

# L'impression en relief à la demande prend de la hauteur

■ François LECORDIX

*En suivant les évolutions technologiques de l'impression 3D, l'IGN a expérimenté en 2015 une solution d'impression en relief par jet d'encre, proposée par la société Océ. Le premier résultat a été présenté lors de la Conférence cartographique internationale de Rio de Janeiro en 2015, avec la carte de Belle-Île. La technologie proposée répondait à plusieurs besoins essentiels pour la cartographie en relief : haute résolution d'impression, grand format, respect colorimétrique... Mais elle se heurtait toutefois à deux problèmes : des coûts d'impression encore élevés pour le grand public (par rapport aux prix des cartes thermoformées produites en plusieurs copies) et des hauteurs d'impression encore limitées (inférieures à 2-3 cm). En 2022, l'IGN a proposé une solution innovante pour pallier le problème de limitation des hauteurs d'impression, sans augmenter les coûts de production. La nouvelle solution combine la technologie précédente d'impression jet d'encre en relief, avec la technologie Stratoconception® existant dans le domaine de l'impression 3D. La solution est présentée en détail dans cet article avec un exemple de résultat.*

## ■ MOTS-CLÉS

Carte en relief,  
impression 3D,  
Stratoconception®

## Introduction

Lors de la Seconde Guerre mondiale, le besoin de cartes en relief augmenta dans les deux camps adverses qui inventèrent de nouveaux processus 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 concevoir le thermoformage qui est encore la solution utilisée actuellement pour produire les cartes en relief dans le monde entier.

Ainsi, en France, l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) poursuit encore la production de cartes en relief avec ce procédé en imprimant sur les feuilles de PVC et en exploitant des matrices créées spécifiquement, si la zone cartographiée peut susciter une demande suffisante d'achat afin d'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.

Pourtant, des demandes existent pour obtenir des cartes en relief en exemplaire unique en n'importe quel point du territoire national. Ce besoin est confirmé aussi sur le plan mondial par la solution de fourniture de modèles numériques de terrain prêts à l'impression proposée, par exemple, par Terrain2STL<sup>1</sup> ou l'application web TouchTerrain qui a enregistré en moyenne 38 demandes par jour entre juillet 2019 et janvier 2021 (Harding, 2021) pour des impressions en relief. Cependant, suivant les illustrations proposées dans l'article, les impressions en relief réalisées ne sont qu'en monochrome et l'utilisateur doit, soit coloriser à la main son impression 3D, soit s'accompagner d'une cartographie 2D couleur pour combiner visuellement le relief et la cartographie papier.

<sup>1</sup> <https://jthatch.com/Terrain2STL/> ou [https://blog.prusa3d.com/fr/comment-imprimer-des-cartes-des-terrains-et-des-paysages-avec-une-imprimante-3d\\_29117/](https://blog.prusa3d.com/fr/comment-imprimer-des-cartes-des-terrains-et-des-paysages-avec-une-imprimante-3d_29117/)

Si le besoin d'impression 3D à la demande existe, les solutions pour y répondre sont, soit encore impossibles pour de grands formats, soit, pour des petits formats, de qualité médiocre ou de coûts beaucoup trop importants pour donner la réponse attendue.

Depuis 2014, l'IGN réalise une veille technique sur les solutions existantes pour envisager un service d'impression en relief couleur pour la cartographie à la demande, sans passer par un processus de thermoformage trop onéreux. Une première innovation technologique française a été présentée à l'ICC (*International Cartographic Conference*) 2015 à Rio de Janeiro pour obtenir des cartes en relief couleur avec cependant une limitation en hauteur. En s'appuyant toujours sur cette technologie d'impression couleur en relief, l'IGN propose dans cet article une solution innovante permettant de contourner cette limitation de hauteur et fournit les premiers résultats d'expérimentation.

