NOUVELLE DIMENSION POUR LA SÉMIOLOGIE GRAPHIQUE

La carte de la Bataille de Verdun prend du relief

par François Lecordix
Institut national de l'information géographique et forestière
SAI/IGNfab
73 avenue de Paris – 94160 Saint-Mandé
francois.lecordix@ign.fr

Initiée pour des besoins militaires et développée fortement pendant les deux guerres mondiales du XXe siècle, la cartographie en relief a connu un développement grand public après 1950 grâce à l'exploitation de la technique du thermoformage. Ce procédé est encore la solution la plus utilisée dans le monde pour produire des cartes en relief à un prix raisonnable, sous réserve de produire un nombre d'exemplaires suffisant pour amortir les coûts de réalisation de maquettes intermédiaires. Mais cette solution n'est pas utilisable pour une seule carte du fait des coûts de réalisation de la matrice préalable et ne peut répondre au besoin de réalisation à la demande qui constitue la tendance lourde de ces dernières années dans de nombreux domaines. Avec l'arrivée de techniques d'impression 3D de plus en plus performantes, notamment avec la solution du projet EIGER de la société Océ du groupe Canon pour de l'impression en relief couleur à base d'encre liquide, la cartographie en relief connaît une nouvelle opportunité qu'expérimente actuellement l'IGN sur différents types de carte et pour un service d'impression en relief à la demande. Après un rappel sur l'impression par thermoformage et les différentes techniques d'impression 3D, cette communication présente la nouvelle solution d'impression en relief et la préparation des données qu'elle nécessite pour pouvoir imprimer. Des exemples de production seront présentés, notamment la carte topographique de Belle-Île au 1 : 20 000 qui a reçu un prix international de l'ACI lors de la Conférence cartographique internationale à Rio en août 2015 et la carte thématique de la Bataille de Verdun présentée du 22 février au 31 mars 2016 à Paris pour l'exposition « Verdun - Champs-Élysées, un siècle pour la Paix 1916-2016 ». Au-delà des aspects pratiques de fabrication de ces cartes en relief, l'arrivée de ces possibilités techniques permet d'envisager une nouvelle variable visuelle pour la sémiologie de la carte, la hauteur. Cette nouvelle dimension permet de concevoir, pour certains objets cartographiques, de nouvelles représentations 3D, différentes de la 2D, qui seront présentées.

Introduction

Afin de mieux appréhender en 3D le territoire étudié, notamment lors d'un usage militaire, des plans reliefs ont été réalisés en Europe dès le XVe siècle sur les villes fortifiées (Warmoes, 1999). Ces fabrications se sont poursuivies tout au long des siècles suivants et intensifiées lors des deux conflits mondiaux du XXe siècle pour planifier des opérations militaires. Ainsi, l'Ordnance Survey a produit approximativement un millier de plans reliefs lors de la Première Guerre mondiale, avec une production intensive entre décembre 1916 et avril 1917 où, en moyenne, 36 plans reliefs étaient envoyés en France par semaine (Chasseaud, 1999). La Seconde Guerre mondiale augmenta encore le besoin de ces cartes en relief (Pearson, 2002). De nouvelles méthodes de production furent mises en place dans les deux camps adverses pour accélérer la production, notamment la méthode américaine du carton alvéolé permettant de construire plus rapidement les moules initiaux ou la méthode allemande de Wenschow (Reed, 1946). À la sortie de la Seconde Guerre mondiale, en s'inspirant de la solution de Wenschow, les Américains utilisèrent la feuille vinyle thermoplastique pour faire du thermoformage qui est encore la solution utilisée actuellement pour produire les cartes en relief dans le monde entier. En France, l'IGN poursuit la production de cartes en relief avec ce procédé.

Mais le développement de l'impression 3D depuis quelques années dans de nombreux secteurs d'activité a incité l'IGN à examiner de nouvelles solutions de production adaptées aux besoins de la cartographie, notamment dans un contexte de demande de fabrication de plus en plus personnalisée de la part des utilisateurs. Après un descriptif de la solution d'impression par thermoformage et des solutions d'impression 3D examinées, cette communication s'attardera sur la solution retenue à l'IGN pour répondre aux besoins

des utilisateurs et les réalisations obtenues depuis deux ans. Grâce à cette technologie, permettant de se libérer de certaines contraintes techniques, de nouvelles possibilités sémiologiques sont offertes au cartographe et ont été mises en œuvre sur la carte de la Bataille de Verdun. Cette carte en relief, réalisée à l'occasion du centenaire du lancement de cette bataille le 21 décembre 1916, permettra de souligner quelques nouveautés sémiologiques et d'imaginer les caractéristiques d'un service d'impression en relief à la demande.

Impression en relief par thermoformage

Inventée en 1947 par le Service cartographique de l'armée à Washington (Sutter *et al. 2006)*, la cartographie en relief par thermoformage passe par la réalisation préalable de différentes maquettes intermédiaires.

La première étape consiste à réaliser un moule du relief à partir des données géographiques disponibles. Ce moule, appelé « saumon » (fig. 1a), peut être réalisé par diverses techniques manuelles ou désormais numériques comme le fraisage à partir d'un Modèle numérique de terrain (MNT). Ce saumon peut être retravaillé afin de lisser les limites saillantes. Réalisé maintenant en résine friable, il ne peut pas être utilisé directement pour le thermoformage et nécessite de réaliser une maquette plus résistante.

