De l'aquarelle au laser : vers une archéologie numérique?

Autor(en): **Blumer, Reto / Matthey, Cécile**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Cahiers d'archéologie fribourgeoise = Freiburger Hefte für Archäologie**

Band (Jahr): **8 (2006)**

PDF erstellt am: **19.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-389073

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Reto Blumer
Cécile Matthey

Les technologies numériques prennent une place de plus en plus importante en archéologie et cette évolution n'est pas anodine: outre nombre d'apports positifs sur la collecte des données, leur élaboration et leur publication, ces techniques nouvelles induisent parfois des modifications dans les procédures usuelles de la démarche archéologique.

De l'aquarelle au laser: vers une archéologie numérique?

Cette présentation a pour but de fournir un aperçu de quelques technologies nouvelles applicables à l'archéologie. Toutefois, nous aimerions placer ces approches innovantes dans une double perspective. La première est offerte par l'histoire des techniques mises en œuvre lors de travaux archéologiques dans la région. Elle permet d'entrevoir, au travers des exemples illustrés, le chemin méthodologique qui a été parcouru pour aboutir aux techniques actuelles. La seconde est fournie par quelques exemples ponctuels, présentés sous forme d'encadrés, de problématiques techniques récemment rencontrées lors d'interventions archéologiques locales, qui permettent notamment de rendre compte de plusieurs domaines dans lesquels l'introduction de nouvelles procédures techniques s'avèrerait fructueuse.
L'ensemble de cette présentation permettra certainement au lecteur de se faire une idée du potentiel de quelques technologies numériques et des implications découlant de leur adoption éventuelle. Elle démontre aussi que l'archéologie, en tant que discipline scientifique, aborde les problèmes du passé avec les outils du présent et une vision pragmatique du futur.

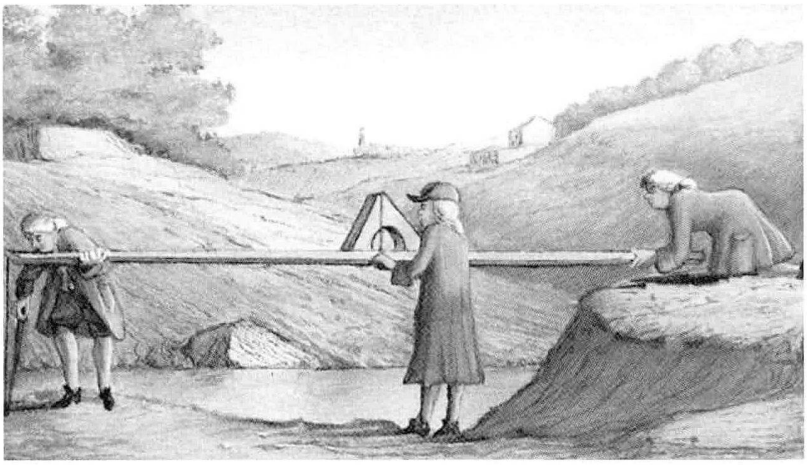


Fig. / *Abb.* 1
Nivellement d'un terrain au XVIIIe siècle (tiré de Montesson 1766)
Nivellieren eines Geländes im 18. Jahrhundert (aus Montesson 1766)

La démarche archéologique: rappel des procédures élémentaires

L'archéologie consiste à tirer du sous-sol des informations susceptibles de permettre la reconstitution de la vie des populations humaines d'autrefois. Cinq étapes jalonnent la démarche archéologique: la prospection, la fouille, l'élaboration, la publication et l'archivage. Aujourd'hui, l'archéologie suit donc une procédure relativement standardisée.
Avant d'entreprendre une nouvelle fouille, une série de démarches exploratoires (étude toponymique, prospection de surface, topographie, sondages manuels ou mécaniques, etc.) permet à l'archéologue d'acquérir les données nécessaires pour planifier la fouille proprement dite. De nos jours, l'informatique permet d'intégrer les données archéologiques, cartographiques et administratives pour faciliter la planification des interventions.
La fouille archéologique est de plus en plus souvent abordée comme une approche pluridisciplinaire qui peut intégrer la sédimentologie, la géomorphologie, l'archéozoologie, l'archéobotanique, etc. Toutes ces disciplines disposent de procédures spécifiques pour collecter et ordonner leurs données. Le rôle de l'archéologue est notamment de faciliter la réalisation de l'ensemble de ces démarches sur le terrain.