## L'existant pour la cartographie en relief

### ■ Le thermoformage

Conçue 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 de trois maquettes intermédiaires :

- un saumon, moule du relief obtenu à partir des données géographiques. Ce saumon peut être retravaillé afin de lisser les limites saillantes. Il ne peut pas être utilisé directement pour le thermoformage, car il n'est pas réalisé en matière assez résistante pour le thermoformage,
- un négatif du saumon précédent qui va fournir le relief en creux,
- la matrice finale, obtenue du négatif précédent en coulant une résine résistante (Epoxy) qui reproduit le saumon



initial. Cette matrice va ensuite être perforée 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.

Une fois cette matrice réalisée, il est alors possible de lancer la production en série des cartes par thermoformage. Pour cela, la carte est imprimée sur support PVC, soit en grand nombre par offset, soit en quelques exemplaires via une presse numérique. Après le séchage de l'encre, la feuille en PVC est calée précisément sur la matrice, 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. Lors du refroidissement de la feuille en PVC, les formes du relief vont être conservées sur le document.

Du fait des contraintes mécaniques, toute forme de relief n'est pas possible par thermoformage. Par exemple, les cassures de pentes importantes ne sont pas réalisables, 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.

Il est à noter que ce procédé est associé au milieu professionnel de l'imprimerie et que l'on part d'une impression 2D qui va être déformée en une représentation qui va plutôt être qualifiée de 2,5 D (surface 2D déformée en 3D) plutôt que 3D.

## ■ La fabrication additive du monde de l'industrie

La fabrication additive a connu un fort essor ces dernières décennies avec plusieurs technologies développées, certaines accessibles désormais aux particuliers, et permettant de répondre à divers usages. Après la réalisation d'une maquette numérique 3D adaptée à la solution d'impression choisie, il existe différentes technologies de réalisation présentées par Barlier (2020) :

- polymérisation d'une résine sous l'action d'un laser : un bain de résine est solidifié, couche par couche, sous l'effet d'un agent catalysant (laser UV, ampoule inactinique rouge, etc.) ;
- projection de gouttes de matériau (résine photopolymérisable, cire fondue...)

- projection d'un liant sur un substrat de type poudre. Cette famille regroupe tous les procédés qui appliquent le procédé de base connu sous le nom d'impression 3D. Ils permettent d'imprimer avec différentes couleurs ;
- solidification de la poudre sous l'action d'une source d'énergie de moyenne à forte puissance (laser ou faisceau d'électrons) ;
- projection de poudre (ou fusion de fil) dans un flux d'énergie (laser ou plasma). Ici sont regroupés tous les procédés réalisant des objets 3D par dépôt de matière fondue. Ils permettent la fusion de nombreux matériaux métalliques comme les aciers inox, les alliages de titane, à partir de plusieurs variantes de la buse de dépôt, le composant principal ;
- fusion de fil au travers d'une buse chauffante. 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. Cette technologie permet la mise en œuvre de matériaux thermoplastiques, de cire, mais également de matériaux plus originaux comme le chocolat ;
- assemblage de couches à partir de feuilles ou de plaques découpées. Cette catégorie regroupe les procédés à base de matériaux disponibles en feuilles. Ces feuilles peuvent se présenter de manière continue, par exemple sous la forme de rouleaux, mais également de manière discontinue, par exemple sous la forme de plaques de différents matériaux, du bois jusqu'à l'acier (Stratoconception®). Ces techniques additives procèdent par découpage et assemblage ou bien assemblage puis découpage de ces feuilles.

La fabrication additive hybride consiste à combiner au moins deux de ces procédés. L'objectif de ces combinaisons est de tirer profit des différentes performances des procédés ainsi que de leur complémentarité.