À partir du saumon, un négatif est réalisé qui va fournir le relief en creux. Ce négatif va servir de base pour construire la matrice en résine résistante (*Epoxy*) qui reproduit le saumon initial (fig. 1b et 1c). Cette matrice va ensuite être poncée sur les zones maritimes éventuelles puis perforée (fig. 1d) en de multiples points pour faire des puits d'aspiration d'air qui vont permettre par la suite de plaquer les cartes imprimées sur la matrice grâce à l'aspiration. Le choix des trous d'aspiration de la matrice est crucial pour la bonne exécution ultérieure de la carte en relief : les trous sont percés principalement dans les fonds de vallée tous les 2 à 4 cm suivant le relief.

Une fois cette matrice réalisée (fig. 1e), il est alors possible de lancer la production en série des cartes par thermoformage. Pour cela, la carte à réaliser est imprimée en grand nombre en offset sur support PVC. Après le séchage de l'encre, la feuille en PVC est calée précisément sur la matrice (fig. 1f), chauffée par le dessus et aspirée par le bas via les puits d'aération pour plaquer la matrice avec une parfaite cohérence entre planimétrie et altimétrie (fig. 1g). Lors du refroidissement de la feuille en PVC, les formes du relief vont être conservées sur le document. Il reste à massicoter des bords de la feuille vinyle pour obtenir la carte en relief finalisée (fig. 1h).

Lors de l'achat de sa nouvelle presse offset en 2015, l'IGN a choisi un modèle lui permettant d'imprimer lui-même sur les feuilles de PVC. Ainsi, l'IGN peut continuer à produire de nouvelles cartes en relief soit sur des matrices déjà existantes, soit sur de nouvelles matrices créées spécifiquement si la zone cartographiée peut susciter une demande suffisante d'achat pour équilibrer les coûts de réalisation des différentes maquettes intermédiaires. Le seuil minimal de production d'une première édition de cartes en relief se situe autour de mille exemplaires.

Du fait des contraintes mécaniques, il est clair que cette solution de thermoformage ne permet pas de réaliser toute forme de relief. Par exemple, les cassures de pentes importantes ne peuvent pas être obtenues car cela briserait la feuille PVC. Ces contraintes techniques imposent de lisser préalablement les formes de relief sur le moule initial et de ne pas envisager certaines formes. Ces limitations vont donc contraindre la sémiologie graphique choisie pour la carte.

Impression 3D

Diverses solutions

L'impression 3D a connu un essor récent avec plusieurs technologies, accessibles désormais aux particuliers, permettant de répondre à divers usages. Après la réalisation d'une maquette 3D adaptée à la solution d'impression choisie, il existe différentes technologies d'impression 3D qui peuvent être classées en quatre catégories (Sculteo, 2015) :

- technologie par dépôt de matière en fusion (Fused Deposing Modeling) : ce procédé, le plus répandu pour le grand public, consiste en un dépôt de fil fondu à travers une buse pour imprimer par couches successives transversales 3D ;
- technologie par frittage sélectif par laser (Selective Laser Sintering) à base de poudre : ce procédé consiste en un dépôt de poudre fondue (métallique, plastique, alumide…) qui va s'agglomérer sous l'effet d'un laser pour construire l'objet par couches successives transversales 3D ;
- technologie de photopolymérisation de résine : un bain de résine est solidifié couche par couche sous l'effet d'un agent catalysant (laser UV, ampoule inactinique rouge, etc.) ;
- technologie par laminage de feuilles : ce procédé utilise des couches de papier adhésif qui sont ensuite collées successivement grâce un cylindre chauffé et sont ensuite découpées en fonction de la forme à construire.

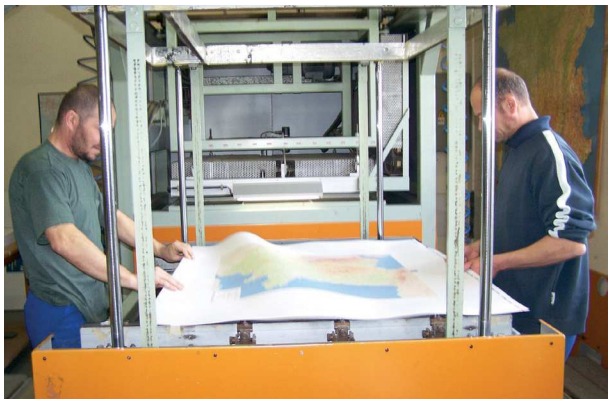
1a

1b

1c

1d

1e



1f

1g

1h

Figure 1 : Processus de thermoformage
1a. Saumon / 1b. Négatif du saumon / 1c. Matrice en résine résistante / 1d. Perforation de la matrice / 1e. Matrice finalisée / 1f. Calage de la feuille PVC sur la matrice / 1g. Thermoformage de la feuille de PVC / 1h. Massicotage de la carte thermoformée . Photographies : IGN/Département finition IGN-Sologne

Premiers essais d'impression 3D pour la cartographie

Pour répondre aux besoins de la cartographie en relief, l'IGN a décidé en 2014 d'expérimenter les solutions d'impression 3D existantes. La technologie par laminage de feuilles a été retenue du fait de sa possibilité d'introduire la couleur et des formats assez grands, nécessaires pour la cartographie. Un test sur un cas concret a été réalisé mi-2014 par Sébastien Brice sur le Piton de la Fournaise à La Réunion qui dispose d'une carte thermoformée existante dans le catalogue IGN (fig. 2) et qui permettait de comparer le résultat obtenu (fig. 3) avec la carte existante.