L'informatique fait progressivement son apparition sur les chantiers de fouille: l'ordinateur sert à saisir des inventaires, à tenir à jour un plan d'ensemble des vestiges ou à stocker des photographies numériques.

L'élaboration archéologique consiste non seulement à étudier les vestiges et le matériel exhumés, mais aussi à intégrer les résultats d'analyses livrés par différentes disciplines spécialisées (datations absolues, rapports d'anthropologie physique, déterminations zoologiques et botaniques, études sédimentologiques, etc.). L'objectif de cette étape est d'atteindre une compréhension aussi précise que possible des processus dynamiques qui ont mené à la constitution du site et des vestiges archéologiques. Parmi ces processus, les activités humaines jouent évidemment un rôle central, mais elles s'insèrent toujours dans un contexte environnemental qu'il convient de comprendre aussi. Depuis plusieurs années, l'informatique prend une place de plus en plus importante dans l'élaboration des données archéologiques.

On dit souvent qu'une fouille non publiée est une destruction inutile de vestiges irremplaçables. La publication est donc une étape aussi importante qu'indispensable du processus archéologique, puisqu'elle permet aux autres chercheurs et au public d'accéder aux résultats des interventions. Si les textes sont généralement produits par les archéologues, la réalisation des illustrations définitives nécessite une collaboration étroite avec des photographes et des graphistes chevronnés qui connaissent bien la démarche archéologique. Actuellement, la production des publications est totalement informatisée.

Tout à la fin de la démarche, l'archivage est le garant de la pérennité et de l'accessibilité du matériel et de la documentation archéologiques. Les inventaires sont généralement réalisés sous forme de bases de données informatiques et les documents archéologiques sont parfois numérisés et intégrés à des bases documentaires centralisées.

Comme on le voit, toutes les étapes de l'archéologie actuelle, que ce soit sur le terrain, en laboratoire, ou au bureau, sont concernées par l'informatisation puisqu'elles sollicitent une quantité croissante de ressources technologiques pour saisir, traiter et stocker de plus en plus de données. Cette évolution technologique de l'archéologie est-elle suffisamment progressive pour permettre des adaptations au coup par coup? Ou au contraire assistons-nous à une véritable «révolution numérique» nécessitant de redéfinir les processus et les interactions entre acteurs de la démarche? Cette présentation, qui ne prétend pas à l'exhaustivité, ne saurait répondre à ces questions. Elle est davantage destinée, en tenant compte des évolutions techniques et des usages actuels, à fournir des indications sur les possibilités de plus en plus étendues des nouvelles technologies.

Evolution des techniques d'acquisition de données

L'acquisition des données archéologiques comprend des techniques graphiques et littérales qui se complètent pour constituer la documentation des vestiges. Si toutes les techniques ont évolué au cours du temps, les changements sont peut-être plus sensibles dans le domaine graphique (dessin et photographie), notamment depuis l'apparition du dessin assisté par ordinateur et de la photographie numérique. Mais que l'on ne s'y trompe pas, l'informatisation a aussi eu des influences très importantes sur les techniques descriptives, notamment dans le domaine de l'encodage des descrip-

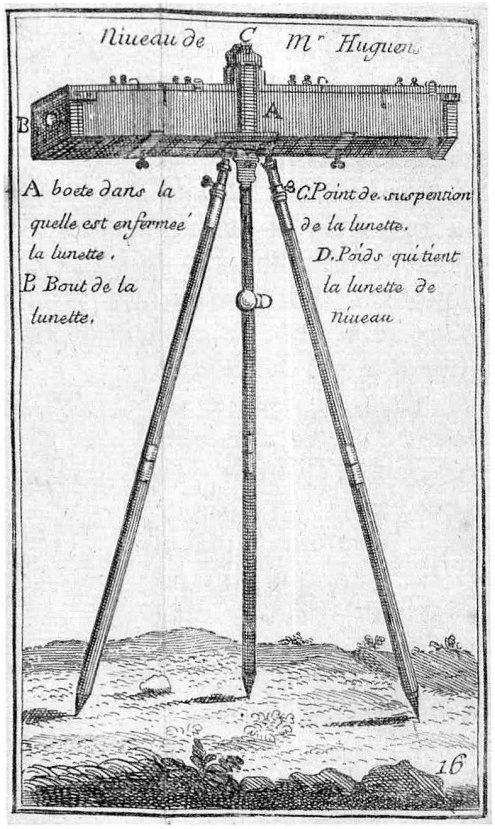


Fig. / *Abb.* 2
Le niveau optique de Huyguens tel qu'illustré en 1750
Das optische Nivellier von Huyguens in einer Illustration von 1750