## ■ Les limites pour la cartographie en relief des solutions de fabrication additive existantes

Les différentes solutions de fabrication additives de l'industrie listées précédemment présentent des limites trop importantes pour satisfaire aux

besoins de la cartographie en relief : format trop petit (la taille de 1 m<sup>2</sup> minimum étant souhaitable pour assurer la production des cartes du catalogue de l'IGN), résolution d'impression trop faible (400 dpi minimum nécessaire) dans les solutions à base de poudre pour envisager imprimer des écritures, diversité colorimétrique faible, robustesse et qualité insuffisantes pour les solutions par assemblages de feuilles colorées...

À ce jour, aucune solution du domaine de la fabrication additive ne permet de répondre aux besoins de la production de cartes en relief, bien que la demande existe de la part du grand public.

## ■ Le premier pas significatif pour l'impression de la cartographie en relief

En 2015, à Rio de Janeiro, lors de l'ICC, l'IGN présentait la première carte en relief de grande taille obtenue en impression en relief avec la carte de Belle-Île, primée par l'ICA (*International Cartographic Association*). Proposée par la société Océ, filiale du groupe Canon, l'impression en relief ou 2,5D reposait sur une solution d'impression jet d'encre avec la possibilité de mettre de l'épaisseur dans l'encre pour réaliser le relief. Cette solution d'impression proposée par la société Océ a été abandonnée en 2016, mais reprise en 2020 par la startup Mihaly, créée par les concepteurs français de la technologie travaillant alors pour Océ.

Cette solution technique a été détaillée lors du colloque "Temps, Art & Cartographie" des 16-18 mars 2016 à l'Université de Strasbourg (France) en présentant la carte en relief de grand format (105 cm par 135 cm) de la Bataille de Verdun (Lecordix, 2016). Une sémiologie graphique adaptée à la représentation en relief a pu alors être expérimentée suivant un processus de fabrication présenté en *figure 1*.

Un modèle numérique de surface cartographique est calculé en combinant, d'une part, le relief fourni par le MNT (modèle numérique de terrain) et, d'autre part, les hauteurs éventuelles de surélévation que l'on fixe pour différents objets de la carte (sentiers, habitations, points touristiques...) suivant des choix sémiologiques, équivalents à une

## Fabrication : Préparation des données numériques à combiner, relief et carte



Figure 1. Processus de préparation des fichiers pour l'impression en relief.

légende du relief. En combinant avec la carte raster colorisée du même territoire, l'imprimante va exploiter les deux fichiers et déposer en balayant toute la surface une encre grise qui va s'empiler pour créer très précisément le relief du lieu, et finaliser le dessus du relief avec les encres CMJN (cyan, magenta, jaune, noir) du traceur pour obtenir la carte en relief en couleur.

La technologie proposée résout plusieurs besoins indispensables pour la cartographie en relief : haute résolution d'impression, grandes dimensions, respect des teintes colorimétriques... Par contre, elle se heurte à deux problèmes : les coûts d'impression encore élevés pour le grand public (en comparaison des prix des cartes thermoformées produites en multiples exemplaires) et surtout les hauteurs d'impression encore limitées (moins de 2 à 3 cm).

### La Stratoconception® cartographique

#### ■ Nouveau procédé

En 2022, l'IGN a proposé une solution innovante permettant de contourner le problème de la limitation des hauteurs

d'impression, sans augmenter pour autant les coûts de production.

Cette solution a été inspirée par la tête de chien en carton exposée par la société CIRTES dans des salons (figure 2) et réalisée par l'application brevetée dérivée Pack&Strat®. Cette application est dédiée à l'emballage rapide numérique 3D et utilise le procédé breveté de Stratoconception® par microfraisage rapide pour les bois, les mousses PE et PU et le PS. Le carton et les mousses



Figure 2. Stratoconception® de la société CIRTES pour réaliser une tête de chien en 3D avec des couches de carton.

peuvent être découpés par cutter. Cette tête de chien, qui pouvait faire penser à la notion de courbes de niveau, montre qu'il est possible de réaliser des formes sans limitation de hauteur, inspirant l'innovation décrite par la suite.