Le premier résultat obtenu avec cette technologie par laminage de feuilles s'avéra un peu décevant : si l'obtention de la couleur est possible, les couches superficielles sont très fragiles et pelucheuses, avec une altération des couleurs au moindre choc. Il est aussi impossible d'envisager, avec cette solution, des écritures indispensables en cartographie. Le poids reste élevé et le temps d'impression conséquent (38 h uniquement pour l'extrait). Il est à noter que les autres technologies souffrent aussi de limites irrémédiables pour la cartographie : format insuffisant (la taille de 1 m^2 minimum étant souhaitable pour assurer la production de notre catalogue de cartes), résolution d'impression insuffisante dans les solutions à base de poudre pour envisager d'imprimer des écritures, etc.

Nouvelle solution d'Océ

En juillet 2014, dans le cadre de son incubateur IGN*fab*, l'IGN a souhaité expérimenter une nouvelle technologie française d'impression en relief proposée par la société Océ du groupe Canon dans le cadre du projet EIGER.

Basée sur l'utilisation d'encre liquide qui vient s'appliquer sur divers supports (mousse, Dibond©, etc.), avec balayage en 2D, puis en 3D de toute la zone traitée, cette solution présente plusieurs caractéristiques très intéressantes pour la cartographie :

- grande finesse d'impression avec une résolution de 4 500 dpi horizontalement et 1 800 dpi verticalement ;
- grand format possible jusqu'à 3^{m2} ;
- respect colorimétrique avec possibilité d'exploiter des profils colorimétriques ;
- forte résistance aux chocs, à l'eau et aux UV du soleil ;
- élévation significative de 1,5 cm, même si cela peut être encore insuffisant pour certains reliefs et usages.

Afin de pouvoir comparer le résultat obtenu, il fut logiquement choisi de prendre la même zone d'expérimentation du Piton de la Fournaise pour expérimenter la solution proposée (fig. 4). Une expérience a été menée aussi pour imprimer sur cette même emprise une orthophoto à la place de la carte. La qualité du résultat obtenu (résolution, colorimétrique…) a permis de poursuivre sur de nouvelles zones et d'examiner un passage en production.

Préparation des données

À partir des bases de données IGN, la préparation des données nécessaires à l'impression se réalise assez aisément. L'intégration dans le processus d'impression d'Océ nécessite de fournir deux fichiers image de même emprise en format Tiff à 450 dpi : le premier fichier doit fournir les élévations en niveaux de gris, le deuxième l'image colorée cartographique à imprimer sur ces élévations.

Les données d'élévation sont facilement déduites du RGE ALTI ® par des modèles numériques de terrain (MNT) proposés par l'IGN. Mais il est possible de rajouter des éléments cartographiques spécifiques en surélévation, issus des sources de données disponibles : par exemple les bâtiments ou les routes issus de la base de données BDTOPO® de l'IGN, ou des éléments cartographiés sur la carte. À chacun de ces thèmes à imprimer en surélévation, il faudra spécifier une légende de surélévation de ces objets avec des niveaux de gris et les symboliser avec le même symbole (en terme d'emprise : largeur, forme, etc.) que celui utilisé sur la carte en couleur, puis combiner ces surélévations avec les élévations issues du MNT (fig. 5). Une échelle de correspondance est fixée entre les niveaux de gris de surélévation et les hauteurs d'impression.

Les données de la représentation cartographique colorée sont elles directement issues de la carte imprimée en 2D et aucun traitement n'est nécessaire. Il est possible d'intégrer un profil colorimétrique au jeu de données afin de retrouver les couleurs qui ont pu être obtenues sur la carte 2D.

Quelques réalisations

En suivant ce processus de préparation des données, différentes cartes ont été réalisées par IGN*fab,* en expérimentant par la pratique la création de légende en relief.

Après l'extrait de carte sur La Réunion qui exploitait le fonds de la Top100 au 1 :1 000 000 et uniquement le MNT sur cette zone, un deuxième extrait a été réalisé

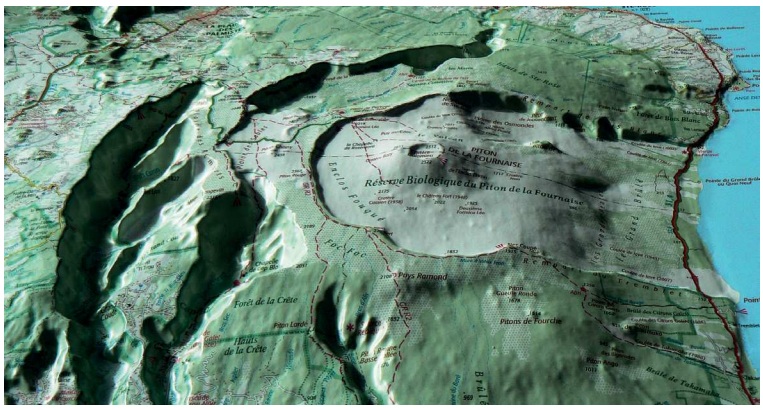


Figure 2 : Impression par thermoformage du Piton de la Fournaise sur l'Île de La Réunion