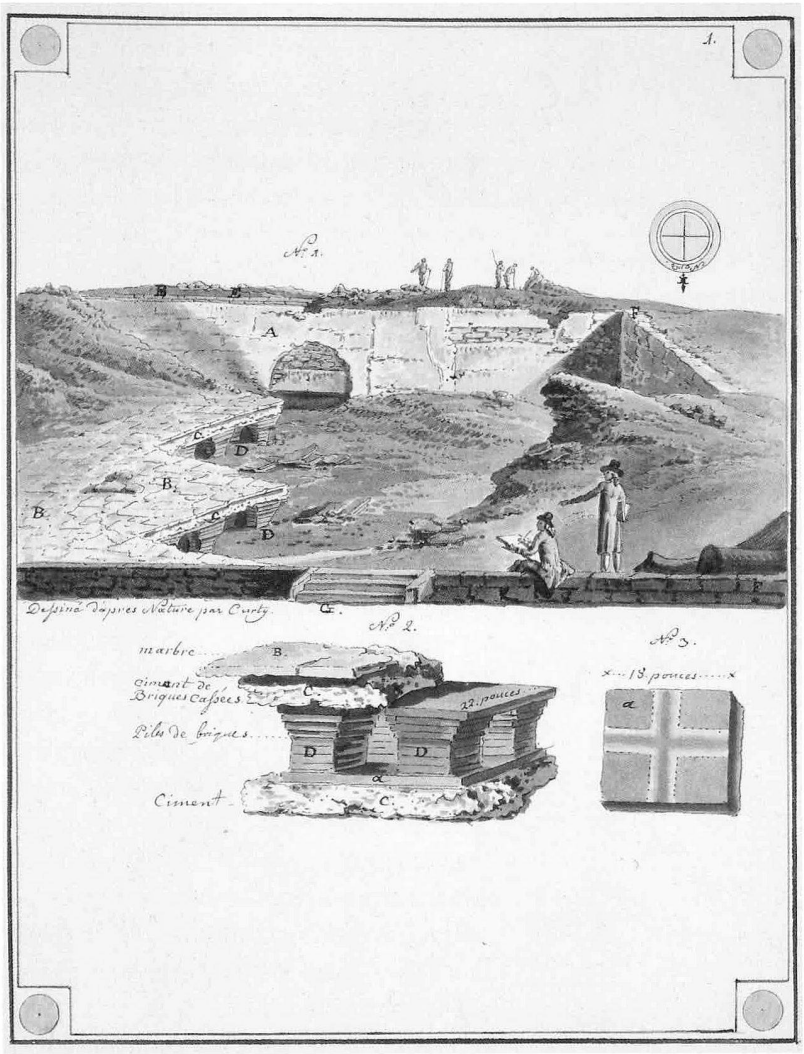


Fig. / *Abb.* 3
Fouille des bains antiques d'Avenches, 1786. (Aquarelle de Joseph-Emmanuel Curty; Fribourg BCU, manuscrit L. 427, fol. 2)
Ausgrabungen der antiken Bäder von Avenches, 1786 (Aquarell von Joseph-Emmanuel Curty; Freiburg KUB, Manuskript L. 427, fol. 2)

tions pour les analyses ultérieures à partir de bases de données.

Avant d'aborder les dernières technologies disponibles en archéologie, il est intéressant de rappeler l'origine de certaines techniques d'acquisition de données, leur première utilisation dans l'histoire de la recherche archéologique locale et leur évolution.

Les techniques de mensuration

Les techniques de mensuration appliquées à l'archéologie fondent leurs principes sur celles pratiquées dans d'autres domaines comme la cartographie ou la géodésie. Les échelles d'application de la mensuration archéologique permettent surtout de la rapprocher de la topométrie. Le développement et l'évolution de cette dernière ont profité à l'archéologie de terrain en permettant de réaliser des mesures de manière de plus en plus précise, fiable et rapide. L'évolution des représentations de vestiges archéologiques (relevés et plans), abordée plus loin, étant directement corrélée aux techniques de mensuration, il est donc utile de rappeler quelques étapes primordiales de ces dernières.