Le procédé repose sur une hybridation de la technologie précédente d'impression en relief par jet d'encre existant dans le monde des traceurs numériques avec la technologie de la Stratoconception® existant dans le monde de l'impression 3D que nous allons détailler.

#### ■ La Stratoconception® développée par CIRTES

La description de la technologie de Stratoconception® est décrite par son concepteur Barlier :

*"Procédé précurseur breveté de fabrication par couches à partir de matériaux en plaques, le procédé de Stratoconception®, a été initié puis breveté par Claude Barlier au milieu des années 1980 et a été commercialisé dès 1991. Il s'agit du procédé de fabrication additive par couches par calcul le modèle CAO de la pièce en un ensemble de couches élémentaires"*

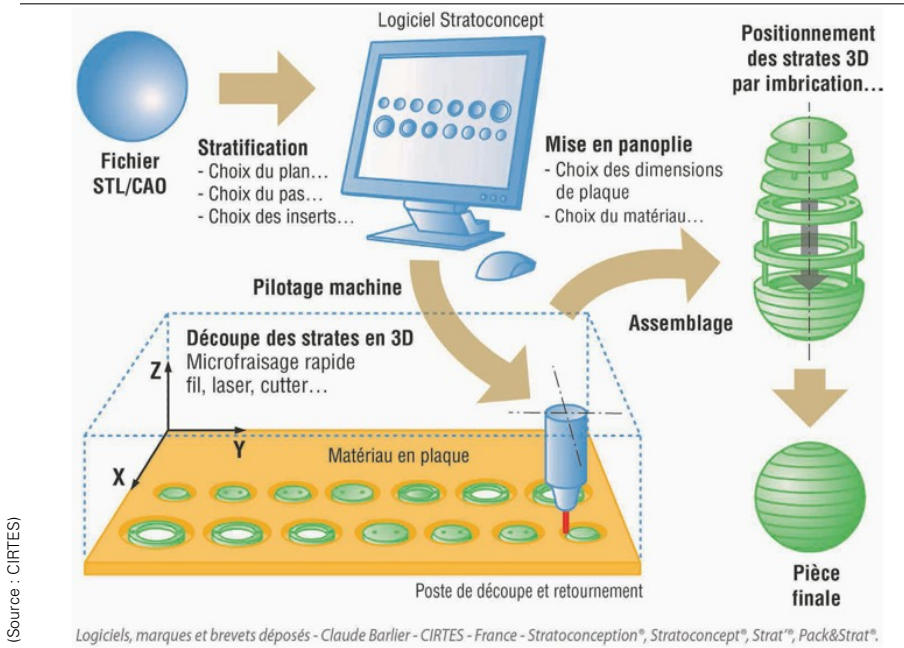


Figure 3. Schéma de principe de la Stratoconception® pour les objets 3D.

taires 3D, appelées "strates", dans lesquelles sont introduits des renforts et des inserts. Les couches élémentaires sont mises en panoplie (recto/verso) et fabriquées dans un matériau en plaque à partir d'une découpe par microfraisage rapide, par laser, par jet d'eau ou encore par cutter. Ces couches épaisses 3D représentent une tranche très proche du modèle CAO initial – contrairement aux autres procédés qui reconstruisent la pièce à partir de couches simples en 2D – elles sont réalisées directement en trois dimensions par découpe en cinq axes, ce qui permet d'obtenir des surfaces réglées ou mieux encore en microfraisage rapide 2.5 axes. Dans ce dernier cas, le profil est représentatif de la CAO 3D initiale, en dimension, en géométrie et en état de surface. Pour reconstituer l'objet final, les strates sont ensuite positionnées à l'aide d'inserts, ou bien imbriquées ou bien assemblées à l'aide de pontets pour la réalisation de pièces à parois minces. L'assemblage final peut être obtenu par assemblage mécanique, par collage structural, par brasage, par soudage diffusion ou par compression isostatique à chaud (CIC) selon le matériau et les applications finales visées. Il est possible, dans certains cas, de faire une finition des strates après assemblage, par empilement (intégré au procédé). Les moyens de positionnement et le type d'assemblage sont pris en compte dès

la décomposition de l'objet, il participe à la tenue mécanique des pièces." Cette solution apporte une base pour réaliser, avec un support en couche, la base d'un relief sans limitation de hauteur, auquel il faut apporter encore la couleur et la forme finale du relief.