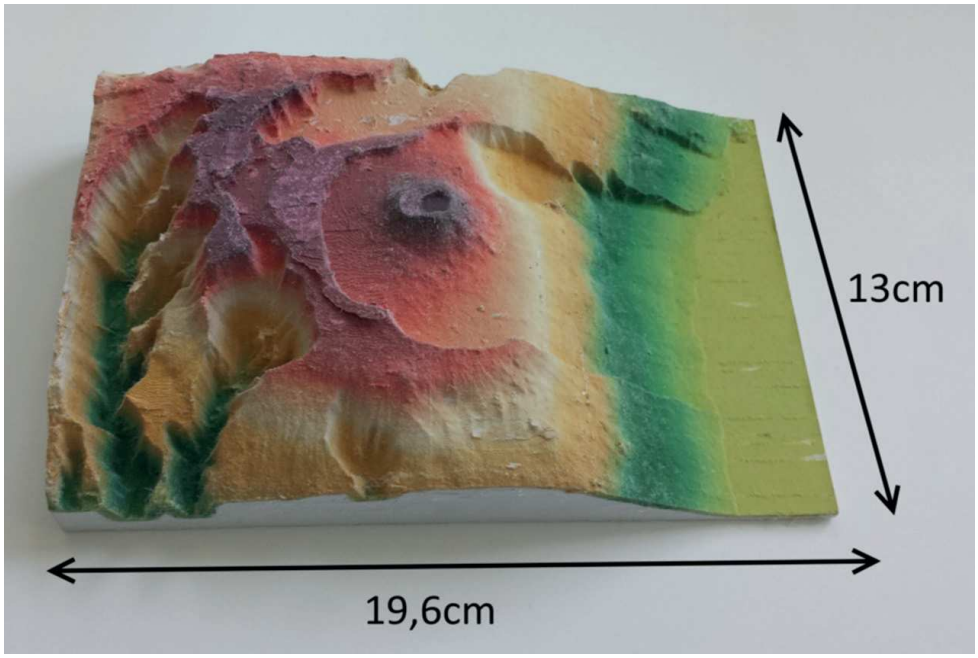


Figure 3 : Impression par laminage de feuilles du Piton de la Fournaise sur l'Île de La Réunion (2014)

Figure 4 : Impression par Océ du Piton de la Fournaise sur l'Île de La Réunion avec les données IGN utilisées pour la carte thermoformée

