



Diplôme d'État de la Jeunesse, de
l'Éducation Populaire et des Sports

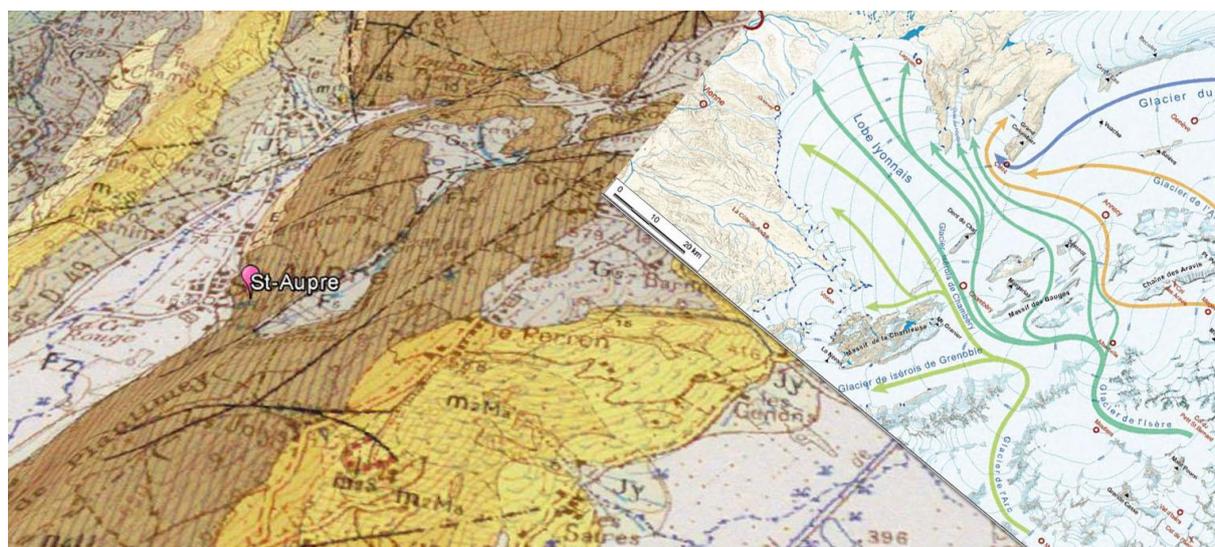
Option :

Perfectionnement sportif

Mention :

Spéléologie

Mémoire de cavité - Grotte de St-Aupre



Approche hydrologique via la dynamique des matériaux erratiques

Présenté par :

Cyrille MATHON

Session :

2015-2016

Remerciements

Je souhaite remercier en premier lieu le CREPS de Vallon-Pont-D'arc, l'ensemble du personnel de l'établissement et, bien évidemment, toute l'équipe des formateurs du DEJEPS Spéléologie. Merci à Didier CAILHOL pour l'apport méthodologique et documentaire, les relectures et les corrections.

Je remercie ensuite le Pôle Emploi de Pontcharra et la Région Rhône-Alpes pour l'aide financière.

Je souhaite remercier Fabien LEGUET pour ses conseils et le partage de sa lecture de la cavité.

Un grand remerciement également à Laura BONNEFOIS, qui m'a très gentiment transmis les relevés topographiques exploités dans ce mémoire.

Concernant ce mémoire, je remercie mes nombreux relecteurs pour le temps consacré à me relire et les remarques toujours pertinentes.

Un remerciement tout particulier à mes collègues de la Session 2, pour tous ces moments passés ensemble.

Je remercie enfin mes proches pour leur soutien dans cette aventure du DEJEPS. Une pensée toute particulière pour ma compagne et sa bienveillance en toutes circonstances.

TABLE DES MATIERES

Introduction	5
Partie 1 : Présentation générale de la cavité	7
1.1 Situation géographique	7
1.2 Description de la cavité.....	8
Partie 2 : Présentation générale des glaciers des Alpes Nord-Occidentales (glaciation de Würm).....	9
2.1 Situation historique et géographique	9
2.2 Le Glacier de l’Arc	10
Partie 3 : Transmission des éléments scientifiques nécessaires au gameplay.....	12
3.1 Objectif opérationnel 1 : Éléments relatifs au Glacier de l’Arc.....	13
3.1.1 : Éléments généraux sur La formation d’un glacier	13
3.1.2 : Éléments généraux sur Le déplacement du glacier	13
3.1.3 : Approche dimensionnelle du Glacier de l’Arc	14
3.1.4 : Inventaire des moyens mis à disposition	15
3.2 Objectif opérationnel 2 : Éléments relatifs à la dépose du matériel morainique.....	16
3.2.1 : Éléments généraux sur le déplacement extérieur du matériel	16
3.2.2 : Éléments généraux d’identification du matériel	17
3.2.3 : Devenir du matériel à sa dépose dans la grotte.....	20
3.2.4 : Inventaire des moyens mis à disposition	23
3.3 Objectif opérationnel 3 : Éléments relatifs au déplacement du matériel morainique dans la grotte	24
3.3.1 : Modalités de déplacement.....	24
3.3.2 : Vitesses de déplacement nécessaires	25
3.3.3 : Limites du déplacement	29
3.3.4 : Inventaire des moyens mis à disposition	29
Partie 4 : Avantages et limites de la démarche dans un contexte de Serious Game	30
4.1 Rappels sur le contexte d’un Serious Game	30
4.2 Avantages de la démarche.....	30
4.3 Limites de la démarche.....	30

4.4 Régulations possibles.....	31
Conclusion	32
Annexes.....	33
Bibliographie	46
Thèses, mémoires et études.....	46
Éléments de cartographie.....	46
Ressources Internet	46

INTRODUCTION

La société WIMB-SG est une agence spécialisée dans le développement de *Serious Game*¹. Elle a pour projet le développement d'une collection de nouveaux jeux orientés sur les phénomènes géologiques et destinés à un public de jeunes universitaires.

L'un de ces jeux (nom de code MCENROE), a pour objectif d'expliquer aux joueurs la circulation passée et présente de l'eau au sein des massifs karstiques. Loin de remplacer une véritable sortie souterraine, les avantages de ce jeu sont nombreux. Il permet, par exemple, de favoriser les connaissances liées au milieu en s'affranchissant des contraintes parfois rédhibitoires de temps, de déplacements et de conditions météorologiques. En ce sens, il est donc un outil également pertinent pour des publics éloignés des zones karstiques.

Ce jeu propose 4 niveaux progressifs, permettant d'aborder l'hydrologie souterraine sous tous ses aspects. Quel que soit le niveau, le *gameplay*² proposera au joueur de rechercher des indices thématiques permettant de comprendre la circulation de l'eau. Les niveaux de ce jeu sont les suivants :

- Niveau 1 : La percolation dans les massifs karstiques.
- Niveau 2 : La corrosion et l'érosion.
- Niveau 3 : La sédimentation et le colmatage.
- Niveau 4 : La dynamique des masses erratiques.

L'objet de ce mémoire concerne le 4^{ème} niveau du jeu. Ce 4^{ème} niveau doit permettre au joueur ayant finalisé les 3 premiers niveaux :

- De rechercher à l'intérieur de l'environnement virtuel des échantillons de matériaux erratiques,
- De déterminer leur origine, via la compréhension des glaciers du Quaternaire,
- D'observer leur charriage au fil du temps à l'intérieur de la cavité, via les écoulements.

Les attentes des concepteurs du jeu peuvent se résumer simplement : acquérir les éléments scientifiques nécessaires à la réalisation du gameplay. La pédagogie utilisée au travers du gameplay et permettant au joueur l'acquisition des connaissances leur revient (de même que le développement du jeu !!). Compte-tenu de ce cahier des charges, la pédagogie déployée doit donc être adaptée au profil des concepteurs du jeu, i.e. :

¹ Serious Game (Jeu sérieux): Désigne un logiciel qui propose une intention sérieuse de type pédagogique via des ressorts ludiques.

² Gameplay (Jouabilité) : Caractérise les éléments d'une expérience vidéo-ludique, c'est-à-dire le ressenti du joueur lorsqu'il utilise le jeu.

- Public adulte,
- Haut niveau scientifique et technique,
- Forte capacité à intégrer des notions complexes et/ou abstraites.

La démarche pédagogique employée sera donc globalement directive. Elle permettra ainsi de superviser exhaustivement le voyage d'un matériel erratique donné, depuis son arrachement du massif d'origine par le glacier, jusqu'à son déplacement final au travers de la cavité (ce déplacement final devenant alors un témoin des phénomènes hydrologiques propres à la grotte).

La Grotte de St-Aupre, située sur le massif de Chartreuse, a été choisie pour servir de support à ce projet. D'autres cavités locales auraient pu être retenues. Mais la Grotte de St-Aupre possède suffisamment d'atouts pour répondre aux attentes. En effet, au-delà des restes morainiques observables dans la cavité, l'historique du massif de Chartreuse permet de bénéficier de l'activité passée du Glacier de l'Arc et de ses particularités.

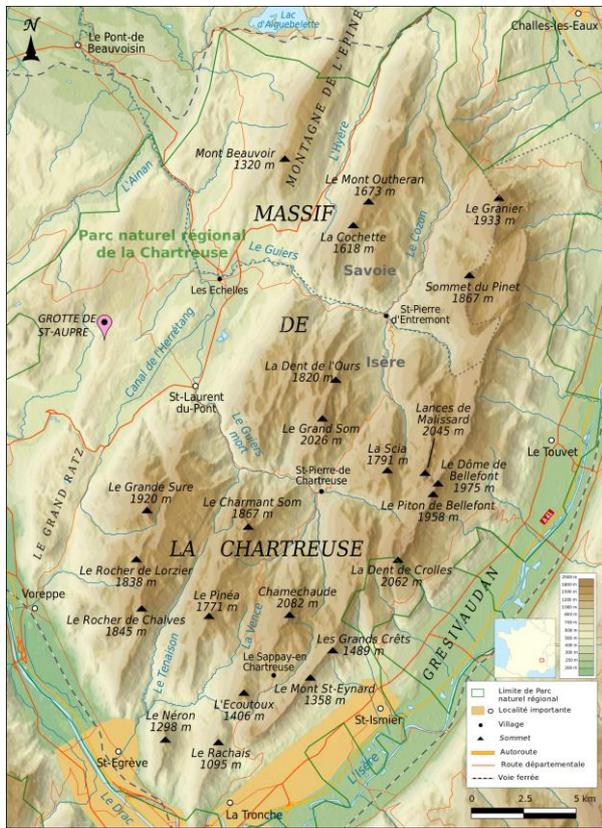
Le choix de ce projet n'est pas pour moi anodin. Il est le reflet d'une conviction personnelle quant aux modalités d'apprentissage et de transmission des connaissances. L'informatique et plus généralement le numérique, nous offrent aujourd'hui des possibilités sur lesquelles il me paraît pertinent de s'appuyer.

Les progrès constants de la technologie, qui déboucheront demain sur l'usage de la réalité augmentée, sont déjà des aides précieuses pour l'appropriation de concepts complexes.

Il me semble donc intéressant de pouvoir réunir en un seul projet cette conviction personnelle et la transmission des connaissances subtiles permettant de cerner l'évolution des réseaux souterrains.

PARTIE 1 : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA CAVITÉ

1.1 SITUATION GÉOGRAPHIQUE



Source illustration : Carte du Massif de la Chartreuse.svg - commons.wikimedia.com

Situé à 80 kms au sud-est de Lyon, le massif de Chartreuse s'étend sur environ 400 km². Bordé par les villes de Grenoble (au Sud), de Chambéry (au Nord) et de Voiron (à l'Ouest), ce massif des Préalpes dessine avec le Vercors et la chaîne de Belledonne le célèbre « Y grenoblois ».

Constituée de roches sédimentaires formées il y a environ 150 Ma, la Chartreuse voit le jour il y a 25 Ma, lors de la surrection de la future chaîne alpine. Quant aux plissements du massif, ils s'opèrent il y a 5 Ma, donnant à la Chartreuse le relief qu'on lui connaît aujourd'hui.

La Grotte de St-Aupre est située sur la partie occidentale du massif, précisément sur le Chaînon du Ratz. Ce chaînon, de par sa structure et son relief, appartient cependant au domaine jurassien. Il constitue en effet le départ d'une série de plis qui s'étendent vers le Nord et qui forment le Jura. Mais ce chaînon fait également partie de la marge occidentale de la Chartreuse ou, plus exactement, de l'avant-pays de Chartreuse. Le chaînon du Ratz et la Grotte de St-Aupre sont ainsi inclus dans le périmètre du Parc Naturel Régional de Chartreuse.

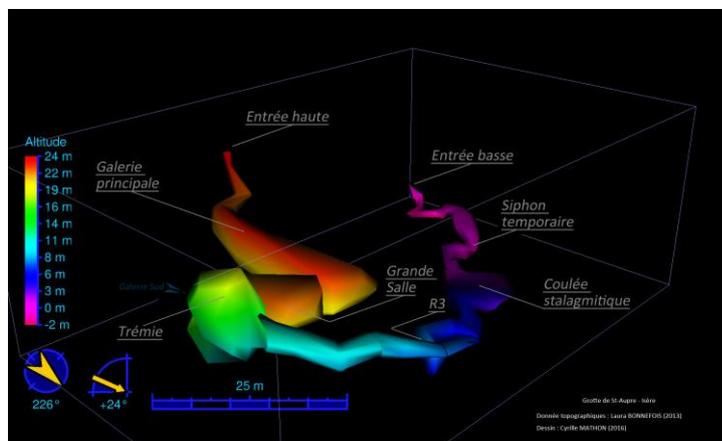
La Grotte de St-Aupre se situe à quelques 250 mètres à l'Est de l'église du village. Elle offre au spéléologue deux entrées distantes d'environ 25 mètres, permettant ainsi une traversée. Les coordonnées de ces deux entrées sont les suivantes :

- Entrée haute : UTM 31T, X = 0709.323, Y = 5030.704, Z = 555m
- Entrée basse : UTM 31T, X = 0709.269, Y = 5030.685, Z = 530m

Une localisation 3D de la Grotte de St-Aupre est proposée en **Annexe 1**.

1.2 DESCRIPTION DE LA CAVITÉ

NB : Dans le cadre de ce mémoire, le descriptif ci-dessous s'intéressera essentiellement au cheminement principal. Il ne mettra qu'accessoirement le focus sur les branches annexes de la cavité.



L'entrée haute se présente comme un orifice relativement large (approximativement 1m x 1m), suivi d'un conduit confortable. Une arche naturelle, construite à la faveur de la dégradation du plafond, donne accès à la Galerie Principale, où l'on peut rapidement se tenir debout. Cette Galerie Principale, jonchée de blocs, se descend sans difficulté, le long d'une pente d'environ 15%.