### ■ Principe de la Stratoconception® cartographique

Comme indiqué précédemment, la technologie par jet d'encre proposée par Mihaly consiste à envoyer de l'encre spécifique sur une couche de support. En s'accumulant progressivement à chaque balayage de la surface, cette

encre va s'élever progressivement pour obtenir le relief souhaité, et la surcouche finale va être réalisée par jet d'encre en CMJN sur ce relief. L'élévation proposée est limitée à une hauteur de 2 à 3 cm. Une coupe schématique de l'impression est fournie en figure 3.

Dans l'innovation proposée pour l'impression en relief, le fichier d'élévation va être dupliqué en eux fichiers, appelés couches paires et impaires, qui vont subir des traitements similaires mais décalés pour ramener de façon différenciée à une hauteur d'impression en surélévation comprise entre 0 et l'épaisseur de la couche du support sur lequel l'impression en relief sera réalisée suivant le schéma de la figure 4. Ainsi, si le support utilisé fait 5 mm, l'impression de toute portion de la carte sera comprise entre 0 et 5 mm, modulo 5 mm, pour obtenir la hauteur attendue pour la carte en relief.

De plus, la limite de chaque portion du relief où s'effectue le rabaissement de hauteur va constituer une limite de découpe dans l'étape suivante. Le nombre de strates n'est pas limité, permettant de n'avoir aucune limitation en hauteur de relief.

Le processus de découpe des couches paires et impaires préparées comme décrit précédemment (en ajoutant des marques de repérage en bord d'emprise complète pour caler très finement le découpage) s'appliquera au ras des hauteurs les plus basses d'impression (figure 4) afin que la partie de la couche



Figure 4. Coupe schématique de l'impression en relief.

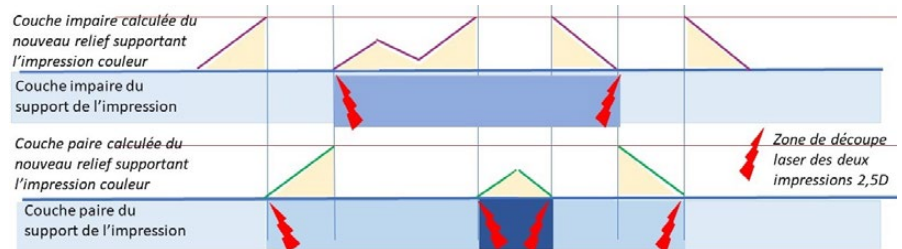


Figure 5. Coupe schématique des couches paires et impaires de l'impression en relief, avec les positions des lignes de découpe.

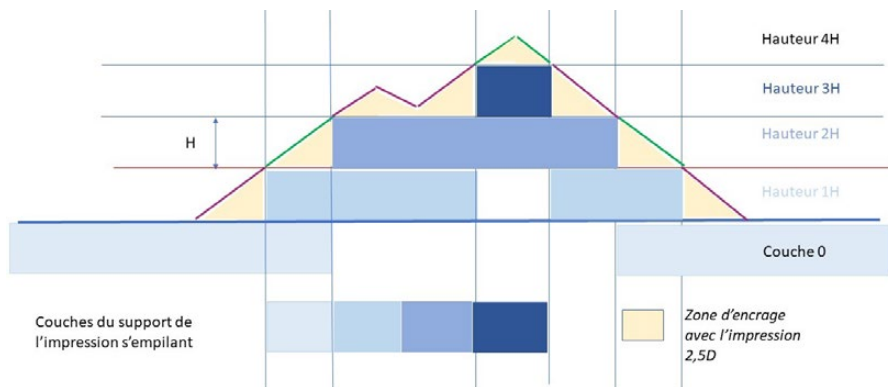


Figure 6. Coupe schématique d'empilement des couches paires et impaires pour créer la carte du relief sans limitation de hauteur.