Si les principes géométriques de la topométrie n'évoluent pas fondamentalement au cours de l'histoire, les instruments de mensuration subissent d'importants développements. Au XVIe siècle, la panoplie de l'arpenteur-cartographe est déjà très étoffée, mais un simple nivellement de terrain nécessite encore un équipement lourd (fig. 1). Il faut attendre le XVIIIe siècle pour que soit inventé le premier instrument optique de nivellement (fig. 2[1]) qui permet de mesurer des altitudes à distance. Evolution du niveau optique, le théodolite étend les capacités de cartographie en permettant de mesurer à la fois les distances verticale (zénithale) et horizontale (azimutale). Décrit sous le terme *theodelitus* par le britannique Thomas Digges en 1571, le premier instrument concret est fabriqué par Jesse Ramsden entre 1782 et 1785 pour être mis à contribution lors de travaux cartographiques[2]. L'évolution technique permettra d'améliorer la précision des mesures et de faciliter la manutention de cet instrument. Au moment où les premières fouilles archéologiques ont été réalisées dans notre région, les instruments optiques de mensuration n'étaient toutefois pas encore disponibles.

Les vues en perspective

Les premières interventions archéologiques ont été initiées par des érudits du XVIIIe siècle, la profession d'archéologue étant encore à inventer. La documentation établie à l'époque relève autant de l'intérêt scientifique que du goût pour le pittoresque. Il s'agit essentiellement de vues en perspective destinées non seulement à illustrer des vestiges, mais parfois aussi à mettre en scène les acteurs des recherches archéologiques.

L'un des plus anciens documents produits dans notre région concerne la fouille des bains antiques d'Avenches VD, réalisée en 1786 par le britannique Lord Spencer Compton, comte de Northampton, sous les instructions de l'architecte bernois Erasmus Ritter (fig. 3)[3]. L'aquarelle, peinte par Joseph-Emmanuel Curty (1750-1813), est une vue en perspective des vestiges en cours de fouille. A l'arrière-plan, on distingue des ouvriers en train de travailler tandis qu'au premier plan, un notable instruit un artiste qui réalise une représentation «d'après nature» des

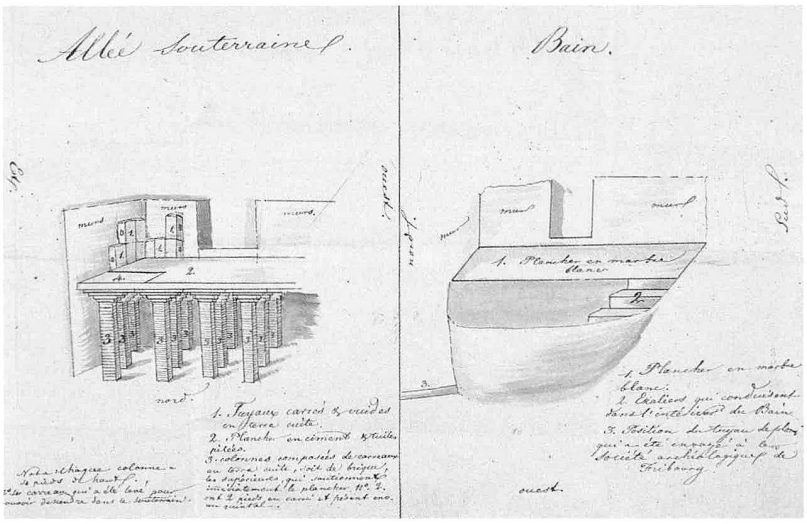


Fig. / *Abb.* 4
Représentation des vestiges archéologiques réalisée en 1829 lors de la mise au jour de la *villa* gallo-romaine de Bossonnens/Essert des Corbes
Darstellung der in der römerzeitlichen villa rustica *von Bossonnens/Essert des Corbes freigelegten archäologischen Überreste, 1829*

vestiges. Entre ces deux plans, les vestiges sont munis d'étiquettes alphabétiques renvoyant à des vues de détails.

Sur le territoire du canton de Fribourg, la première représentation de structures archéologiques a été réalisée à Bossonnens/Essert des Corbes (fig. 4). Les fouilles de la *villa* gallo-romaine entreprises en 1829 ont mis au jour trois salles d'eau dont une à hypocauste alors interprétée comme «allée souterraine» à colonnes. Les lettres adressées à la Société Archéologique de Fribourg[4] qui décrivent ces découvertes sont complétées par un croquis à la plume de «l'allée souterraine» et du «bain», réalisé en perspective cavalière. Outre une numérotation des éléments architecturaux, cette représentation comporte une légende, une orientation géographique et une mention de la hauteur des «colonnes». Par son style, ce dessin rappelle certains relevés architecturaux d'anciens monuments exécutés au XVIIIe siècle, mais en moins pittoresque.