Au bout d'une vingtaine de mètres, une branche plein Nord donne accès à

la Galerie du Bateau Lavoir. Mais la suite est immédiatement Sud-Est, avec l'arrivée directe dans la Grande Salle. Ce beau volume, résultant là aussi de l'effondrement des strates, donne accès au sommet d'une trémie. Le haut de la trémie permet d'apercevoir (plein Sud) le départ argileux d'une galerie : la Galerie Sud. Bien que ne faisant pas partie de notre cheminement, de grandes quantités d'eau sortent de cette galerie en périodes de crues, inondant ainsi l'itinéraire qui conduit à l'entrée basse.

La Trémie se descend facilement en désescalade (rive droite). Arrivé en bas, une vingtaine de mètres de progression nous mène en haut d'un R3, que l'on descend en rappel. La progression se poursuit et l'on arrive assez vite au sommet d'une coulée stalagmitique. Une fois descendue (rive gauche) et après quelques mètres toujours confortables, on franchit en rampant le Siphon Temporaire. Un dernier virage sur la gauche (Sud) nous conduit à l'entrée basse et nous permet de retrouver l'extérieur.

On peut noter dès à présent que les matériaux erratiques sont présents et visibles tout au long de cette traversée. On remarque en effet des blocs, des galets et des remplissages morainiques en de multiples endroits de la cavité. On note également, quelques mètres à l'intérieur de chacune des deux entrées, le faciès moutonné des parois qui atteste à lui seul de la pénétration des glaciers à l'intérieur de la grotte.

Une représentation 3D simplifiée de la Grotte de St-Aupre est proposée en **Annexe 2**.

- Le GUNZ (-900 000 ans),
- Le MINDEL (-400 000 ans),
- Le RISS (-180 000 à -100 000 ans),
- Le WÜRME (-70 000 à -20 000 ans).

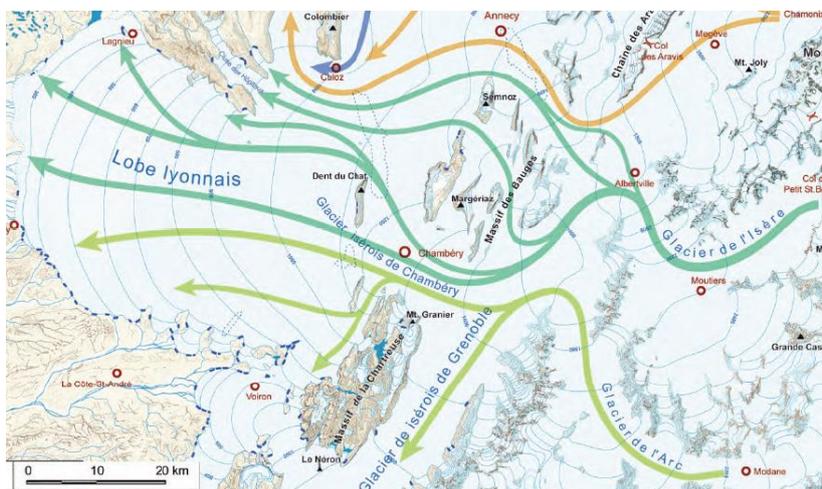
Les datations du GUNZ et du MINDEL sont approximatives et restent encore aujourd’hui sujettes à controverses. Le RISS et le WÜRME sont, par contre, datés avec un peu plus de précision car les traces de leur existence sont encore observables.

Dans ce qui suit, nous nous intéresserons plus particulièrement à la glaciation de WÜRME et à son impact sur les Alpes Nord-Occidentales.

L’illustration ci-dessus offre une représentation des flux glaciaires au maximum Würmien³. On y découvre les appareils glaciaires principaux ayant contribué, du moyen-pays suisse jusqu’à la basse Isère, à l’englacement quasi général du paysage :

- Le Glacier du Rhône : qui a envahi la vallée du même nom, la plus longue et la plus large de l’arc alpin.
- Le Glacier de l’Arve : qui s’est étendu du sommet du Mont Blanc, jusqu’au bassin genevois.
- Les Glaciers de l’Arc-Isère : délimités par les aires du Beaufortain, de la Tarentaise et de la Maurienne, mais s’étendant jusqu’au lobe lyonnais et à l’avant-pays de Chartreuse, ainsi que dans toute la vallée du Grésivaudan.
- Le Glacier de la Romanche : issu des vallées typiques du Massif de Écrins.

2.2 LE GLACIER DE L’ARC



L’illustration détaillée ci-contre montre les cheminements respectifs des Glaciers de l’Arc et de l’Isère. Au niveau de la cluse de Chambéry (qui peut être considérée comme un point de convergence), le glacier de l’Arc a repoussé vers le Nord le Glacier de l’Isère, entretenant ainsi 2 flux glaciaires distincts.

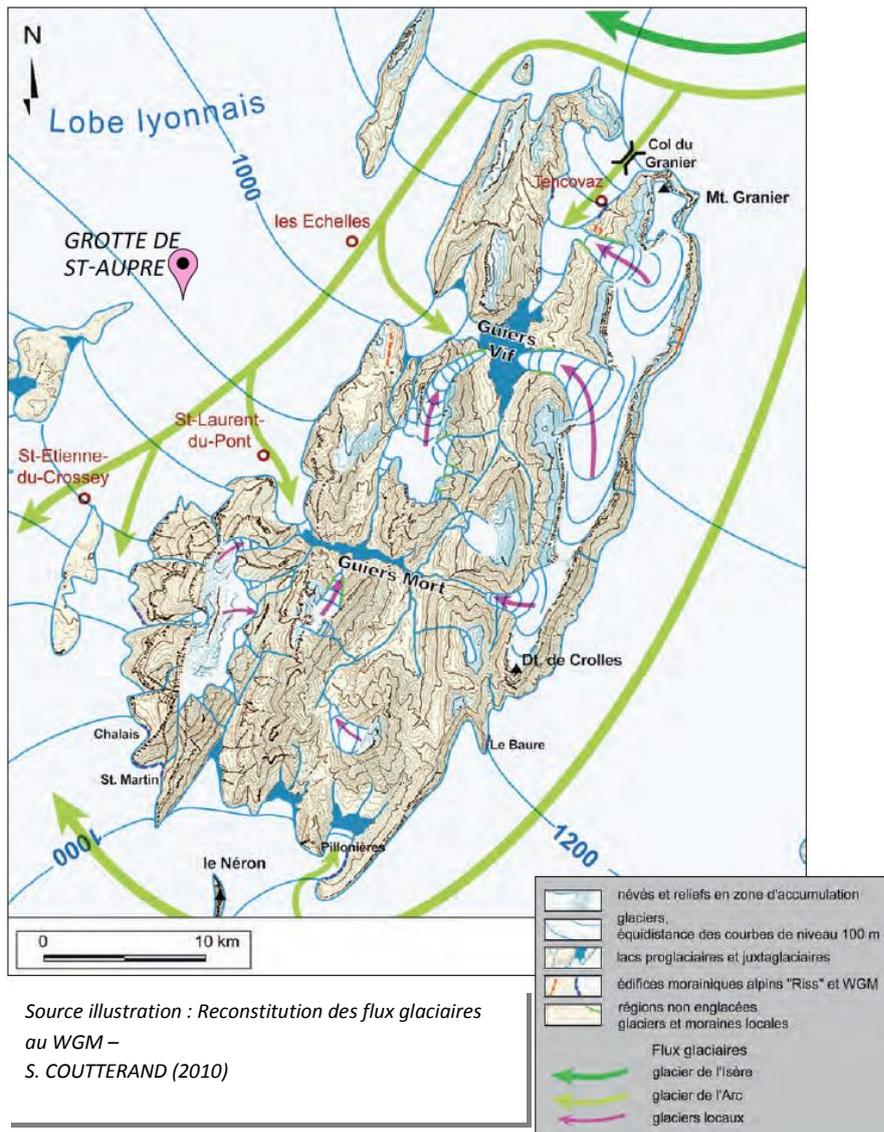
Source illustration : Reconstitution des flux glaciaires au WGM – S. COUTTERAND (2010)

³ WGM : Würm Glacial Maximum

De fait, le glacier de l'Arc a pu à lui seul entourer la Chartreuse, pénétrant toute la vallée occidentale, ainsi que la vallée du Grésivaudan jusqu'à Grenoble.

Cette dissociation des 2 glaciers est démontrée par l'étude du matériel allochtone en Chartreuse au WGM. L'étude prouve que seul le glacier de l'Arc s'écoulait de part et d'autre du massif.

L'illustration ci-dessous précise davantage la pénétration du glacier dans le relief de la Chartreuse et notamment la diffluence mise en place au niveau du Col du Granier.



Quant à la Grotte de St-Aupre, elle a pu être le témoin privilégié des glaciations du Quaternaire. Avec ses 500 mètres d'altitude, ses 2 entrées ont progressivement été obstruées puis recouvertes par l'avancée du Glacier de l'Arc, recueillant ainsi des matériaux arrachés aux massifs savoyards et haut-savoyards.

Comme expliqué en introduction de ce mémoire, les attentes des concepteurs de ce Serious Game peuvent se résumer en l'acquisition des éléments scientifiques nécessaires à la réalisation du gameplay. Autrement dit, les développeurs du jeu souhaitent pouvoir reconstituer informatiquement le flux suivant :

Formation du glacier =>> Transport du matériel morainique =>> Déplacement du matériel à l'intérieur de la grotte.

Par défaut, ces développeurs ont la compétence suffisante pour recréer virtuellement toutes sortes d'environnements ou d'univers. Ils peuvent, à minima, réutiliser des bibliothèques de références déjà existantes et développer à partir d'elles, pour parvenir *in fine* à des résultats plus ou moins réalistes mais toujours acceptables.

Dans le cadre de ce Serious Game, le niveau d'exigence est cependant élevé. S'adressant au final à des étudiants, la pédagogie induite dans le gameplay ne peut pas être mise en œuvre par le biais de références approximatives, qu'elles soient contextuelles ou situationnelles.

Même si le gameplay final n'exploitera peut-être pas les différentes étapes du flux dans les mêmes proportions, il est indispensable de transmettre aux concepteurs des éléments et des données scientifiques fiables et/ou en phase avec les connaissances disponibles actuellement. C'est cette exigence préalable qui leur permettra de virtualiser l'univers choisi avec le plus d'exactitude possible.

En conséquence, la méthodologie déployée à leur attention sera la suivante :

- 1) Décomposition du flux en 3 objectifs opérationnels, correspondants aux 3 étapes.
- 2) Pour chaque objectif opérationnel, apport systématique de 3 types de ressources :
 - a. Des schémas/illustrations expliquant les principes,
 - b. Des éléments chiffrés ou mathématiques permettant de modéliser le principe,
 - c. Des éléments réalistes (objets ou photos), permettant de représenter le principe dans un contexte réel ou proche de la réalité.
- 3) Pour chaque objectif opérationnel, un inventaire récapitulatif des moyens mis à disposition pour la réalisation de l'objectif. Il est à noter dès à présent que ces moyens incluront les séances de terrain nécessaires au repérage des lieux représentatifs et à l'acquisition des échantillons (photos, scan 3D, etc....).

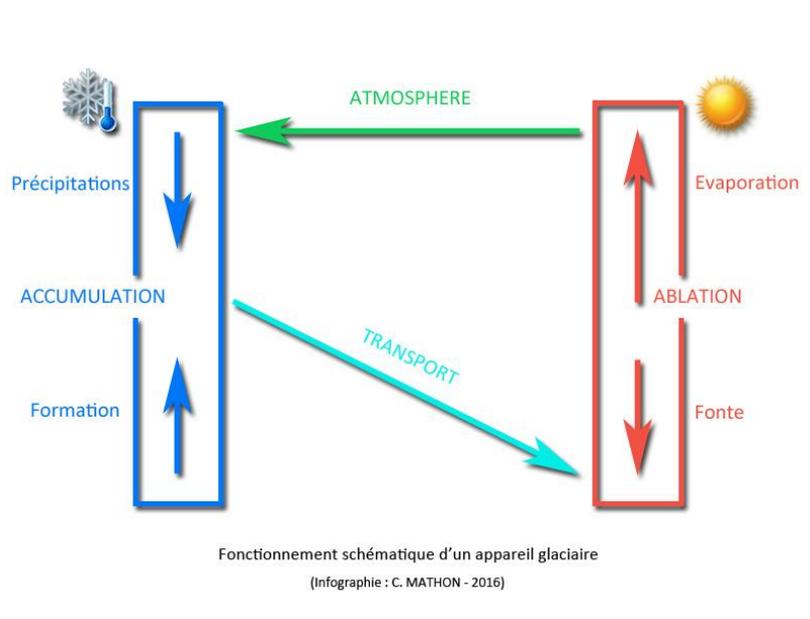
3.1 OBJECTIF OPÉRATIONNEL 1 : ÉLÉMENTS RELATIFS AU GLACIER DE L'ARC

3.1.1 : ÉLÉMENTS GÉNÉRAUX SUR LA FORMATION D'UN GLACIER

Un glacier se forme en haute altitude, c'est à dire dans des régions froides où les chutes de neige vont s'accumuler en couches. Au fil du temps, le poids des couches supérieures va entraîner une métamorphose de la neige accumulée dans les couches inférieures. L'eau de fonte superficielle va percoler peu à peu au travers des couches et les transformer en glace imperméable. Ce phénomène, appelé « close-off », intervient aux alentours de 840 kg de neige/m³.

L'Annexe 3 « *Formation d'un glacier* », propose une infographie illustrant la formation d'un glacier. Elle met en évidence une des zones essentielles de l'appareil glaciaire : la zone d'accumulation.

3.1.2 : ÉLÉMENTS GÉNÉRAUX SUR LE DÉPLACEMENT DU GLACIER



Sous l'effet de son propre poids (dû à l'alimentation amont) et de la gravité, le glacier va se mettre en mouvement. La masse est tellement importante que les cristaux de glace vont se déformer. Ainsi, le glacier va être capable d'épouser le relief durant son déplacement.

Un autre facteur va favoriser ce déplacement : sous le glacier, une fine pellicule d'eau de fonte va lubrifier le relief et augmenter le glissement du

glacier sur le sol rocheux.