support de hauteur N serve d'appui pour faire reposer le support de la couche N+1 (figure 5). Il est à noter que la hauteur de la couche support ne doit être pas trop élevée pour que l'impression 2,5D soit possible avec l'imprimante de Mihaly (moins de 2 cm) et pas trop basse pour ne pas multiplier les couches de support avec des largeurs très fines.

La reconstitution du relief total consiste ensuite à empiler successivement les couches impaires et paires qui ont été découpées aux limites de zones indiquées dans la figure, suivant une méthode identique à celle d'un puzzle.

### ■ Les choix techniques de réalisation

Pour appliquer les principes décrits précédemment, une première expérimentation a été menée. Il a été alors nécessaire de réaliser des choix techniques sur différents points qui vont être évoqués.

#### ■ Le support

Le support doit répondre à différentes exigences dues au procédé de fabrication et d'exploitation. Pour la fabrication, le support doit permettre à la fois d'être compatible avec le processus d'impression 2,5D de Mihaly par jet d'encre et au processus de découpe retenu des couches paires et impaires d'impression. Par ailleurs, le support doit répondre aux contraintes de stabilité pour pouvoir réaliser l'assemblage et résister au cours du temps. Pour le premier essai, le panneau mousse KAPA® fixé en 5 mm a été retenu.

#### ■ L'ordre des opérations

Une fois le support choisi, une nouvelle difficulté technique apparaît avec l'ordre

des opérations à effectuer entre l'impression et la découpe. S'il apparaît logique de réaliser d'abord l'impression puis le découpage, cette solution va se heurter à des risques de dégradation de l'impression par la solution de découpe ou même d'impossibilité de découpe liée à la présence du relief sur le support qui va empêcher le passage de la tête de découpe ou le dépôt de la plaque à l'envers. Pour simplifier la première expérimentation, le choix a été fait de réaliser d'abord une découpe partielle, puis l'impression sur les couches paires et impaires prédécoupées. Il est à signaler que le calage a été fait visuellement au moment de l'impression conduisant à certains défauts de repérage.

L'ordre inverse de réalisation des opérations (impression avec mire de repérage puis découpage) est en cours d'expérimentation.

#### ■ L'impression

Pour l'impression, la seule solution permettant d'imprimer avec des hauteurs dépassant le millimètre est celle proposée par la société Mihaly. Cette solution permet de réaliser l'impression des couches paires et impaires préparées en amont suivant les spécifications données, au chapitre "Le premier pas significatif pour l'impression de la cartographie en relief", pour préparer le relief complet et la carte et à "Principe de la Stratoconception® cartographique", pour préparer le relief abaissé des couches paires et impaires.

#### ■ La découpe

De très nombreuses solutions de découpe numérique existent, adaptées à l'épaisseur et au type de matériau de la plaque découpée : cutter, scie,

laser, fil chaud, jet d'eau... Cependant, la présence de l'encre en relief sur le support à découper rend l'opération plus délicate. Le choix ayant été fait pour la première expérimentation de découper avant d'imprimer, une solution de prédécoupe par cutter a été retenue. Il est à noter aussi que suivant la solution de découpage retenue, des contraintes techniques de courbure sur la courbe délimitant les zones à découper peuvent apparaître.

### Premier résultat

Suivant les choix techniques décrits précédemment, la Stratoconception® cartographique a été mise en œuvre sur un extrait de carte de l'île de La Réunion. Les figures 7 à 12 permettent de visualiser les différentes étapes d'obtention de la carte en relief sans limitation de hauteur, après assemblage, suivant la manière d'un puzzle, des différentes pièces découpées et imprimées qui s'emboîtent parfaitement.