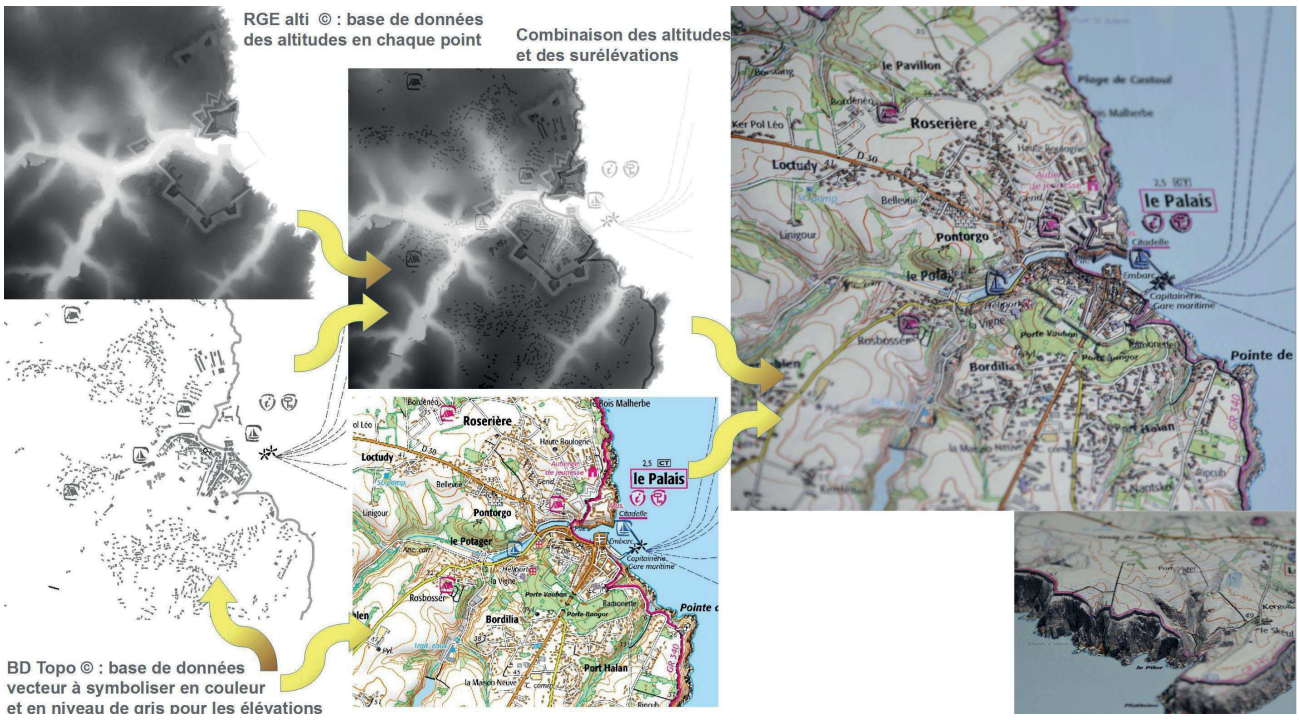


Figure 5 : Processus de préparation des données pour l'impression en relief

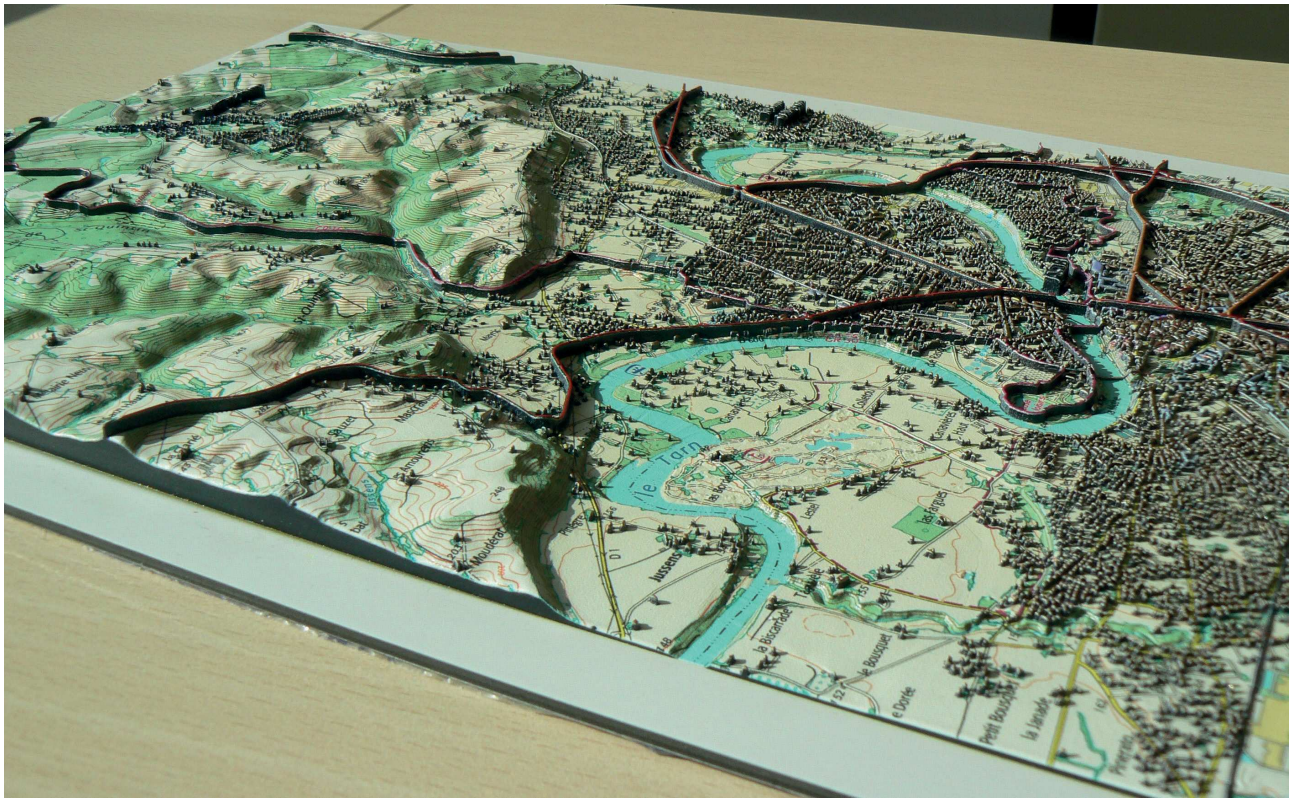


Figure 6 : Expérimentaion d'impression en relief avec surélévation d'objets topographiques sur la ville d'Albi

sur Albi au 1 :25 000 en exploitant la nouvelle carte série bleue Type 2010 de l'IGN. La cartographie Type 2010 permet de récupérer aisément en mode vecteur des éléments présents sur la carte finale en raster et de pouvoir les cartographier avec une légende de surélévation : bâtiments, routes, sentiers, chemins de fer (fig. 6). Cette carte de 24 cm par 36 cm fut commandée pour réaliser une enquête marketing lors du Salon des Maires 2014, afin d'obtenir des retours des utilisateurs potentiels. Elle a permis d'expérimenter une légende en relief sur différents types de représentations de la carte (points, lignes, surfaces, écritures) et d'identifier visuellement les écueils à éviter lors des spécifications de la légende en relief (hauteur trop élevée, surélévation d'écritures, etc.).