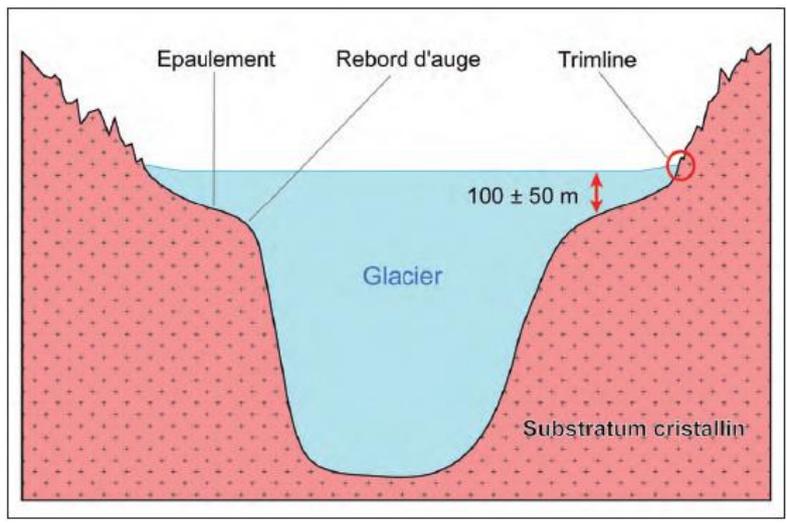
Au fur et à mesure de son avancée, le front du glacier va rejoindre des altitudes où la température sera positive. Le front du glacier va commencer à fondre, aidé en cela par les précipitations (pluies). Cette partie du glacier soumise à la fonte est appelée zone d'ablation (par opposition avec la zone d'accumulation). Notons au passage qu'entre ces deux zones amont et aval, existe une troisième zone appelée zone de transport. C'est en général dans cette zone là que le glacier est le plus épais.

Quant à la vitesse de déplacement d'un glacier, elle est variable et propre à chaque appareil glaciaire. Elle dépend en effet de nombreux facteurs difficiles à quantifier au cas par cas. On peut néanmoins retenir qu'un glacier comme celui de l'Arc devait s'écouler à raison de 90 à 150 m/an.

Le fonctionnement d'un glacier peut donc être représenté comme un cycle macroscopique, ainsi que le montre la figure ci-dessus.

L'Annexe 4 « *Déplacement d'un glacier* », propose une infographie illustrant le déplacement glaciaire.

3.1.3 : APPROCHE DIMENSIONNELLE DU GLACIER DE L'ARC



Source illustration : Reconstitution des flux glaciaires au WGM – S. COUTTERAND (2010)

Les données chiffrées concernant le Glacier de l'Arc au WGM sont assez peu nombreuses et nécessitent l'étude d'une volumineuse documentation pour pouvoir être compilées. On peut néanmoins faire le choix d'un recueil d'informations ciblées et considérer ce recensement comme une liste de repères dimensionnels suffisants à l'éventuelle modélisation du glacier en 3D.

Le glacier de l'Arc débute son trajet au dessus de Bonneval-sur-Arc, en Haute-Maurienne. Sur cette zone, correspondant à l'actuel glacier des Sources de l'Arc, la surface du glacier atteignait au moins les 3200 mètres d'altitude. Plus à l'ouest, dans les bassins de St-Michel-de-Maurienne et de St-Jean-de-Maurienne, le glacier atteignait encore les 2000 mètres d'altitude.

Peu de données vraiment fiables permettent de dimensionner le glacier au niveau de la cluse de Chambéry, les observations de terrains s'étant révélées peu productives.

Dans la Vallée du Grésivaudan, la surface du glacier a maintenu une altitude proche des 1300 mètres.

Au Col du Granier, le Glacier de l'Arc a pu pénétrer le massif en atteignant une altitude également évaluée à 1300 mètres. Enfin, côté occidental de la Chartreuse, le glacier n'a pas dépassé les 1000 mètres d'altitude dans le bassin des Échelles.

En cumulé, depuis Bonneval-sur-Arc jusqu'à l'encerclement de la Chartreuse, le Glacier de l'Arc affiche une longueur d'un peu plus de 200 km.

Quant à sa largeur, elle est bien évidemment variable tout au long de son parcours et difficile à estimer en tout point. Mais on peut être certain que le Glacier de l'Arc occupait l'intégralité des

vallées qu'il a traversées, adoptant ainsi une physionomie semblable à celle illustrée dans la figure ci-dessus.

L'Annexe 5 « Trajet du Glacier de l'Arc au WGM » et **l'Annexe 6 « Aspect du Glacier de l'Arc autour du massif de Chartreuse »** proposent deux infographies sur la morphologie du Glacier de l'Arc au WGM. La première permet de visualiser l'intégralité du cheminement du glacier et les lieux remarquables évoqués dans les paragraphes ci-dessus. La deuxième propose une vue rapprochée du glacier autour du massif de Chartreuse et permet de visualiser son altitude approximative au WGM. Cette infographie a été réalisée avec le fichier KMZ « *Glaciations Quaternaires* » créé par B. Boucher.

3.1.4 : INVENTAIRE DES MOYENS MIS À DISPOSITION

Les éléments relatifs au Glacier de l'Arc et mis à disposition des concepteurs sont récapitulés ci-après :

a) Schémas / illustrations expliquant les principes

- Infographie : Formation des glaciers (Annexe 3)
- Infographie : Déplacements des glaciers (Annexe 4)
- Textes explicatifs

b) Éléments chiffrés permettant de modéliser les principes

Points remarquables	Type de valeur	Valeur	Unité
Bonneval-sur-Arc	A	3 200	M
St-Michel de Maurienne St-Jean-de-Maurienne	A	2 000	M
Cluse de Chambéry	A	Pas de données	
Vallée du Grésivaudan	A	1 300	M
Col du Granier	A	1 300	M
Bassin des Échelles	A	1 000	M

Vallées empruntées	LE	largeur de la vallée	
--------------------	----	----------------------	--

Glacier de l'Arc	LC	200	Km
	VE	90<VE<150	M/an

Légende :

A : Altitude de surface

LE : Largeur estimée

LC : Longueur cumulée

VE : Vitesse estimée

c) Éléments réalistes (représentation du principe)

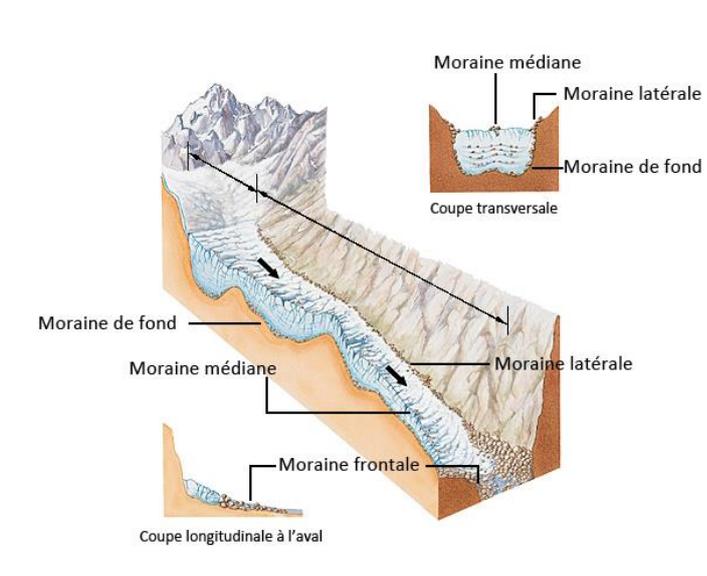
- Infographie : Trajet du Glacier de l'Arc au WGM (Annexe 5)
- Infographie : Aspect du Glacier de l'Arc autour du massif de Chartreuse (Annexe 6)

d) Éléments additionnels : Cartes IGN 1/25 000 des différents territoires traversés par le Glacier de l'Arc au WGM :

N° de carte	Description
3633ET	Tignes Val-D'isère Haute-Maurienne Pn de la Vanoise
3634OT	Val-Cenis Charbonnel
3534OT	Les Trois-Vallées Modane Pn de la Vanoise
3535OT	Nevache Mont Thabor Cols du Galibier et du Lautaret
3433ET	Saint-Jean-de-Maurienne Saint-François-Longchamp Valmorel
3435ET	Valloire Aiguille d'Arves Col du Galibier
3433OT	Allevard Belledonne Nord
3432OT	Massif des Bauges
3432ET	Albertville
3433OT	Allevard Belledonne Nord
3332OT	Chambéry Aix-les-Bains Lac du Bourget
3333OT	Massif de la Chartreuse Nord
3334OT	Massif de la Chartreuse Sud Saint-Pierre-De-Chartreuse Villard-Bonnot
3335OT	Grenoble Chamrousse Belledonne

3.2 OBJECTIF OPÉRATIONNEL 2 : ÉLÉMENTS RELATIFS À LA DÉPOSE DU MATÉRIEL MORAINIQUE

3.2.1 : ÉLÉMENTS GÉNÉRAUX SUR LE DÉPLACEMENT EXTÉRIEUR DU MATÉRIEL



Lors de son avancée, le glacier va éroder la roche sur laquelle il progresse. Cette érosion va affecter les flancs des vallées, mais aussi le lit rocheux. Des débris de roche vont peu à peu être délogés ou arrachés de leur emplacement d'origine et déplacés par le glacier.

Ces débris, dont la taille varie du grain de sable au rocher de plusieurs tonnes en passant par le galet, vont avoir tendance à s'amasser sous forme de moraines. L'illustration ci-contre décrit les différentes sortes de moraines construites par le déplacement du

glacier (Source illustration : Archives Larousse).

Mais d'autres débris vont être piégés par la glace et être ainsi transportés sur des dizaines de kilomètres, loin de leur emplacement d'origine. Lorsque le glacier va entamer sa phase de retrait (fonte ou période de déglaciation), ces débris vont alors être libérés de la glace et se déposer sur place.

C'est ce transport et cette dépose lointaine qui permettent d'expliquer, sur un site donné, la présence de roches allochtones et plus précisément de matériels morainiques. La Grotte de St-Aupre, creusée dans un massif calcaire, renferme dans ses galeries de nombreux restes d'origines morainiques (remplissages, galets, blocs) qu'il convient de pouvoir différencier du reste du matériel en place.

3.2.2 : ÉLÉMENTS GÉNÉRAUX D'IDENTIFICATION DU MATÉRIEL

La première vocation du gameplay est de permettre au joueur de rechercher le matériel erratique présent dans la grotte. D'où l'importance, pour les concepteurs, d'avoir les éléments nécessaires à l'identification de ce type de matériel.

La démarche imaginée à leur attention consiste, dans un premier temps, à leur permettre de comparer un matériel de type calcaire et un matériel de type « autre », démarche qu'ils pourront à leur tour réutiliser dans le gameplay.

Pour cela, une sortie de terrain à la Grotte de St-Aupre est organisée, afin d'observer l'ensemble du matériel présent dans la grotte, puis de prélever et d'analyser des échantillons.

a) Observation

La visite de la grotte (selon l'itinéraire principal représenté en Annexe 2) permet d'observer l'éventail de roches disponibles. L'attention est portée sur l'aspect visuel des roches en présence et sur 3 critères :

- La couleur,
- La forme,
- La taille.



Galets – Haut de la Trémie – Photo : C. MATHON

b) Prélèvement d'échantillons et analyse

Une quinzaine d'échantillons de roche sont prélevés et mis de côté. Une matrice préparée à l'avance va permettre de recenser un certain nombre d'informations pour chacun des échantillons :

Type d'information recensée	Modalité de l'évaluation	Valeur possible	Outils nécessaires
N° d'échantillon		Commence à 1	
Forme générale de l'échantillon	Visuelle	A (anguleux) ou P (poli)	
Couleur	Visuelle		
Apparence	Visuelle	L (lisse) ou S (striée)	
Densité	Visuelle + préhension	De 1 (peu dense) à 5 (dense)	
Porosité	Fracturation de l'échantillon puis recherche de microfissures, présence de discontinuités	De 1 (poreux) à 5 (non poreux)	Masette + burin
Structure	Fracturation de l'échantillon	De 1 (massive) à 5 (litée)	Masette + burin
Test de dureté	Rayure de la roche	1 (la roche raye la lame) ou 2 (la lame raye la roche)	Lame en acier
Réaction HCL	Chimique	1 (réaction) ou 0 (pas de réaction)	Fiole d'HCL

c) Conclusion

L'analyse menée sur le lot d'échantillons permet de tirer des conclusions et donnent aux concepteurs des clés simples quant à une primo-identification des matériels. Parmi les différentes informations recueillies, la réaction au HCL s'avère déterminante quant à la différenciation « calcaire – non calcaire ». Mais d'autres critères permettent également d'apprécier les différences entre 2 types de roche.

Un exemple est livré ci-après : analyses d'un morceau de calcaire et d'un galet de granite.



Morceaux de calcaire – Grande Salle - Photo : C. MATHON

Type d'information recensée	Morceau de calcaire	Galet de granite
N° d'échantillon	7	12
Forme générale de l'échantillon	A	P
Couleur	Blanc très sale	Gris anthracite
Apparence	L	S
Densité	4	5
Porosité	4	5
Structure	2	1
Test de dureté	2	1
Réaction HCL	1	0

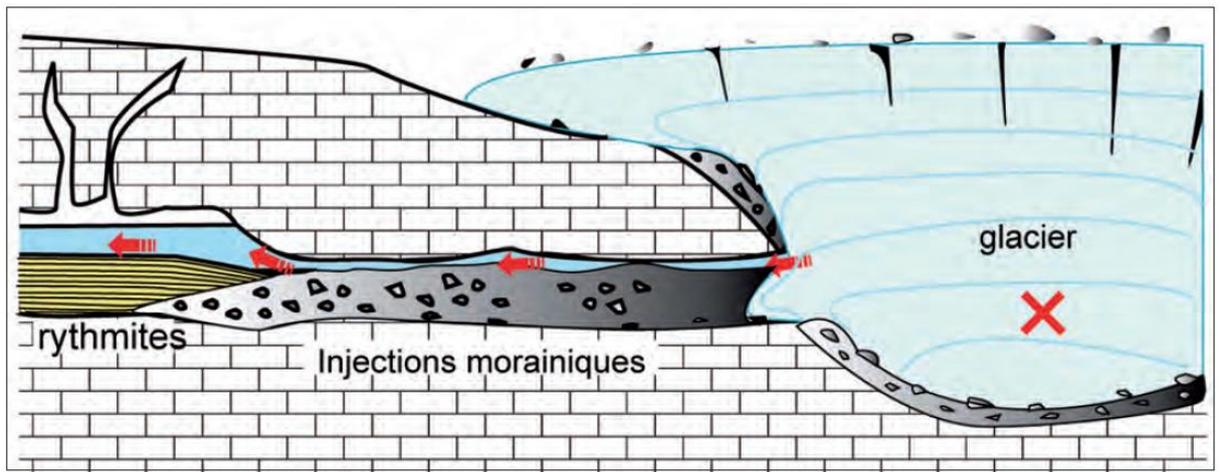


Cette première étape donne la possibilité d'établir la distinction entre les matériels autochtones et allochtones de la grotte. Elle permet d'aborder l'étape suivante, consistant à distinguer le matériel erratique du reste du matériel allochtone.

Il est cependant nécessaire, au préalable, de reconstituer l'historique de ce matériel à partir de sa dépose dans la grotte.

*Galet de granite et blocs morainiques – Grande Salle -
Photo : C. MATHON*

3.2.3 : DEVENIR DU MATÉRIEL À SA DÉPOSE DANS LA GROTTE



Processus de dépose du matériel morainique dans une grotte (d'après Lignier, 2002).