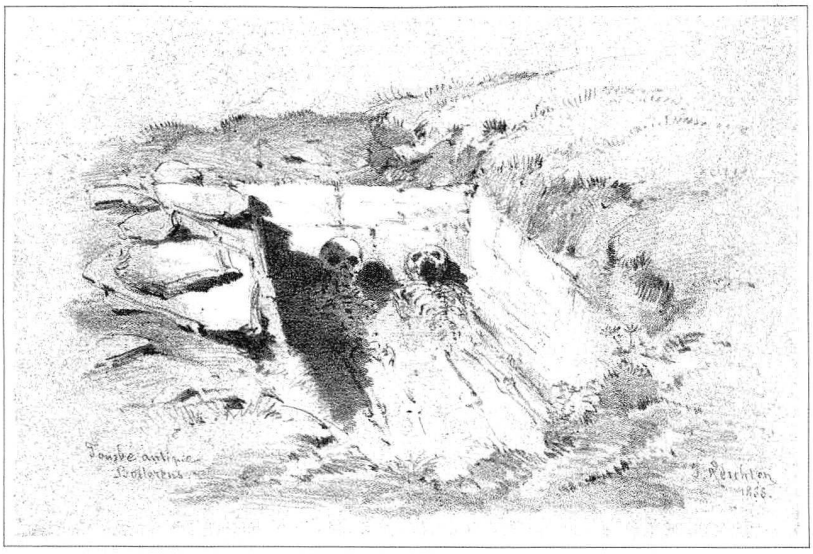
En 1890, François Reichlen, membre de la Société d'Histoire du canton de Fribourg, a réalisé un dessin au crayon «pris sur nature», représentant en perspective une tombe du Haut Moyen Age découverte à Botterens/En Jogne FR (fig. 5). L'ombre quasi dramatique projetée sur les deux squelettes gisant dans la fosse et l'absence d'autres indications (orientation ou échelle) montrent que l'accent a été délibérément mis sur le côté pittoresque de la découverte. Un second dessin réalisé lors de cette intervention figure les ouvriers au travail sous la direction attentive de quelques notables et d'un ecclésiastique (fig. 6). Outre l'aperçu donné sur la méthode de fouille, cette vue reflète une atmosphère plutôt détendue. Ces deux illustrations, publiées dans un article du journal local «La Gruyère illustrée»[5], sont plus représentatives du dessin de presse de l'époque que de la documentation archéologique.

Les vues en plan et en profil

Les vestiges archéologiques mis au jour dans les fouilles fribourgeoises font l'objet de relevés en plan depuis un peu plus d'un siècle. La plus ancienne vue connue a été effectuée lors de la fouille de la nécropole de Fétigny/La Rapettaz en 1882. Il s'agit d'un relevé schématique en plan de la zone fouillée, tracé par une main anonyme (fig. 7). Les tombes contenant des objets y sont numérotées et soigneusement légendées, alors que les sépultures sans matériel sont symbolisées par un point. Sur la même page, un second croquis sommaire, intitulé «forme de tombeau», montre une sépulture empierrée contenant un squelette très fragmenté. Bien que cette structure soit représentée en plan, le schéma ne comporte ni orientation, ni échelle.

La nécropole tumulaire de Cordast/Raspenholz, fouillée en 1894, a fait l'objet d'un plan d'ensemble à l'encre (fig. 8). Outre un titre et un cadre baroque, le centre est occupé par un plan à l'échelle 1:1000 sur lequel chaque tumulus est systématiquement numéroté. Le plan est dûment orienté selon les points cardinaux. Plus surprenant, on découvre dans le coin inférieur gauche un portrait de plain-pied d'un guerrier celtique muni de sa lance. Dans le coin droit, un autre encrage présente un des monticules coupé par une tranchée transversale aux

Fig. / *Abb.* 5
Dessin au crayon d'une tombe médiévale de Botterens/En Jogne, réalisé en 1890 par François Reichlen (La Gruyère illustrée, IV, fasc. I, 1890, 4-5)
Bleistiftzeichnung eines mittelalterlichen Grabes von Botterens/En Jogne von François Reichlen, 1890 (La Gruyère illustrée, IV, fasc. I, 1890, 4-5)