La troisième carte réalisée s'appuie sur les mêmes types de données que la carte d'Albi, la cartographie Type 2010 au 1 :25 000, mais est rédigée sur un territoire complet (l'île de Belle-Île) et avec un léger agrandissement (1 :20 000) par rapport à la carte au 1 :25 000 qui venait d'être publiée par l'IGN. Cette impression permet ainsi de vérifier la préservation par ce procédé de la colorimétrie avec l'utilisation d'un profil ICC. La carte, d'emprise 70 cm par 80 cm et d'élévation maximale de 1 cm, comporte quelques détails cartographiques surélevés : bâtiments, GR, symboles touristiques, barrages, liaisons maritimes (fig. 7). La carte de Belle-Île a été primée lors de l'exposition cartographique internationale de Rio en août 2015.

Nouvelle sémiologie

Carte de la Bataille de Verdun

À l'occasion du centenaire de la Bataille de Verdun et de l'exposition « Verdun – Champs-Élysées, un siècle pour la paix 1916-2016 », l'IGN a été sollicité pour installer sur les Champs-Élysées une carte au sol et une carte en relief de la bataille de Verdun. Ces cartes retracent la bataille qui s'est jouée pendant 300 jours sur quelques kilomètres seulement. Elles comportent les lignes de front, les mouvements des troupes, les monuments de mémoire, les tranchées, etc. Les deux cartes d'exposition sont accompagnées d'une carte papier en offset réalisée par l'IGN avec la Mission du Centenaire de la Première Guerre mondiale qui comporte en encart un agrandissement au 1 :35 000 du centre de cette bataille. Les données et la représentation sémiologique utilisées sur cet agrandissement ont constitué les éléments de base pour produire la carte en relief de 105 cm par 135 cm présentée sur les Champs-Élysées, avec des adaptations sémiologiques pour la cartographie en relief.

Mais la présence d'une troisième dimension pour la cartographie, avec des contraintes allégées pour la composante verticale par rapport à la technique du thermoformage, a permis d'imaginer de nouvelles représentations cartographiques qui vont être détaillées.

Libération de contraintes

Contrairement au thermoformage, la technique d'impression en relief retenue pour cette carte en un seul exemplaire permet d'envisager des ruptures de pente importantes pouvant aller jusqu'à des angles droits. Grâce à cette possibilité, une représentation en U des tranchées est envisageable en « creusant » directement le MNT – le creusement étant à réaliser dans les données numériques et ne correspond pas à la réalité de l'impression en relief qui se réalise par accumulation ascendante d'encre. Inversement, au lieu de creuser verticalement le MNT, il est possible d'ajouter verticalement de l'encre en certains endroits pour afficher une surélévation. Cette solution peut être retenue pour faire ressortir et mettre en valeur de l'information thématique, non seulement sur des objets linéaires mais aussi sur des objets ponctuels, offrant ainsi une véritable troisième dimension pour la sémiologie graphique, ce qui n'avait pu être prévu par Jacques Bertin dans son ouvrage de référence, Bertin (1967) ne travaillant que sur les deux dimensions planimétriques de la carte. Cette nouvelle possibilité de troisième dimension pour la cartographie statistique pourrait ainsi résoudre les problématiques pour l'implantation zonale d'une variable de taille, contournées par différentes solutions – dont les cartogrammes – mais qui ne sont pas toujours idéales pour l'efficacité de la lecture de la carte (de Blomac, 2008 ; Andrieu, 2014).

Nouvelle légende

Il est alors nécessaire de concevoir cette sémiologie graphique 3D, en adaptant la sémiologie 2D réalisée initialement pour la carte en offset (fig. 8) et en tenant compte de la variation du relief avec la représentation en 3D du terrain. Le travail a été confié à Philippe De-Valence, dessinateur cartographe au Service de la cartographie de l'IGN.

L'expérience de la carte d'Albi a rapidement conduit à ne pas utiliser de surélévation pour les écritures car cette solution peut nuire à la lisibilité des textes, surtout sur un relief du terrain important, sans apporter de gain majeur par ailleurs.

L'exploitation de la troisième dimension, en dehors de l'utilisation pour la représentation du relief, est alors réservée aux informations thématiques de la