On rappelle tout d'abord que les 2 entrées de la Grotte de St-Aupre sont situées à environ 500 mètres d'altitude (respectivement 530 et 555 m) et que la surface du Glacier de l'Arc a atteint les 1000 mètres d'altitude, quelques kilomètres plus au Nord (au niveau du Bassin des Échelles). On peut également considérer qu'à cette époque, la grotte avait déjà la même physionomie qu'aujourd'hui.

a) Scénario

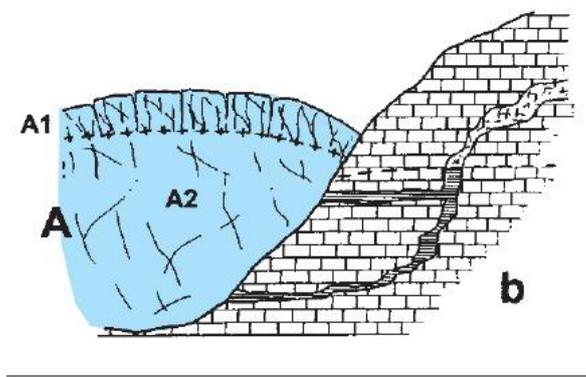
Le glacier monte en puissance, il atteint l'altitude de l'entrée basse. La glace envahit l'entrée et pousse à l'intérieur des débris de la moraine. L'entrée basse se retrouve colmatée. Le même

phénomène se produit au niveau de l'entrée haute. A ce stade là, le système de la Grotte de St-Aupre se retrouve noyé (voir illustration ci-après).

b) 3 questions peuvent alors se poser :

- i. Jusqu'où la glace a-t-elle pénétré l'entrée basse (i.e. : jusqu'où la glace a-t-elle déposé les débris de la moraine) ?
- ii. Même question pour l'entrée haute.
- iii. Une fois le système noyé, quel a été le comportement de la rivière qui sort de la Galerie Sud ?

Pénétration de la glace par l'entrée basse



On peut avancer que la glace a sans aucun doute atteint le siphon temporaire. 2 blocs cristallins (calcifiés depuis) y ont été déposés. Le premier est situé à l'entrée du siphon en rive gauche. Ces dimensions (en centimètres) sont d'environ 30x20x15. Le deuxième est positionné dans le siphon en rive droite. Il est plus gros que le premier, avec des dimensions d'environ 40x25x25.

Source illustration : Représentation d'un système noyé par la marge d'un glacier. A.BINI / P.TOGNINI / L.ZUCCOLI, Karstologia n°32, 1998.

Il est très peu probable, vu leur taille, que ces deux matériels aient été introduits dans la grotte par l'entrée haute, puis transportés naturellement jusqu'au siphon. Cette affirmation sera confirmée au chapitre suivant, lors de l'utilisation de l'abaque de HJULSTRÖM.

Par l'entrée basse toujours, la glace est peut-être allée encore plus loin que le siphon temporaire et a peut-être pénétré la galerie menant à la Coulée Stalagmitique. En effet, on observe dans cette galerie une très grande quantité de galets de bonne taille (en moyenne 15x15x15).

Mais plus que cette galerie, c'est le bas de la Coulée Stalagmitique qui interroge. De nombreux remplissages sont observables en dessous de la coulée. Il est probable que ces remplissages aient été amenés par le glacier et se soient déposés à une époque où la coulée n'existait pas encore (celle-ci s'étant constituée postérieurement à la déglaciation).

Pénétration de la glace par l'entrée haute

Pour l'entrée haute, on peut estimer que la moraine a complètement envahi la Galerie Principale menant à la grande Salle. Les nombreux galets (moyenne 10x10x10) présents dans la Grande Salle en sont les témoins.

Comportement de la rivière de la Galerie Sud

Nous avons rapidement évoqué la Galerie Sud au chapitre 1.2 « *Description de la cavité* ». Cette galerie se met en charge en périodes de crues et déverse l'eau en direction de l'entrée basse. On peut estimer qu'en période de glaciation, la probabilité d'une crue est quasiment nulle. L'eau de la Galerie Sud n'a donc eu que peu d'impact sur le fonctionnement hydrologique du réseau classique. Quant à l'hypothèse d'un contact entre la Galerie Sud et l'eau de fonte de la base du glacier, cela reste peu probable au vu de l'altitude de la dernière salle topographiée (+18 mètres par rapport à l'entrée basse).

d) En résumé

On peut considérer que le Glacier de l'Arc a colmaté les deux entrées de la Grotte de St-Aupre. La glace et les matériels morainiques ont atteint le bas de la Coulée Stalagmitique par l'entrée basse et la fin de la Galerie Principale par l'entrée haute. Lors de la phase de déglaciation, les deux bouchons de glace ont laissé la place aux eaux de fonte.

Côté entrée haute, l'eau de fonte a suivi le sens de la pente. Les sables et petites particules ont été largement déposés sur l'extérieur de la Grande Salle, tandis que les galets plus gros ont été déplacés vers le centre de la Grande Salle. Certains de ces galets ont atteint le bas de la Trémie. D'autres ont été plutôt déplacés vers le haut de la Trémie, certains d'entre eux réussissant néanmoins à être entraînés vers le bas mais restant coincés en milieu de trémie. Des effondrements postérieurs les ont alors recouverts, les laissant cependant encore visibles. Pour les galets ayant chutés en bas de la Trémie, les crues continuent aujourd'hui à les purger vers l'entrée basse.

Côté entrée basse, l'eau de fonte (aidée par l'eau venant du dessus) a elle aussi lentement purgé les matériels vers l'aval, à l'exception des matériels trop imposants pour être transportés, même par des crues torrentielles.

Conclusion :

Dans le cadre de ce second objectif opérationnel, nous avons décrit comment le matériel erratique était transporté jusqu'à l'entrée de la grotte, via le Glacier de l'Arc et sa moraine. Nous avons ensuite mis en place une méthodologie permettant de distinguer le matériel calcaire de la grotte et le reste du matériel. Dans ce reste de matériel, il est nécessaire de pouvoir isoler le matériel morainique. Mais il faut accepter qu'une reconnaissance systématique et précise nécessite alors une analyse en laboratoire et des compétences parfaites en pétrographie. L'idée d'élever le gameplay du jeu à ce niveau de pertinence reste une option intéressante. Elle implique cependant de faire appel à de véritables spécialistes en minéralogie.

Nous pouvons cependant apporter un premier niveau de réponse à la question posée : Comment reconnaître le matériel erratique ? Pour cela, nous pouvons nous baser sur l'historique de ce matériel, développé dans les paragraphes ci-dessus. En effet, la compréhension des phénomènes de glaciation / déglaciation qui se sont déroulés dans les deux entrées de la grotte nous permettent de déduire que :

- De l'entrée haute jusqu'au milieu de la Trémie, la quasi-totalité du matériel non-calcaire est d'origine morainique.
- Du bas de la Trémie jusqu'à l'entrée basse se retrouvent peut-être mélangés des matériels provenant de l'entrée haute et d'éventuels matériels ajoutés par la rivière de la Galerie Sud. Concernant cette portion de la cavité (bas de la Trémie => entrée basse), les certitudes pourront être développées grâce au chapitre suivant. L'étude des déplacements des matériels via les écoulements nous permettra de cerner le champ des possibles (i.e. : Quels matériels n'ont pas pu être déplacés car le débit nécessaire est inenvisageable ?).

Afin de servir de point de départ au dernier objectif opérationnel, **les Annexes 7, 8 et 9** « *Localisation actuelle du matériel allochtone* » fournissent aux concepteurs du jeu un inventaire du matériel allochtone actuellement présent dans la grotte, ainsi que sa localisation.

3.2.4 : INVENTAIRE DES MOYENS MIS À DISPOSITION

Les éléments relatifs à la dépose du matériel morainique et mis à disposition des concepteurs sont récapitulés ci-après :

a) Schémas / illustrations expliquant les principes

- Formation des moraines
- Dépose du matériel morainique dans une grotte
- Représentation d'un système noyé par la marge d'un glacier
- Textes explicatifs

b) Éléments chiffrés permettant de modéliser les principes

Pas d'éléments chiffrés pour cet objectif opérationnel, mais :

- Une méthodologie permettant d'accéder à la différenciation « roche calcaire – roche allochtone ».
- Un historique permettant de reconstituer le positionnement actuel du matériel allochtone.

c) Éléments réalistes (représentation du principe)

- Infographie : Inventaire du matériel allochtone actuellement en place dans la cavité (Annexes 7, 8 et 9)
- Topographie générale de la Grotte de St-Aupre (Spéléo Club de Savoie – 1979)
- Topographie documentée de la grotte de St-Aupre (Laura BONNEFOIS – 2013)

3.3 OBJECTIF OPÉRATIONNEL 3 : ÉLÉMENTS RELATIFS AU DÉPLACEMENT DU MATÉRIEL MORAINIQUE DANS LA GROTTÉ

3.3.1 : MODALITÉS DE DÉPLACEMENT

Dans son mémoire de cavité BE Spéléologie consacré à la Grotte de St-Aupre, Laura BONNEFOIS fait référence aux mesures de débits qu'elle a pu réaliser entre décembre 2012 et juin 2013. Elle met notamment l'accent sur la crue observée le 08/02/2013, où elle a pu constater un débit d'environ 210 l/s en sortie de l'entrée basse⁴. Faute d'autres mesures, même plus anciennes, nous considérerons empiriquement cette valeur comme un maxima du débit pouvant être atteint par le système de St-Aupre.

D'autre part et fidèlement à la logique développée dans l'objectif opérationnel 2, nous allons (en accord avec les concepteurs) orienter le gameplay du jeu selon la stratégie suivante :

Constantes =>> Le joueur sait identifier un matériel autochtone et un matériel allochtone. Il sait également, dans tous les cas, déterminer la taille du matériel.

- A. Si le joueur découvre un matériel autochtone, il peut étudier les écoulements nécessaires à son déplacement.
- B. Si le joueur découvre un matériel allochtone :
 - a. Si ce matériel est dans la portion de cavité allant de l'entrée haute jusqu'au milieu de la trémie, alors :
 - i. Il est en présence d'un matériel erratique.
 - ii. Il peut calculer les écoulements nécessaires à son déplacement.
 - iii. Il peut en déduire si le matériel a pu être déplacé par un écoulement ou s'il est à l'emplacement décidé par la déglaciation.
 - b. Si ce matériel est dans la portion de cavité allant du bas de la Trémie jusqu'à l'entrée basse, alors :

⁴ L. BONNEFOIS – Mémoire de cavité BE Spéléologie - Grotte de St-Aupre – p.28.

- i. Il peut calculer les écoulements nécessaires à son déplacement.
- ii. Si l'écoulement nécessaire :
 - a) Est compatible avec le maxima du débit, alors il ne peut pas être sûr d'être en présence d'un matériel erratique.
 - b) Est incompatible avec le maxima du débit, alors il peut en déduire que le matériel est erratique et qu'il est à l'emplacement décidé par la déglaciation.

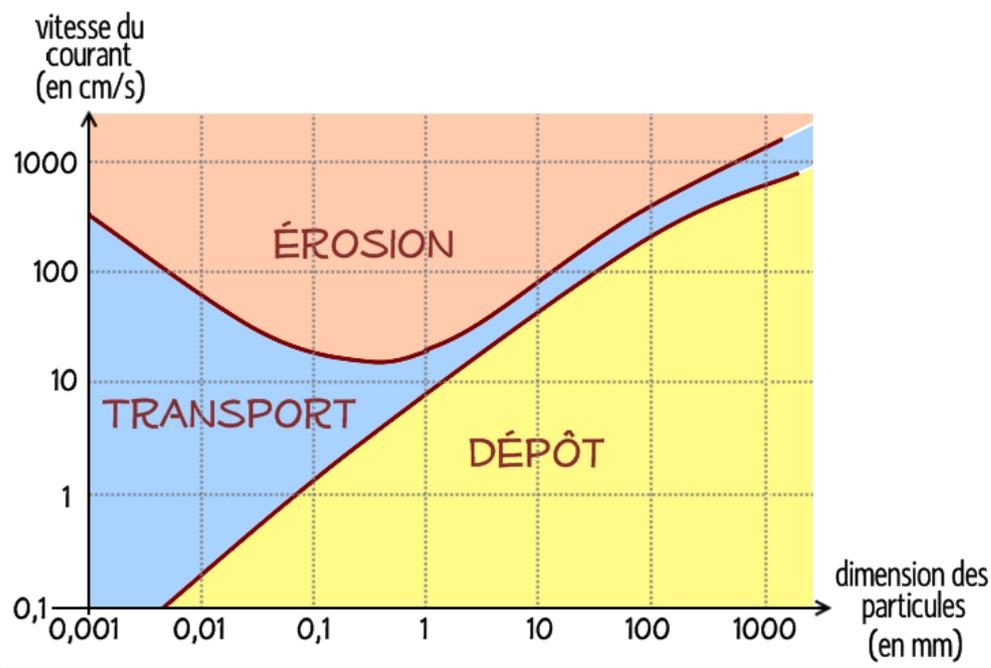
NB : ce dernier cas de figure est cohérent, à la condition que le procédural du jeu génère des matériels allochtones non erratiques systematiquement transportables par les écoulements.

Cette stratégie est un choix délibéré, permettant d'éviter au joueur de se retrouver trop souvent face à des impasses. D'autres stratégies auraient pu être choisies. Il en sera question un peu plus loin, au chapitre « *Régulations possibles* ».

3.3.2 : VITESSES DE DÉPLACEMENT NÉCESSAIRES

Le calcul des débits nécessaires au déplacement des matériels est le dernier élément restant à aborder. Nous allons, dans ce qui suit, proposer 2 méthodes de calculs.

A. Le diagramme de HJULSTRÖM



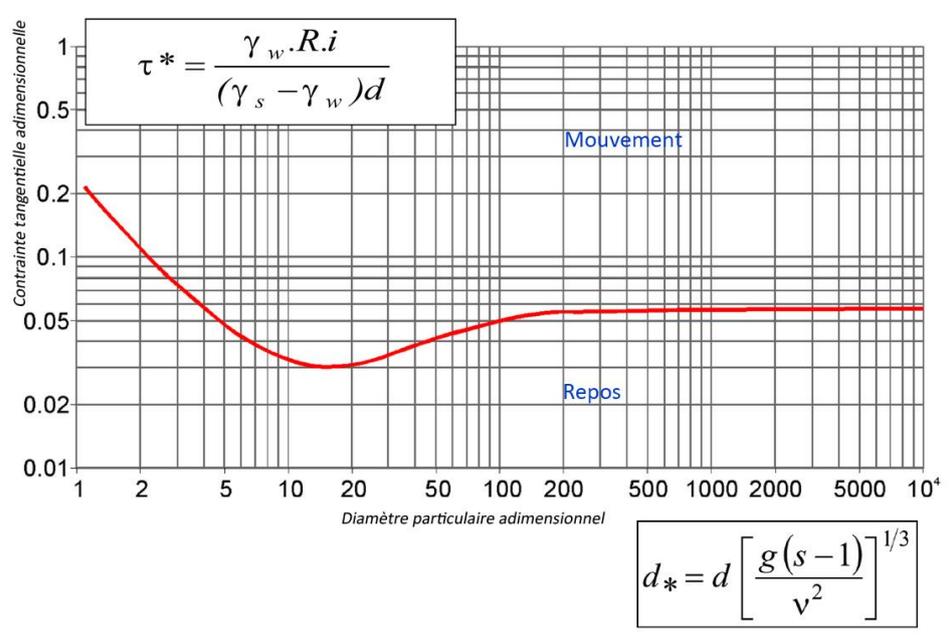
Source illustration : *Diagramme-de-hjulstrom.png*
 commons.wikimedia.com

Le diagramme de HJULSTRÖM met en relation les 3 états propres à une particule : le dépôt (ou sédimentation), le transport et l'érosion. Ces 3 états sont exprimés en fonction de 2 variables qui sont la dimension de la particule (en mm) et la vitesse du courant (en cm/s). L'utilisation du diagramme est simple, puisqu'il suffit de connaître la dimension d'une particule pour connaître la vitesse de courant nécessaire à son déplacement.