Comme évoqué précédemment, le calage manuel de l'impression sur le support prédécoupé a introduit un léger décalage de l'impression par rapport à la découpe qui augmente localement la visualisation des zones de raccord.

### Conclusion

Une solution innovante d'impression en relief sans limitation de hauteur a été conçue et testée par l'IGN,



Figure 7. Prédécoupe par cutter de la couche paire.



Figure 8. Impression en relief de la couche paire.

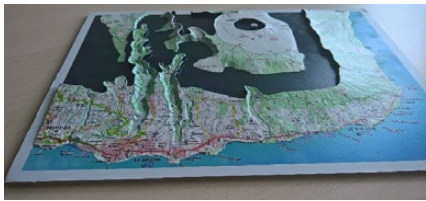


Figure 9. Impression en relief de la couche impaire.



Figure 10. Séparation des couches paires et impaires après impression.



Figure 11. Montage d'empilement des couches paires et impaires pour créer la carte du relief sans limitation de hauteur.



hybridant deux technologies françaises : la Stratoconception® mise en œuvre par la société CIRTES et l'impression couleur en relief par la société Mihaly. Des résultats probants ont déjà été obtenus, qui permettent d'envisager la mise en place d'une solution d'im-



Figure 12. Carte en relief après empilement des couches de support.

pression en relief à la demande, après quelques tests supplémentaires. Cette solution pourrait permettre de répondre à une demande importante existante de la part du grand public.

## Bibliographie

- Barlier, C. et Bernard, A., 2020. *Fabrication additive – Du prototypage rapide à l'Impression 3D*, 2<sup>e</sup> édition, Ed. Dunod
- Harding C., Hasiuk F., Wood A., 2021. "TouchTerrain–3D Printable Terrain Models". In: ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 10 (3) :108. <https://www.mdpi.com/2220-9964/10/3/108>
- Lecordix, F., 2016. "Nouvelle dimension pour la sémiologie graphique". In : Cartes & Géomatique, Saint-Mandé, France, Vol. 229-230, pp 105-115.
- Reed, H. P., 1946. "The development of terrain model in the war". In: Geographical review, New York, vol. 36, No.4, pp. 632-652.
- Stanley, A. A., 1947. "Plastic Relief Models". In: The Military Engineer, Society of American Military Engineers vol. 39, n°261, pp. 287-290. <http://www.jstor.org/stable/44567205>
- Sutter, F., Räber, S., Jenny, B., 2006-2017, Site web Terrain Models, *Institute of Cartography and Geoinformation*, ETH Zurich, <http://www.terrainmodels.com/contact.html>

## Contact

François Lecordix, Institut national de l'information géographique et forestière, [francois.lecordix@ign.fr](mailto:francois.lecordix@ign.fr)

Article paru dans *Carte & Géomatique* N° 254, décembre 2023, publication avec l'autorisation du Comité français de cartographie.

## ABSTRACT

**Keywords:** relief map, 3D printing, Stratoconception®

By following technological developments in 3D printing, IGN made experiments in 2015 with an ink jet-based relief printing solution, proposed by the Océ company. The first result was presented at the International Cartographic Conference in Rio de Janeiro in 2015, for the Belle-Ile map. The proposed technology solved several essential needs for relief mapping: high printing resolution, large size, colorimetric respect,... But it still faced two problems: still high printing costs for the general public (compared to the prices of thermoformed maps produced in multiple copies) and still limited printing heights (less than 2 - 3 cm). In 2022, IGN proposed an innovative solution to overcome the problem of limiting printing heights, without increasing production costs. The new solution combines the previous ink jet relief printing technology with the Stratoconception® technology existing in the 3D printing domain. The solution is presented in detail in this paper with an example of result.