TOMBE ANTIQUE. (BOTTERENS)

Fig. / *Abb.* 6
Ambiance de fouille à la fin du XIXe siècle à Botterens/En Jogne (La Gruyère illustrée, IV, fasc. I, 1890, 4-5)
Arbeitsbild von den Ausgrabungen in Botterens/En Jogne am Ende des 19. Jahhunderts (La Gruyère illustrée, IV, fasc. I, 1890, 4-5)

profils bien verticaux. Ce document réalisé par un ingénieur géomètre est un bon exemple des réalisations de la fin du XIXe siècle, mêlant représentations objectives et subjectives selon les affinités artistiques du dessinateur.
D'autres relevés, effectués au début du XXe siècle, illustrent par exemple le cimetière médiéval et les ruines romaines de Fribourg/Pérolles (1902), la *villa* romaine de Morat/Combette (1904) et celle de Ferpicloz/Le Mouret (1917). Ils sont l'œuvre de professionnels, ingénieurs cantonaux ou dessinateurs-géomètres, collaborant avec les archéologues. Ces plans ont souvent une apparence moderne: l'échelle, les dimensions, et l'orientation des vestiges sont indiquées, des coupes et des vues de détail sont incluses. Le relevé des structures, généralement effectué au 1:100, est souvent complété par un plan d'orientation (1:10'000) et un plan de situation (1:1000) tracés sur la même page. Dessinés et légendés à la plume, parfois aquarellés, ces plans recèlent aussi parfois des informations au sujet des vestiges exhumés. Ainsi, sur le plan de Fribourg/Pérolles (fig. 9), le dessinateur a noté les particularités de certaines inhumations («crâne fendu», «mâchoire déplacée») et esquissé une «plaque de ceinturon» découverte dans une sépulture. Au bas du document, un mur et un empierrement sont représentés en coupe.

Le relevé de profils stratigraphiques est développé au cours du XIXe siècle par les géologues. A cette époque, le principe stratigraphique trouve parfois des applications en archéologie, en particulier durant les premières fouilles de sites lacustres. Ainsi, en 1854, Ferdinand Keller illustre son premier rapport sur les stations lacustres d'une coupe stratigraphique sommaire[6]. En 1860, l'archéologue vaudois Frédéric Troyon fait de même dans son ouvrage[7]. Malgré ces applications pionnières, le relevé stratigraphique reste rare avant le début du XXe siècle.
Dans le canton de Fribourg, un des plus anciens exemples de profil stratigraphique provient de la fouille de 1925 du site de Greng/Grenginsel, tranchée I (fig. 10). Les couches, dont les limites sont rectilignes ou régulièrement ondulées, sont dessinées à l'échelle 1:50 et coloriées aux crayons de couleur. Des hachures mettent en évidence certains types de sédiments et une légende figure à droite. L'aspect schématique de ce relevé s'explique peut-être par le fait qu'une documentation photographique des profils avait aussi été réalisée.

La photographie

Depuis l'invention de la technique photographique au milieu du XIXe siècle, les vestiges archéologiques ont de plus en plus fréquemment reçu un complément documentaire utile sous forme de photographies. La technique révolutionne rapidement la représentation classique jusqu'alors dominée par le dessin et l'aquarelle. Les premiers clichés voués à une thématique historique et/ou archéologique apparaissent en France en 1851