Par exemple, un galet d'1 cm nécessitera un courant d'environ 0.8 m/s pour être délogé du lit rocheux. Aux alentours d'1 m/s, il est transporté par le courant (charriage). A 10 m/s, il est en suspension et rentre en phase d'érosion. Il est à noter, en regardant ce diagramme, la vitesse nécessaire pour transporter de petites particules (0.001 mm par exemple). Les particules de cette taille là sont par exemple des argiles qui présentent entre elles une forte cohésion. Une vitesse de courant importante est nécessaire pour rompre cette cohésion. Lorsque la cohésion est rompue, de faibles vitesses de courant sont alors suffisantes pour placer les particules en suspension dans l'eau.

Le diagramme de HJULSTRÖM est d'une grande facilité d'utilisation. Il permet une estimation correcte et immédiate des débits nécessaires aux mouvements des matériels. Élaboré au début du XXème siècle en laboratoire, il est actuellement délaissé au profit d'autres méthodes. Parmi celles-ci, le diagramme de YALIN-SHIELDS qui tient compte de facteurs ignorés par le diagramme de HJULSTRÖM (comme la profondeur d'eau, par exemple).

B. Le diagramme de YALIN-SHIELDS



Source illustration : www.hydrologie.org

Le diagramme de YALIN-SHIELDS a pour avantage de réduire les écarts de résultats pouvant se présenter, lorsque l'on compare des problématiques étudiées en laboratoire et les mêmes problématiques étudiées sur le terrain. Pour cela, ce diagramme met en œuvre des valeurs sans dimensions (adimensionnelles). Le modèle YALIN-SHIELDS n'est pas parfait et possède lui aussi ses limites. Mais il permet des mesures plus réalistes que le diagramme de HJULSTRÖM. En ce sens, il peut être une excellente option à inclure dans le gameplay du jeu.

Pour utiliser ce diagramme, il est nécessaire de procéder au calcul de 2 valeurs qui seront ensuite utilisées comme couple de coordonnées (x, y) et reportées sur le diagramme. Si le point obtenu est au-dessus de la courbe, alors il y a déplacement du matériel. Dans le cas contraire, il y a immobilité. La courbe du graphique, quant à elle, représente le seuil de mise en mouvement du matériel.

a) Diamètre particulaire adimensionnel (abscisse)

$$d_* = \left(\frac{g (y_s - 1)}{v^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

b) Contrainte tangentielle adimensionnelle ou paramètre de SHIELDS (ordonnée)

$$\tau^* = \frac{(y_w * R * i)}{(y_s - y_w) d}$$

La définition des différents paramètres est la suivante :

- γ_w = Poids volumique de l'eau, 10 kN/m³
- I = Pente de l'écoulement
- γ_s = Poids volumique des grains, communément admis entre 26 et 27 kN/m³
- d = Diamètre des grains (en m). On prend pour valeur la dimension intermédiaire du grain s'il n'est pas rond.
- g = Gravité = 9.81 m.s⁻²
- ν = Viscosité cinématique de l'eau. Les valeurs communément admises sont
 - $1.77 * 10^{-6}$ m²/s à 0° C
 - $1.32 * 10^{-6}$ m²/s à 10° C
 - $1.01 * 10^{-6}$ m²/s à 20° C

- R = Rayon hydraulique de la galerie. **L'Annexe 10** « Calcul du rayon hydraulique suivant la géométrie des canaux » propose quelques formules de calculs en fonction de la forme de la galerie.

Pour exemple, prenons le cas d'un galet de 8 cm, dans une galerie de section rectangulaire de 2 m de large, avec 5 cm d'eau au sol et une pente de 0.002. La température de l'eau est estimée à 5° C. Nos éléments de calculs sont les suivants :

Diamètre du galet	d	0,05
Largeur de la galerie	b	200
Hauteur d'eau au fond	h	5
Rayon hydraulique	R	4,76
Pente	i	0,002
Poids volumique de l'eau	γ_w	10
Poids volumique du galet	γ_s	26,5
Gravité	g	9,81
Viscosité cinématique de l'eau	ν	0,00000154

Avec ces valeurs nous obtenons :

$$t^* = 0.115$$

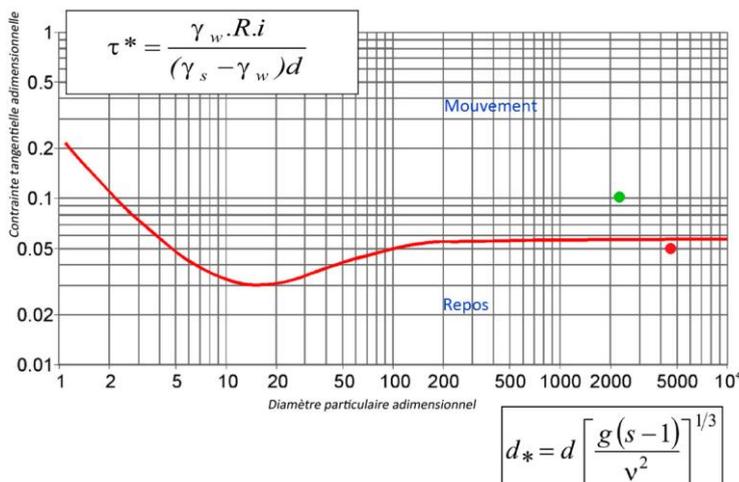
$$d^* = 2362$$

Reportées sur le Diagramme de YALIN-SHIELDS (point vert), nous voyons que le galet de 5 cm est mis en mouvement. Par contre, dans les mêmes conditions, un galet de 10 cm nous donne les valeurs suivantes :

$$t^* = 0.057$$

$$d^* = 4725$$

On voit sur le diagramme (point rouge) qu'il est proche du seuil d'arrachement du lit de la galerie, mais qu'il n'est pas encore mis en mouvement.



3.3.3 : LIMITES DU DÉPLACEMENT

La principale limite au déplacement d'un matériel dans la grotte reste bien sûr la taille du matériel, en fonction du débit.

La même limite doit être intégrée dans le gameplay du jeu, afin de ne pas confronter le joueur à des situations aberrantes. Nous avons fixé pour cela un maxima de débit. La valeur reste empirique, mais elle reste suffisamment réaliste pour pouvoir conceptualiser le jeu.

3.3.4 : INVENTAIRE DES MOYENS MIS À DISPOSITION

Les éléments relatifs à la dépose du matériel morainique et mis à disposition des concepteurs sont récapitulés ci-après :

a) Schémas / illustrations expliquant les principes

Pour la bonne conduite de cet objectif opérationnel, nous avons attiré l'attention des concepteurs sur la nécessité d'intégrer au gameplay une valeur de débit maximum propre à la cavité.

Dans la foulée, nous avons aidé les concepteurs à choisir une stratégie cohérente, parmi d'autres également possibles. Cette stratégie s'est concrétisée par l'écriture d'un algorithme simplifié.

b) Éléments chiffrés permettant de modéliser les principes

On parlera plutôt ici de modèles mathématiques, avec la présentation des diagrammes de HJULTRÖM et de YALIN-SHIELDS. Concernant ce dernier, les formules de calculs ont été détaillées. Des exemples de calculs permettant de déterminer le rayon hydraulique (R) ont été fournis dans l'Annexe 10.

d) Éléments réalistes (représentation du principe)

Afin d'illustrer les diagrammes de HJULTRÖM et de YALIN-SHIELDS, des exemples ont été fournis aux concepteurs.

PARTIE 4 : AVANTAGES ET LIMITES DE LA DÉMARCHE DANS UN CONTEXTE DE SERIOUS GAME

4.1 RAPPELS SUR LE CONTEXTE D'UN SERIOUS GAME

La virtualisation est une possibilité toute nouvelle de pouvoir recréer un fragment du monde et de s'y introduire. Les technologies actuelles et le talent des développeurs permettent cela. Les avantages sont nombreux, puisque la virtualisation va offrir la possibilité de vivre des expériences en s'affranchissant de certaines contraintes. Par exemple, dans le cas d'univers géographiquement lointains, le facteur « déplacement » ne sera plus un obstacle. De même, la capacité à s'immerger dans le passé devient possible.

Le Serious Game met le focus sur une notion essentielle pour l'être humain : apprendre. De par sa vocation pédagogique, le Serious Game se doit de recréer des univers passés ou présents aussi conformes que possible à l'idée que l'on a de réalité.

Dans le cadre de ce projet, restituer un univers souterrain et pouvoir y étudier des notions aussi particulières que les écoulements et les matériels, reste un challenge motivant, car ambitieux.

4.2 AVANTAGES DE LA DÉMARCHE

Notre démarche a consisté en la dissociation logique des différentes étapes du flux initialement prévu (voir Partie 3 consacrée aux objectifs opérationnels). L'avantage procuré ici est de pouvoir approcher chaque étape avec le plus de pertinence possible.

L'avantage est également lié au contexte d'étude. Nous parlons en effet de phénomènes qui dépassent la métrique humaine (échelles de temps et d'espace) et qui sont régis par des sous-événements aléatoires ou non encore expliqués par la connaissance moderne.

De fait, il est donc possible pour les concepteurs de profiter de ces approximations pour alléger leurs algorithmes, tout en restituant des phénomènes réalistes.

Par exemple, si les concepteurs décident d'inclure la formation d'un glacier dans leur gameplay (ou simplement dans une cinématique), ils auront la possibilité de reproduire le phénomène avec un niveau acceptable de précision, sans pour autant connaître tous les détails de la formation réelle du glacier.

4.3 LIMITES DE LA DÉMARCHE

Les limites d'une telle démarche sont le parfait corolaire des avantages décrits ci-avant. Certaines notions étant trop complexes à modéliser ou encore trop mal connues, elles nécessitent de faire des

choix non compromettants, qui lissent le niveau de difficulté du développement. Poussé à l'extrême, ce lissage peut nuire à la qualité du jeu et à sa pertinence pédagogique.

L'exemple de l'analyse systématique d'un matériel erratique, impliquant une étude dans des conditions de laboratoire, en est une illustration. Comment (et surtout faut-il ?) pousser le gameplay à un tel niveau de performance ? Une stratégie a été décidée afin de contourner cette difficulté (voir chapitre 3.3.1 « *Modalités de déplacement* »). Elle reste tout à fait acceptable, moyennant une condition incluse dans le procédural. Cette condition peut tout à fait être transparente pour le joueur et être compensée par une restitution parfaite des environnements.

4.4 RÉGULATIONS POSSIBLES

Nous revenons ici sur la stratégie appliquée au gameplay et décrite au chapitre 3.3.1 « *Modalités de déplacement* ».

Cette stratégie est née d'une difficulté relative à l'analyse systématique des matériaux erratiques. Une telle analyse nécessite la possibilité d'accéder à des conditions de laboratoire et de bénéficier de compétences en pétrographie.

D'autres stratégies ont été imaginées pour répondre à cette difficulté :

- A. Donner au joueur la possibilité d'étudier un matériel dans des conditions de laboratoire et d'accéder à des compétences en pétrographie (par le biais d'un ensemble d'outils intégrés).
 - i. Avantages de cette stratégie =>> Grande valeur ajoutée au gameplay et au jeu en général. Aspect pédagogique accru.
 - ii. Inconvénients de cette stratégie =>> Complexification du développement. Probabilité forte de plonger le joueur dans un univers étranger à l'univers de départ.
- B. Bâtir un gameplay où tous les matériels allochtones sont erratiques.
 - i. Avantages de cette stratégie =>> Simplification du développement.
 - ii. Inconvénients de cette stratégie =>> Probabilité forte de banaliser le jeu et d'en réduire l'intérêt pédagogique. L'univers souterrain est un contexte de découverte où toutes les questions ne trouvent pas forcément de réponses.
- C. Adopter la même stratégie que celle choisie au chapitre 3.3.1, mais laisser le procédural décider aléatoirement du caractère « erratique – non erratique » des matériels allochtones qu'il génère.
 - i. Avantages de cette stratégie =>> Bon compromis. Difficultés de développement réduites.

- ii. Inconvénients de cette stratégie =>> Risque pour le joueur d'être confronté trop souvent à des générations aléatoires non propices à la découverte de matériels erratiques.

CONCLUSION

Le jeu est naturellement associé à la notion de plaisir. Cette simple évidence a donné vie à la pédagogie via le jeu, permettant la transmission de connaissances par le biais d'une approche différente de celle des méthodes académiques.

A l'heure où l'informatique fait partie intégrante de la vie de chacun, la virtualisation des environnements se présente comme une suite logique aux incroyables progrès technologiques réalisés sur ces 30 dernières années.

Le Serious Game est un de ces concepts naissant, qui va sans nul doute profiter de l'avancée croissante des possibilités techniques de notre époque. Malgré une visibilité encore timide, il y a fort à parier que le Serious Game puisse remplacer un jour tout ou partie de l'enseignement traditionnel. Adjoint à l'avènement probable de l'Intelligence Artificielle, il promet des possibilités encore non dévoilées, mais à propos desquelles il conviendra cependant d'être vigilant.

Ce projet de Serious Game consacré aux écoulements souterrains et aux matériels des grottes, fait partie des applications envisageables dans un avenir proche. Il nécessitera, comme d'autres projets de ce type, que le concept de « Jeu Sérieux » pénètre davantage le quotidien et côtoie naturellement l'apprentissage conventionnel.

La rédaction de ce mémoire et l'étude de ce cas de figure m'ont donné la possibilité de me plonger dans l'univers fascinant des glaciers et de leur histoire. Ils m'ont permis également de renouer avec la conception informatique, mais dans une position qui ne m'était pas forcément habituelle.