Figure 7 : Impression en relief de l'île complète de Belle-Île

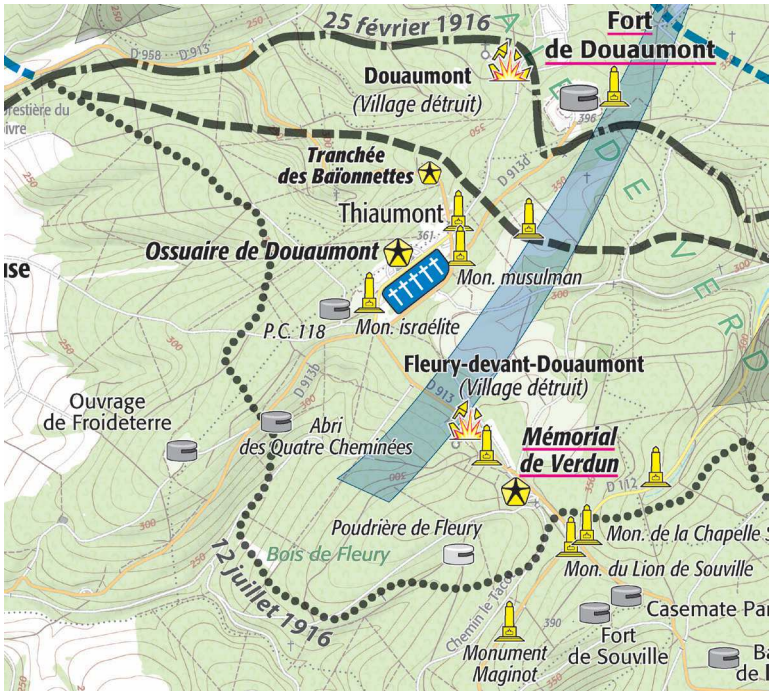


Figure 8 : Sémiologie graphique choisie pour la carte de Verdun en 2D

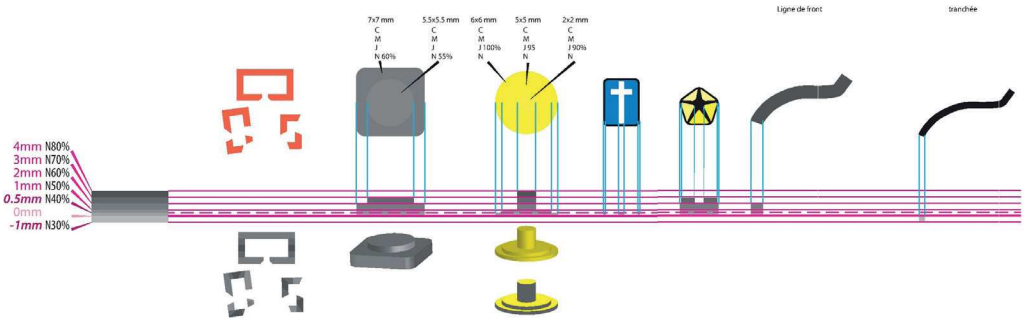


Figure 9 : Construction de la légende sémiologique de la carte en relief de Verdun

carte permettant de faire ressortir davantage le thème principal de la carte.

Pour les objets linéaires des lignes de front, le choix de la variable hauteur est retenu pour surélever ces éléments sans modifier significativement les autres éléments de représentation (style de trait, largeur, couleur). Pour les objets linéaires des tranchées, le creusement numérique du MNT apparaît de façon évidente comme la solution idéale pour représenter cette information, avec un très fort apport de cette représentation par rapport à une représentation en 2D.

Pour les symboles ponctuels (mémorial, vestige militaire, lieu de visite, village détruit), les formes en 2D sont choisies pour être les plus expressives possibles, notamment pour certains en projetant, sur le plan horizontal, la forme visible sur le plan vertical. Les nouvelles possibilités d'impression en relief permettent par conséquent de rebasculer sur le plan vertical la représentation plane de ces objets (mémorial, vestige militaire, lieu de visite) avec une éventuelle simplification des formes. Seule la représentation du village détruit, non continue sur le plan vertical dans le plan en 2D, ne peut pas être conservée par l'impression en relief et nécessite la conception d'un nouveau symbole.

La construction de légende pour tous ces objets nécessite aussi de définir toutes les hauteurs des symboles utilisés qui sont présentées dans la figure 9.

Impression de la carte

Une fois la légende 3D définie, la carte est rédigée en numérique, avec d'une part la partie colorimétrique (fig. 10a) et d'autre part la partie élévation cartographique en passant par des niveaux de gris (fig. 10b).

Les fichiers en raster obtenus ont été transférés à Océ pour l'impression avec une hauteur maximale fixée à 1,5 cm, limite actuelle de cette solution d'impression. Pour obtenir la carte finale, deux jours d'impression continue ont été nécessaires et 7 litres d'encre ont été utilisés, avec un poids final de la carte de 15 kg. Le résultat de cette impression est visible sur les figures 11 et 12.

Conclusion

En suivant les évolutions technologiques dans l'impression 3D, l'IGN expérimente les nouvelles solutions d'impression en relief qui pourraient permettre de faire évoluer l'offre de cartographie en relief. Avec la solution proposée par la société Océ dans le cadre du projet EIGER, plusieurs besoins indispensables pour la cartographie en relief (haute résolution, grandes dimensions, respect colorimétrique, etc.) sont en voie de résolution. L'IGN a pu expérimenter sur diverses cartes (topographiques, thématiques, etc.) les nouvelles possibilités permettant aussi de concevoir la sémiologie graphique adaptée.

Si les coûts d'impression restent encore élevés pour le grand public (en comparaison des prix des cartes thermoformées produites en multiples exemplaires) et si les hauteurs d'impression restent encore limitées (1,5 cm), cette solution devient très rentable pour la production d'exemplaire unique car elle évite toutes les opérations intermédiaires pour obtenir la matrice nécessaire au processus de thermoformage. Dans une optique d'impression à la demande qui constitue une tendance lourde de la cartographie papier actuelle, l'intérêt pour une solution d'impression en relief à la demande va sans doute émerger dans les années à venir comme le montrent les différentes enquêtes réalisées par l'IGN à partir des maquettes en relief déjà obtenues. L'IGN se prépare pour pouvoir répondre à ce besoin émergent.

