lui être funeste. Il ne pouvait, sans preuves, rejeter de la science qui nous occupe une de ses plus précieuses acquisitions : le rôle important, considérable et si général qu'a joué dans le temps, et que continue encore à jouer aussi bien dans les profondeurs de la terre qu'à la surface du sol, dans le globe entier, cette action si *simple*, si *logique* et si *puissante*, du processus dissolvant des roches calcaires par l'*acide carbonique des eaux météoriques*.

J'espère, en terminant, que mon contradicteur et excellent ami M. Flamache, guidé, comme il le dit en commençant son étude, par son ardeur dans la recherche de la vérité, voudra bien reconnaître que le vœu terminant la dite étude se trouve réalisé : à savoir que la théorie de l'action chimique *initiale et prépondérante*, en ce qui concerne la formation des cavités et cavernes du calcaire, est « sortie victorieuse de l'épreuve à laquelle il a cru pouvoir la soumettre ».

TABLE DES MATIÈRES

Réponse de la Note critique de M. Flamache	pp. 368
Examen de la partie critique du travail de M. Flamache	370
Réfutation sommaire des six ordres de faits avancés comme arguments par M. Flamache.	370
Argumentation fournie par les dépôts phosphatés de la Hesbaye	374
Le dispositif expérimental de M. Flamache	385
L'argumentation fournie à M. Flamache par la morphologie des cavernes	386
Aperçu sommaire sur les multiples facteurs du creusement des cavernes, négligés par M. Flamache	390
Les différences des régimes orographiques et hydrographiques anciens d'avec les conditions actuelles	391
Le mode d'ouverture des cavernes	393
Quelques mots au sujet des progrès récents de la science en ce qui concerne le mode de remplissage des cavernes	394
Les causes premières de l'évolution fluviale et des variations du régime hydrographique superficiel et souterrain	399
L'argile rouge, résidu de la dissolution du calcaire et la base d'argumentation qu'elle fournit à M. Flamache	402
Résumé sur le mode d'argumentation de M. Flamache	405
Un apologue	406
Examen de la partie théorique du travail de M. Flamache.	407
Exposé sommaire des principales différences des facteurs d'érosion à l'air libre et dans les cavités souterraines	409
Résumé sur la partie théorique du mémoire de M. Flamache	411
Absence de justification pour l'intensité invoquée en faveur de l'action mécanique	412
La divergence de vues de M. Flamache dans les deux parties de son travail	413

ERRATA. — Dans la première page du travail (p. 368) à la 3^{me} ligne du 2^{me} paragraphe, le mot *fournies* doit être remplacé par *formées*. Cette erreur d'impression existait dans le texte de M. Flamache, reproduit ici en petits caractères.