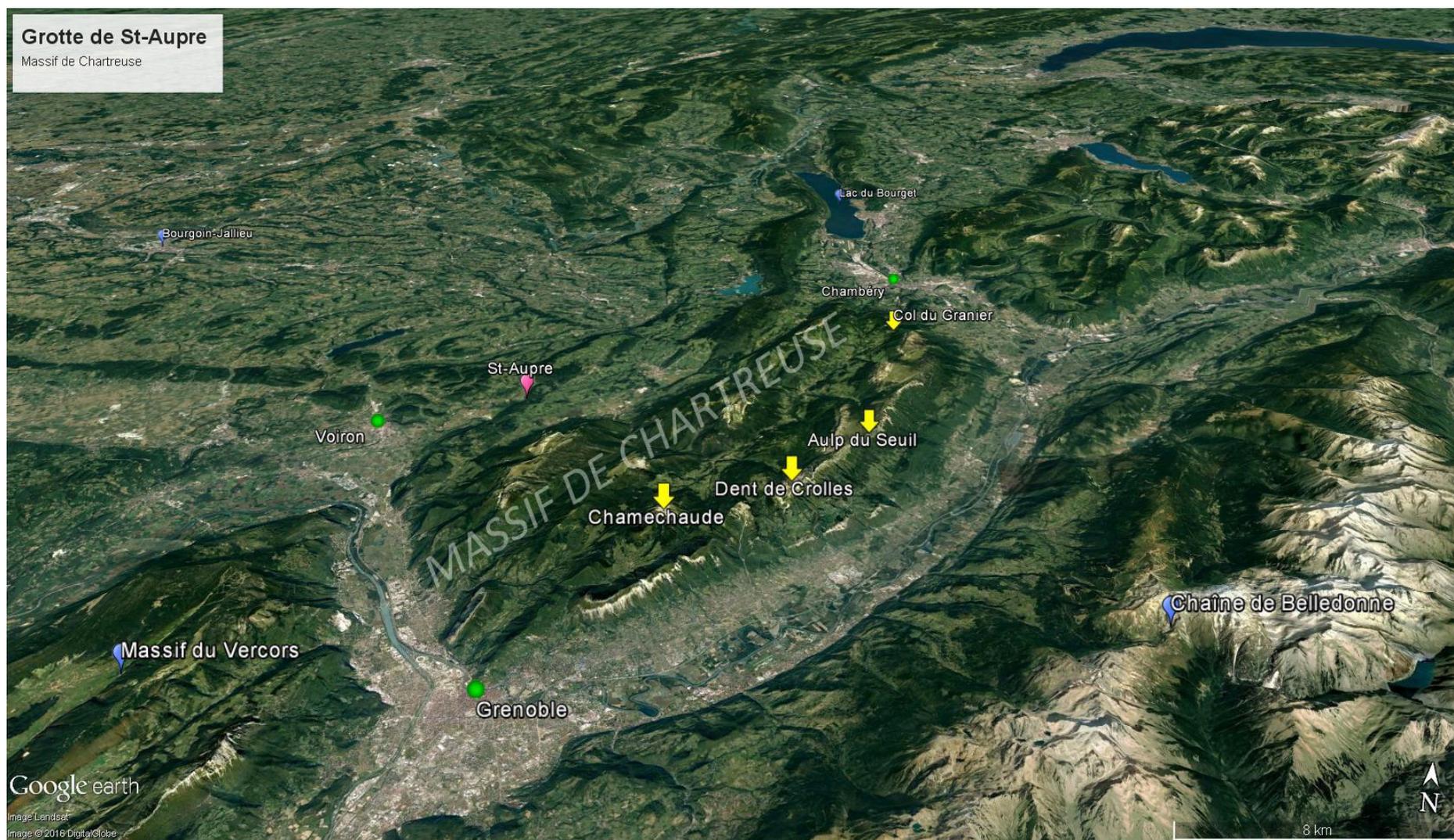
D'un point de vue plus général, ce sont les apports de la virtualisation appliquée au milieu souterrain, qui resteront pour moi le point de départ d'un possible investissement futur dans ce genre de domaines.

Ce travail demeurera donc pour moi une valeur ajoutée personnelle qui ne pourra que m'être utile pour la suite.

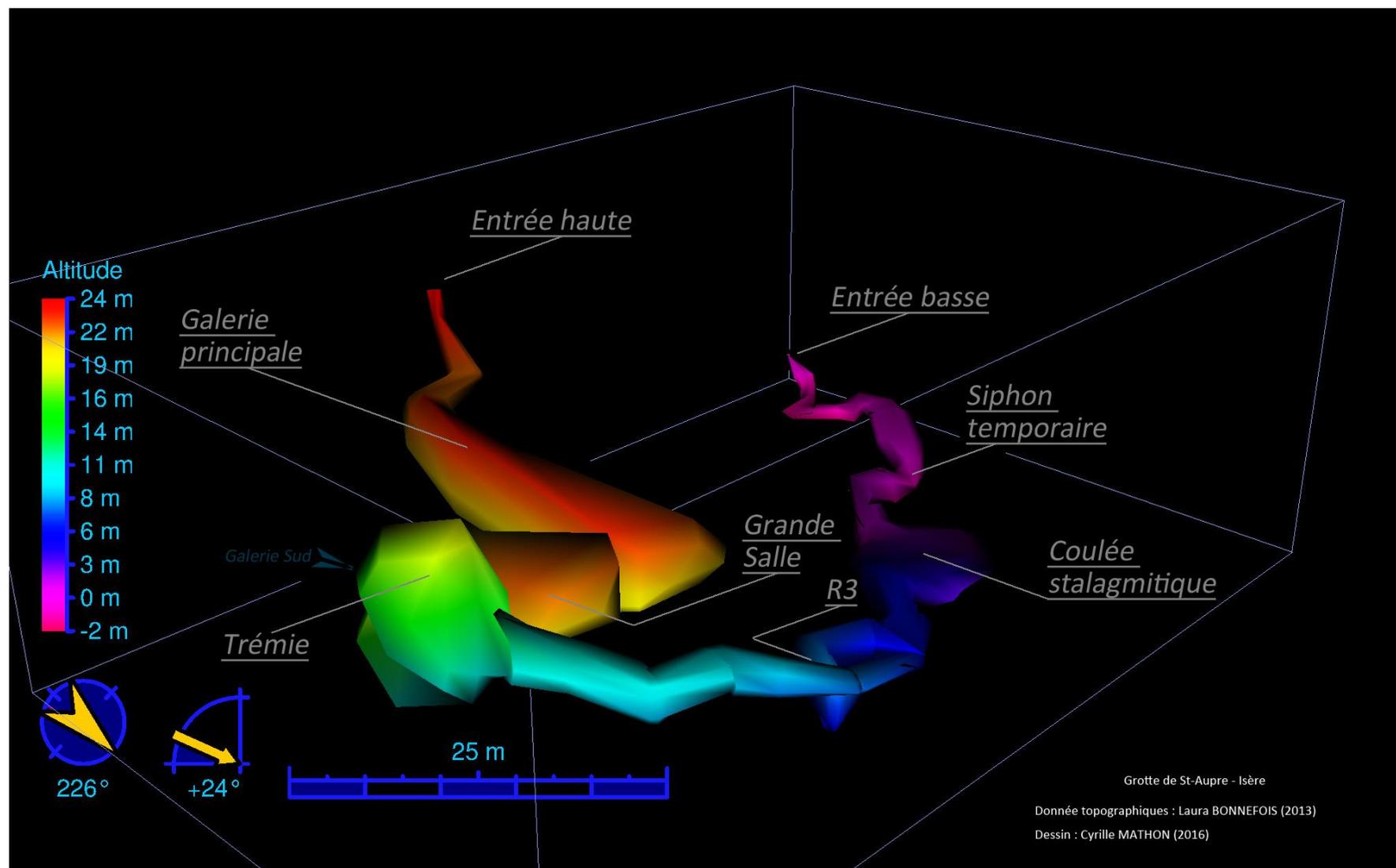
TABLE DES MATIERES DES ANNEXES

Annexe 1 : Localisation 3D de la Grotte de St-Aupre	p.34
Annexe 2 : Représentation 3D simplifiée de la Grotte de St-Aupre	p.35
Annexe 3 : Formation d'un glacier	p.36
Annexe 4 : Déplacement d'un glacier	p.37
Annexe 5 : Trajet du Glacier de l'Arc au WGM	p.38
Annexe 6 : Aspect du Glacier de l'Arc autour du massif de Chartreuse	p.39
Annexe 7 : Localisation actuelle du matériel allochtone – 1/3	p.40
Annexe 8 : Localisation actuelle du matériel allochtone – 2/3	p.41
Annexe 9 : Localisation actuelle du matériel allochtone – 3/3	p.42
Annexe 10 : Calcul du rayon hydraulique suivant la géométrie des canaux	p.43
Annexe 11 : Topographie générale de la Grotte de St-Aupre	p.44
Annexe 12 : Topographie documentée de la Grotte de St-Aupre	p.45

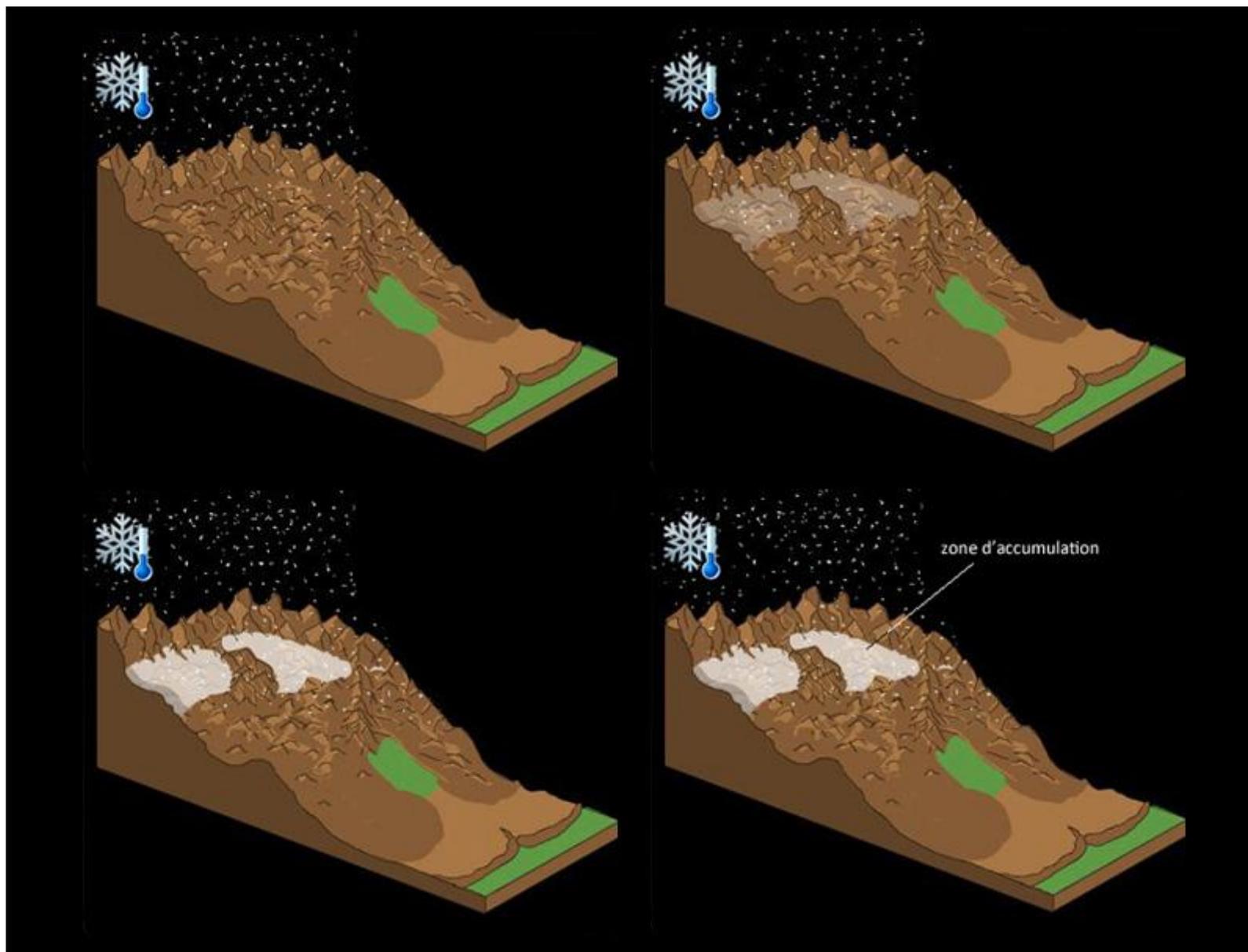
Annexe 1 : Localisation 3D de la Grotte de St-Aupre



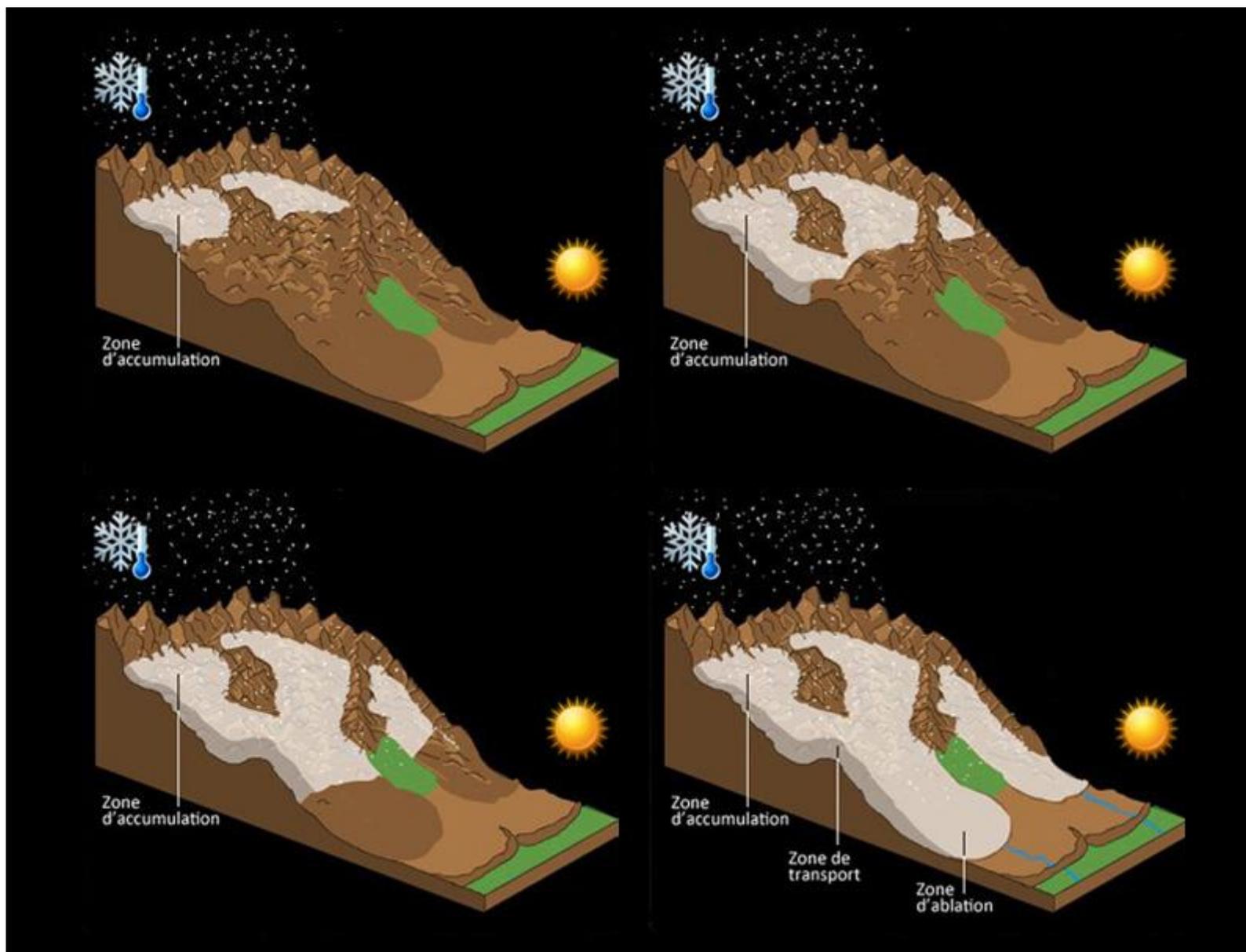
Annexe 2 : Représentation 3D simplifiée de la grotte de St-Aupre