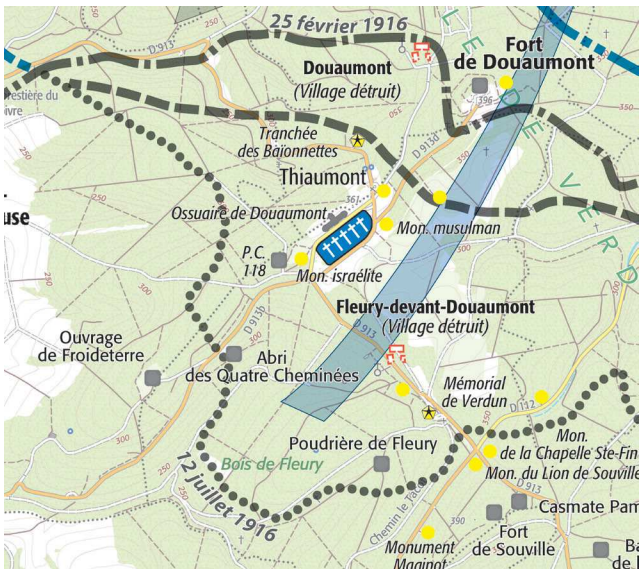


Figure 10a : *Cartographie pour l'impression en relief avec la représentation 2D en couleur*

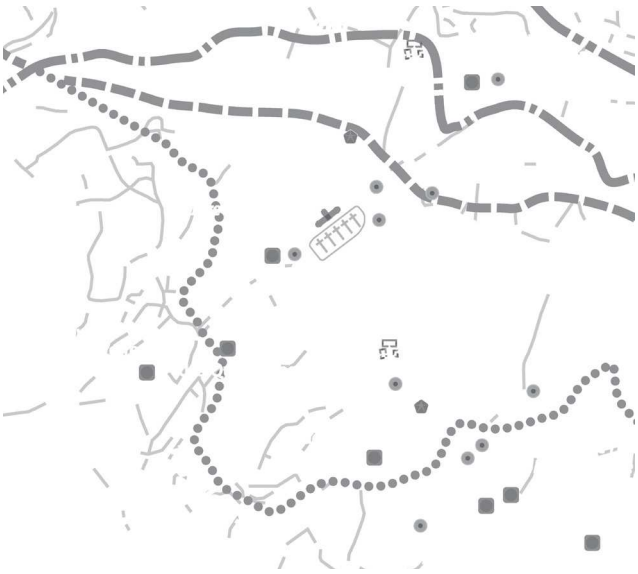


Figure 10b : *Cartographie pour l'impression en relief avec la représentation pour générer le relief avec des niveaux de gris*

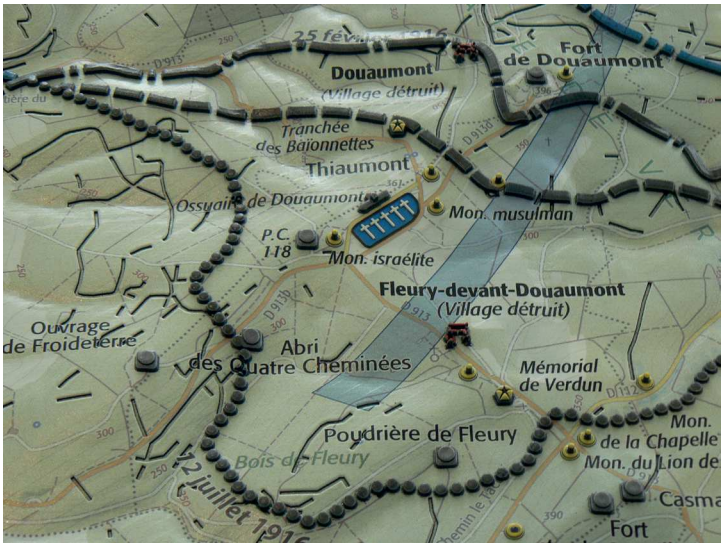


Figure 11 : Impression en relief, avec les tranchées creusées dans le MNT et les lignes de front, les monuments, les villages détruits représentés en surélévation

Figure 12 : Exposition de la carte en relief de la Bataille de Verdun sur les Champs-Élysées

Bibliographie

Andrieu D., 2014, « Les cartogrammes, une séquence d'enseignement de la sémiologie à la géographie », *Cartes & Géomatique*, n° 222.

Bertin J., 1967, *Sémiologie graphique*, Paris, Gauthiers-Villars.

Blomac F. de, 2008, « Peut-on encore parler de sémiologie graphique ? », *SIG La Lettre*, n° 93, p. 4-8.

Chasseaud P., 1999, *Artillery's astrologers. A history of British survey and mapping on the Western Front 1914-1918*, Lewes, UK Mapbooks.

Pearson A.W., 2002, « Allied Military Model Making during World War II », *Cartography and Geographic Information Science*, volume 29, issue 3.

Reed H.P., 1946, « The development of the terrain model in the war », *Geographical Review*, volume 36, p. 632-652.

Sculteo, 2015, *Techniques, technologies et procédés d'impression 3D*. En ligne : http://www.sculpteo.com/fr/impression-3d/technologies-dimpression-3d/

Sutter F., Räber S., Jenny B., 2006-2016, http://www.terrainmodels.com/index.html

Warmoes I., 1999, *Musée des plans-reliefs. Historic models of fortified towns*. Paris, Caisse nationale des Monuments historiques et des Sites, Éd. du Patrimoine.