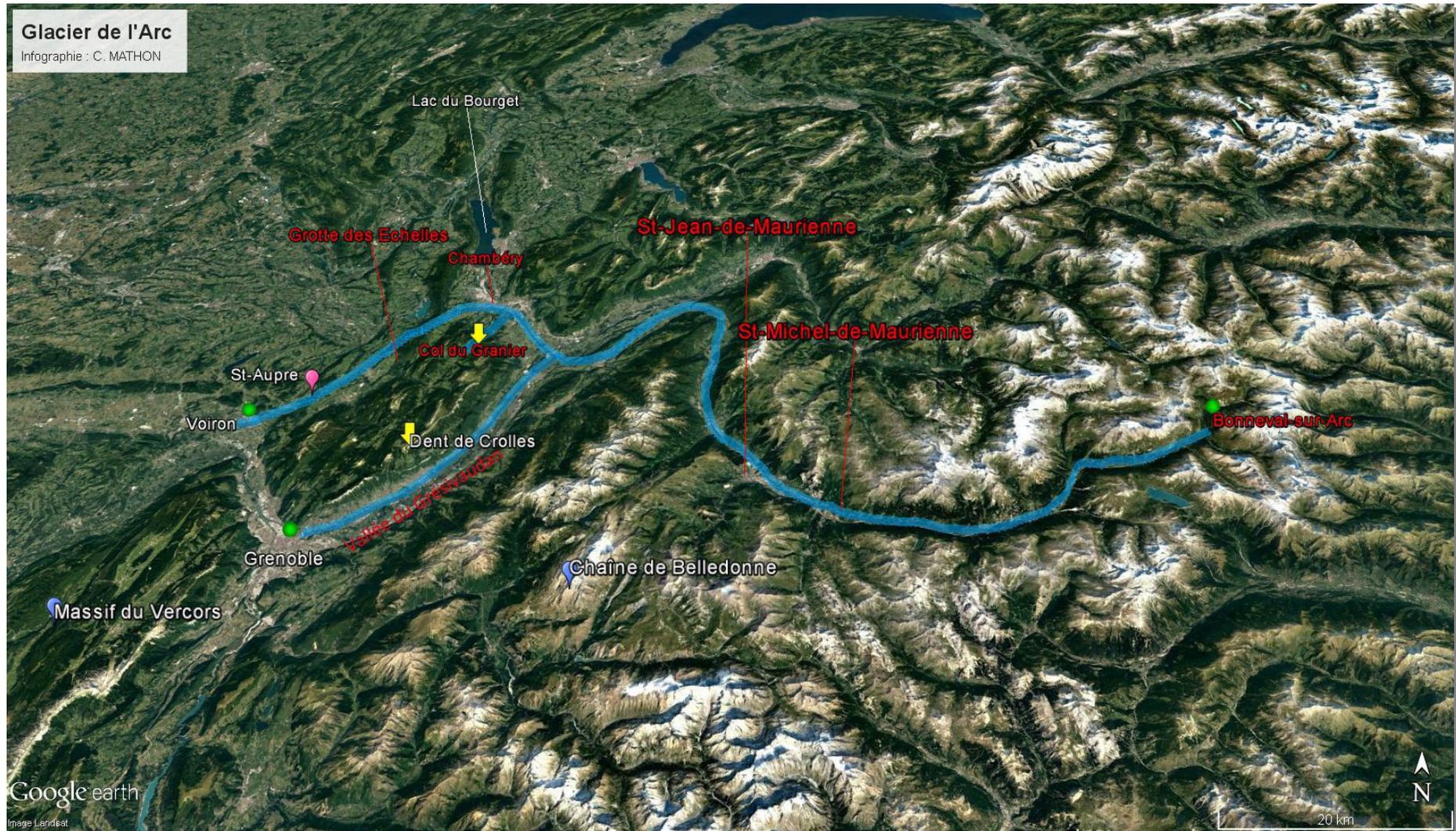
Annexe 3 : Formation d'un glacier (infographie : C. MATHON)



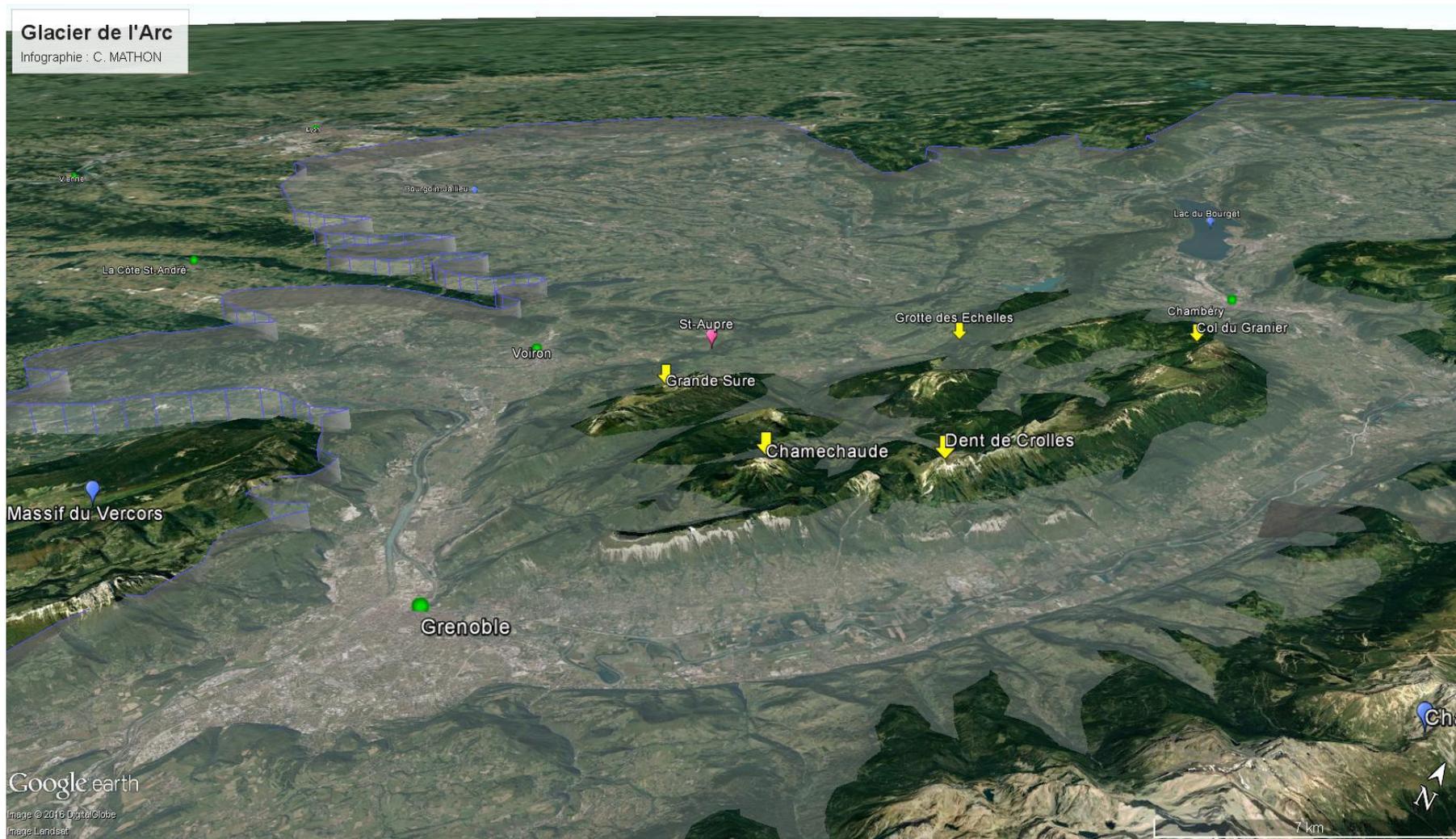
Annexe 4 : Déplacement d'un glacier (infographie : C. MATHON)



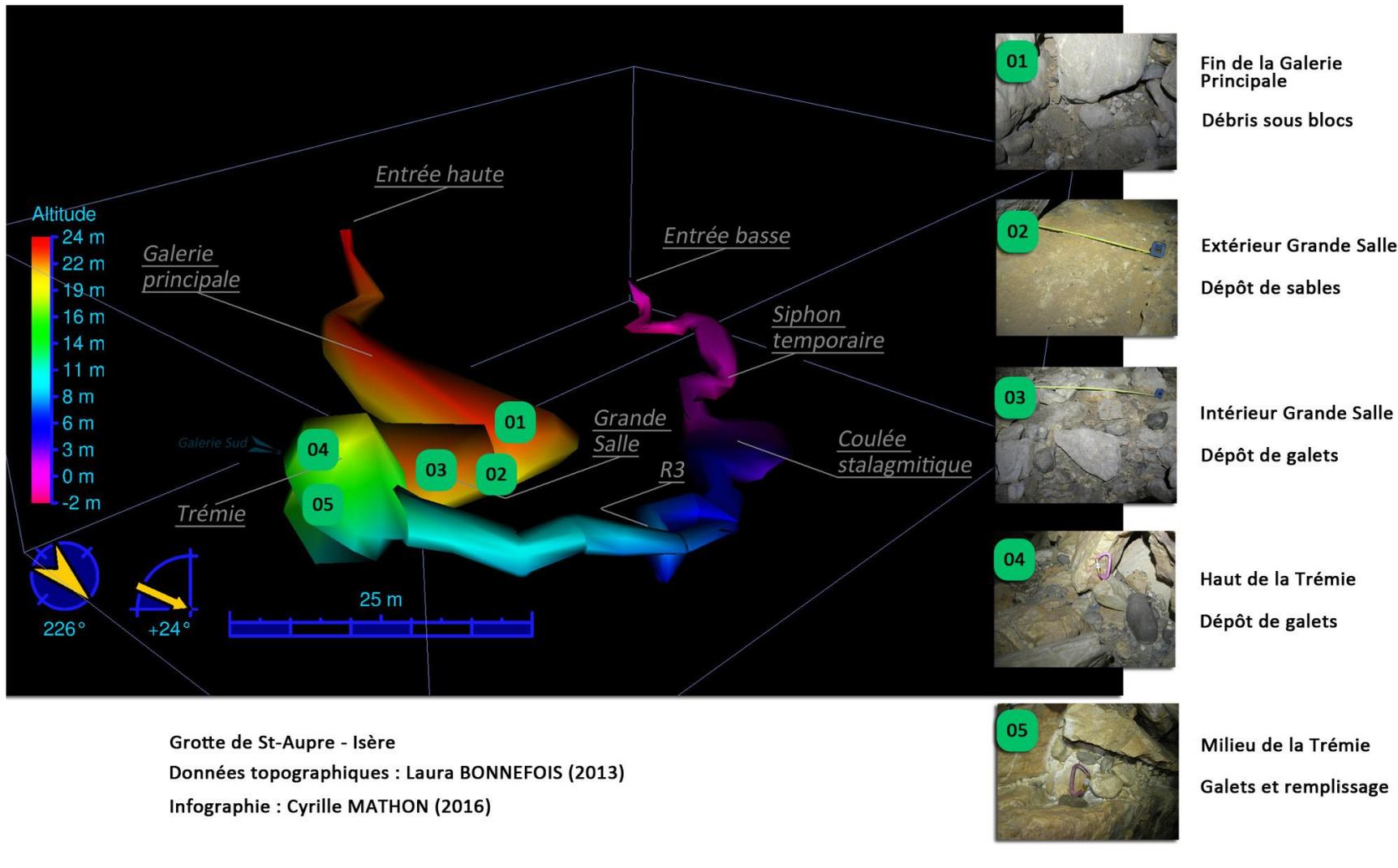
Annexe 5 : Trajet du Glacier de l'Arc au WGM (infographie : C. MATHON)



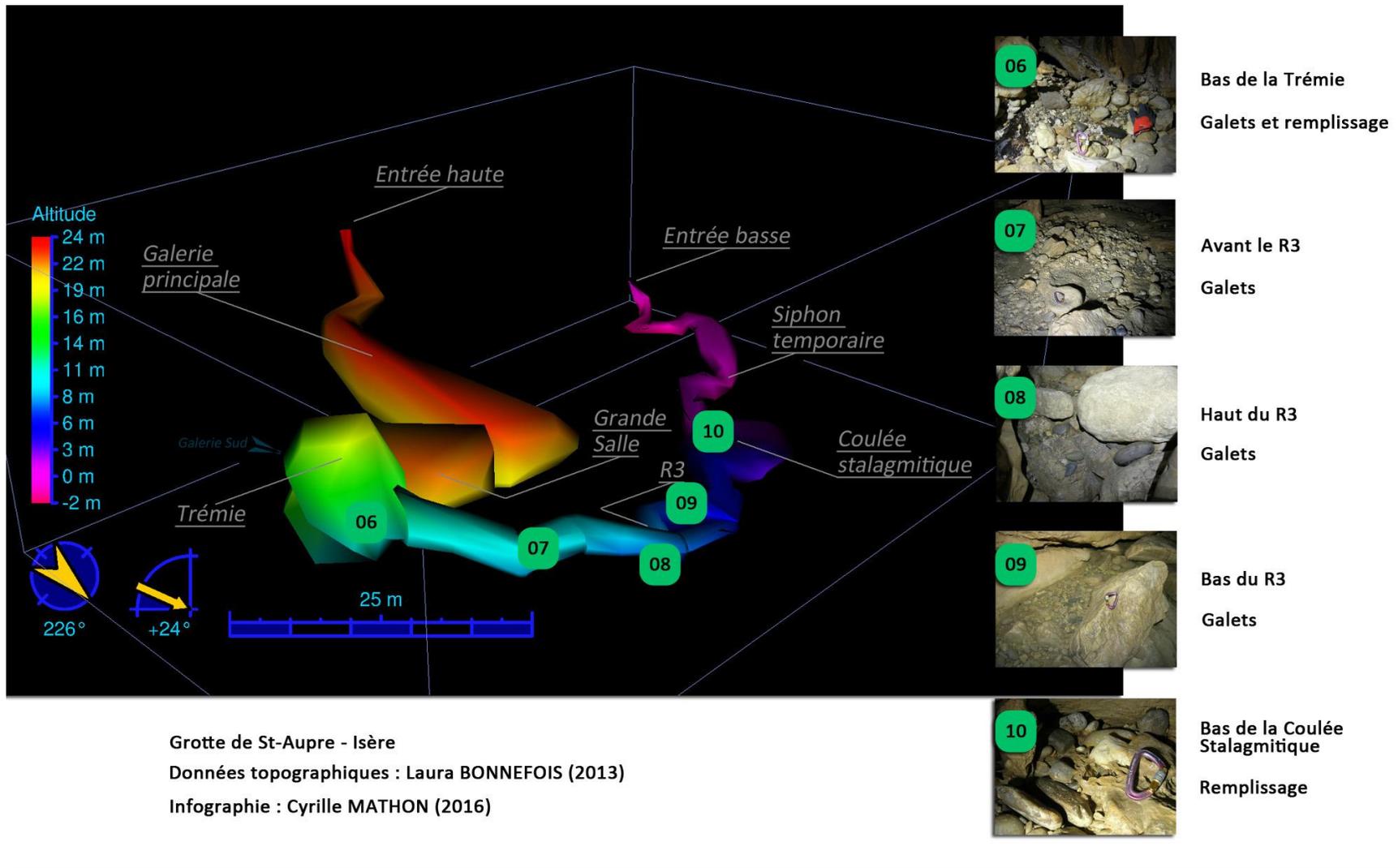
Annexe 6 : Aspect du Glacier de l'Arc autour du massif de Chartreuse (infographie : C. MATHON)



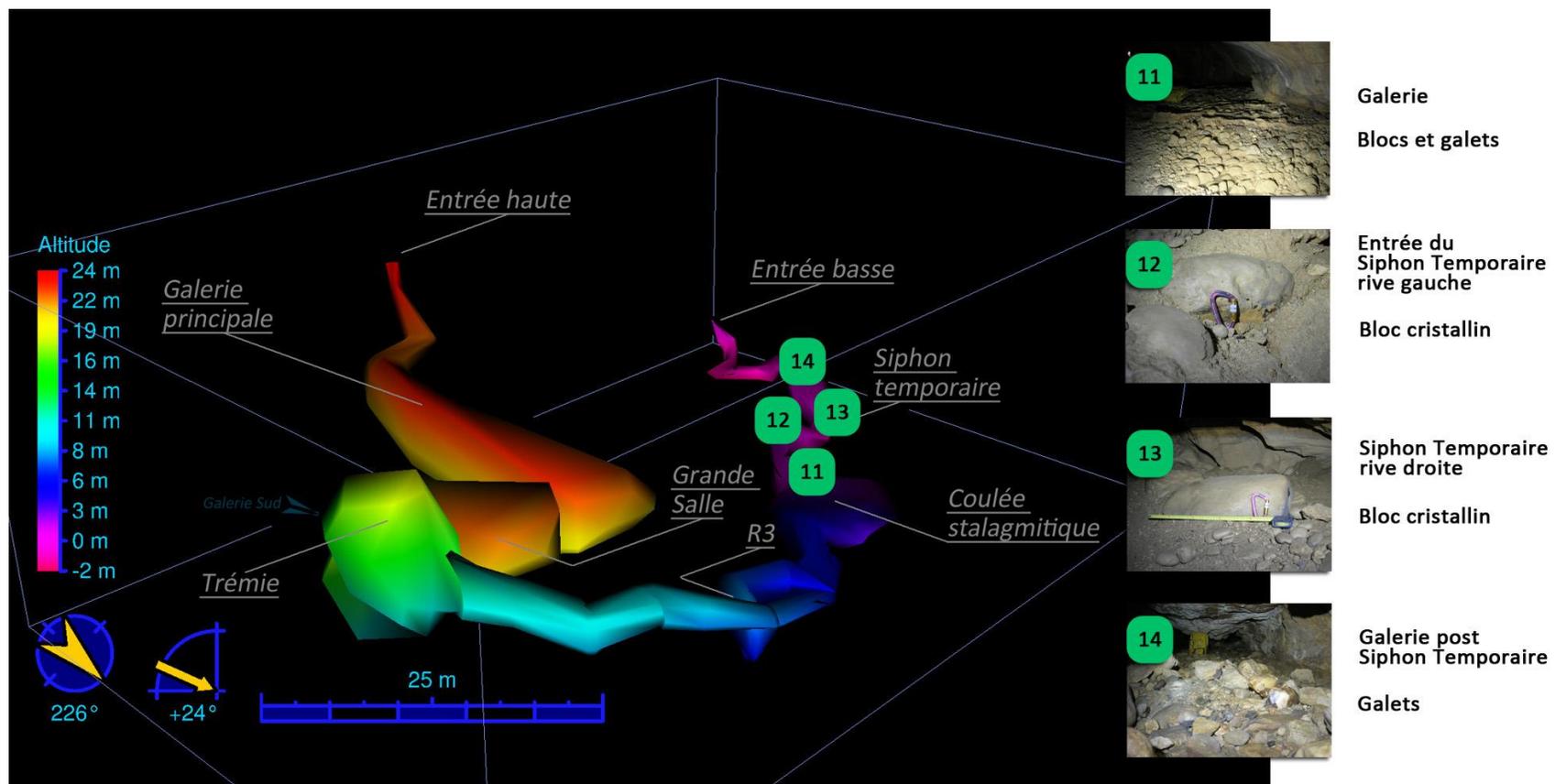
Annexe 7 : Localisation actuelle du matériel allochtone – 1/3 (infographie : C. MATHON)



Annexe 8 : Localisation actuelle du matériel allochtone – 2/3 (infographie : C. MATHON)

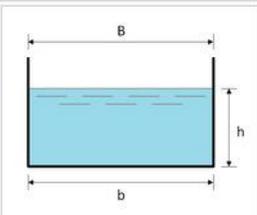
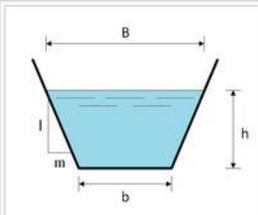
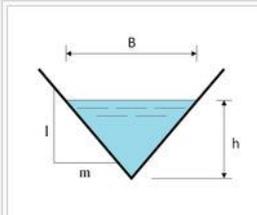
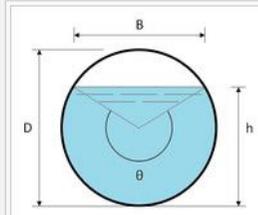
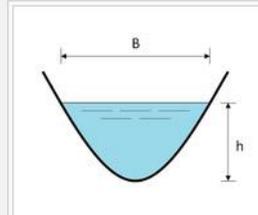


Annexe 9 : Localisation actuelle du matériel allochtone – 3/3 (infographie : C. MATHON)

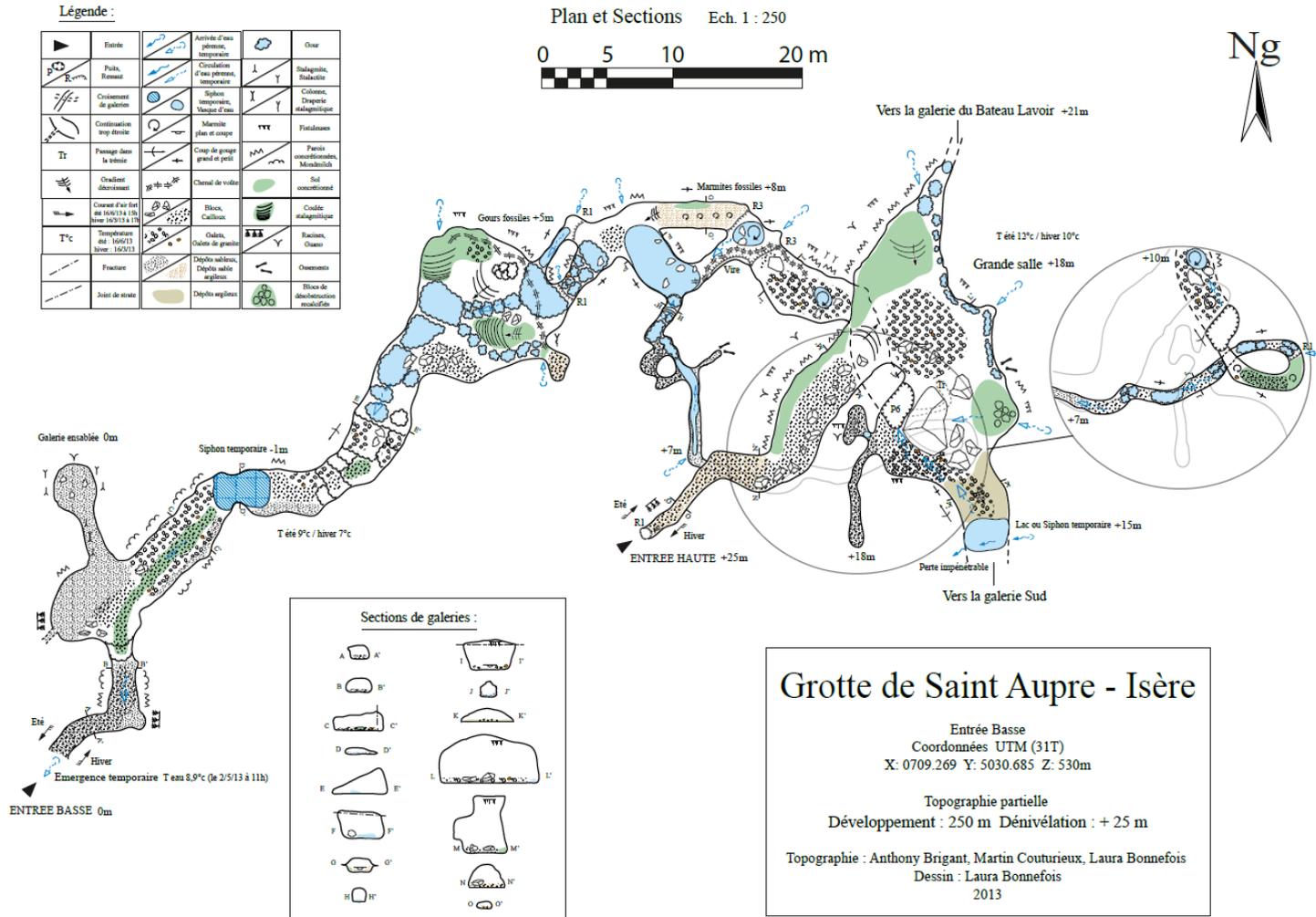


Grotte de St-Aupre - Isère
 Données topographiques : Laura BONNEFOIS (2013)
 Infographie : Cyrille MATHON (2016)

Annexe 10 : Calcul du rayon hydraulique suivant la géométrie des canaux (Source : Wikipedia.org)

					
	Rectangle	Trapèze	Triangle	Cercle	Parabole
Largeur, B	b	$b + 2 \times mh$	$2 \times mh$	$(\sin \frac{\theta}{2}) \cdot D$ ou $2\sqrt{h \cdot (D - h)}$	$\frac{3 S}{2 h}$
Surface, S	$b \times h$	$(b + mh) \cdot h$	$m \times h^2$	$\frac{1}{8}(\theta - \sin \theta) \cdot D^2$	$\frac{2}{3}Bh$
Périmètre mouillé, P	$b + 2h$	$b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + m^2}$	$2h \cdot \sqrt{1 + m^2}$	$\frac{1}{2}\theta \cdot D$	$B + \frac{8 h^2}{3 B}$
Rayon hydraulique, R_h	$\frac{bh}{b + 2h}$	$\frac{(b + mh) \cdot h}{b + 2h \cdot \sqrt{1 + m^2}}$	$\frac{mh}{2 \cdot \sqrt{1 + m^2}}$	$\frac{1}{4} \left[1 - \frac{\sin \theta}{\theta} \right] D$	$\frac{2B^2 h}{3B^2 + 8h^2}$

Annexe 12 : Topographie documentée de la Grotte de st-Aupre (Laura BONNEFOIS - 2013)



BIBLIOGRAPHIE

THÈSES, MÉMOIRES ET ÉTUDES

- Sylvain COUTTERAND. Étude géomorphologique des flux glaciaires dans les Alpes nord-occidentales au Pléistocène récent. Du maximum de la dernière glaciation aux premières étapes de la déglaciation. Géographie. Université de Savoie, 2010. Français. <tel-00517790v3>.
- Laura BONNEFOIS. Grotte de Saint-Aupre. Mémoire de cavité BE Spéléologie, 2013.
- Francis BAUDOIN. Hydrogéologie de l'avant-pays de Chartreuse (Isère) : hydrodynamique karstique et alluviale - Alpes françaises. Hydrologie. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1984. Français. <tel-00634023>
- A. BINI, P. TOGNINI et L. ZUCCOLI, Rapport entre karst et glaciers durant les glaciations dans les vallées préalpines du Sud des Alpes. KARSTOLOGIA N° 32 - 2/1998, 7-26
- Jean LOISIER, *Ph.D.* Étude sur l'apport des jeux sérieux pour la formation à distance au Canada Francophone. Réseau d'Enseignement Francophone à Distance du Canada (REFAD), 2015.

ÉLÉMENTS DE CARTOGRAPHIE

- Carte IGN 3333 OT Massif de la Chartreuse Nord 1/25 000 (2005).
- Carte IGN 3334 OT Massif de la Chartreuse Sud 1/25 000 (2005).
- Carte géologique de la France, Voiron 1/50 000 (1971) & notice explicative.
- Guide de lecture des cartes géologiques de la France, BRGM.

RESSOURCES INTERNET

- BRGM => <http://www.brgm.fr/>
- Geol-Alp => <http://www.geol-alp.com/>
- INFOTERRE => <http://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do>
- Les paysages glaciaires => <http://www.geoglaciaire.net/>
- Les paysages glaciaires => <http://www.obs.ujf-grenoble.fr/paysagesglaciaires.net>
- Planet Terre => <http://planet-terre.ens-lyon.fr/>
- Sciences de la vie et de la Terre => <http://www.svt.ac-versailles.fr/>
- Wikipedia => <https://fr.wikipedia.org/wiki/>