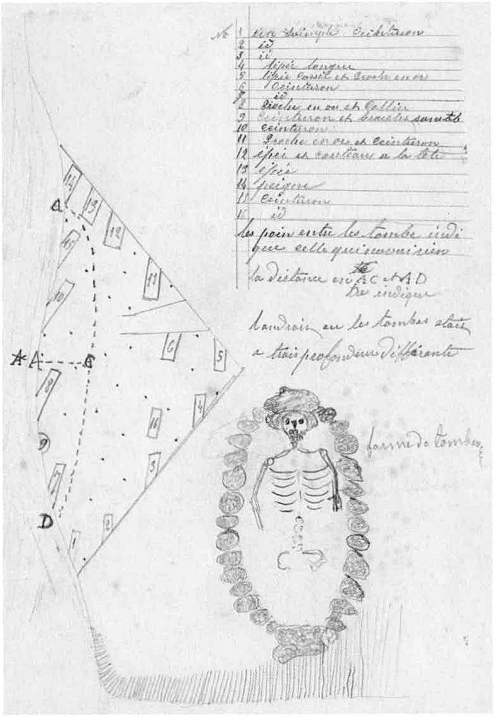
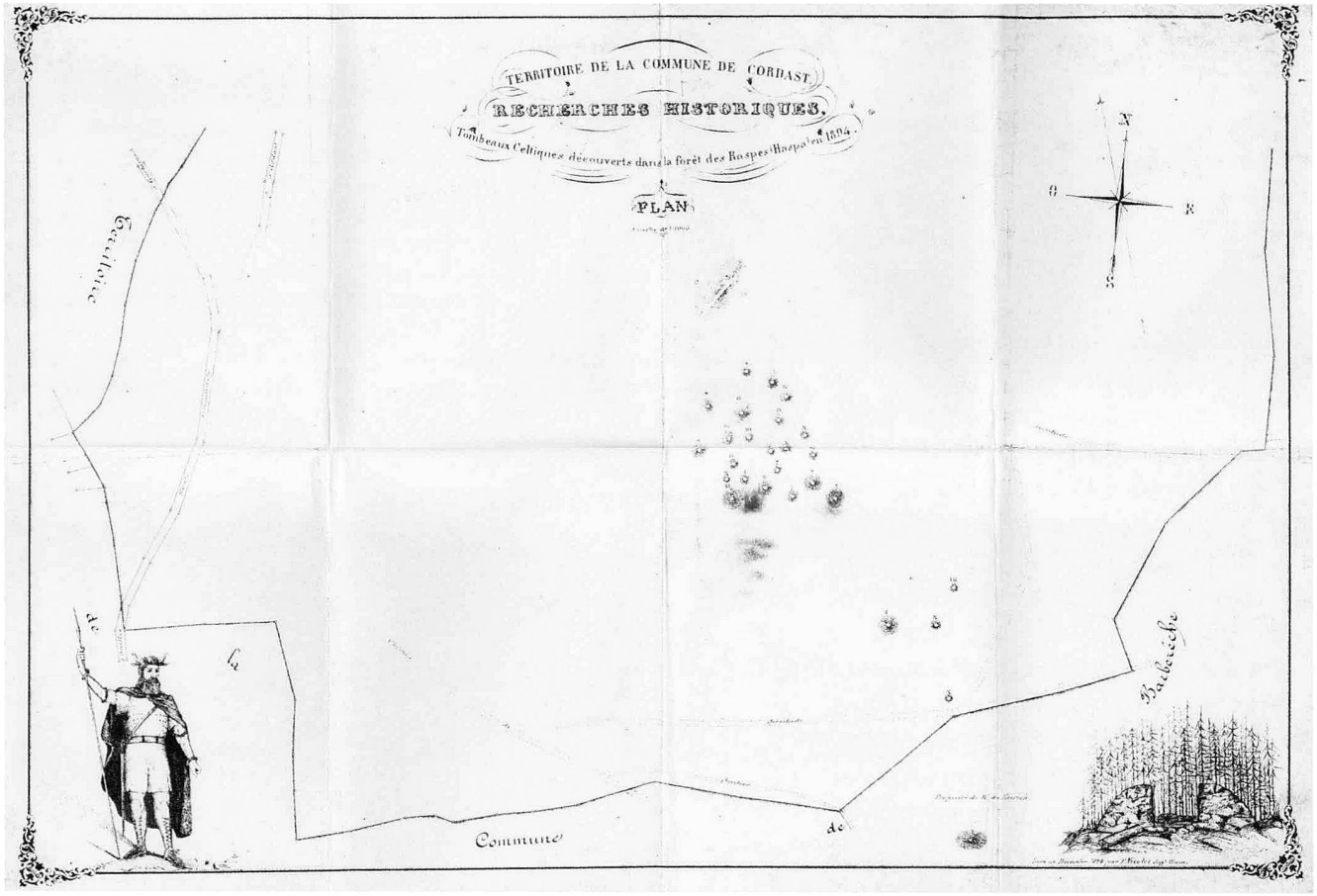


Fig. / *Abb.* 7
Documentation de fouille schématique de la nécropole de Fétigny/La Rapettaz
Schematische Dokumentation der Ausgrabungen in der Nekropole von Fétigny/La Rapettaz



lors de la «mission héliographique» qui vise à recenser photographiquement les plus importants objets immobiliers gallo-romains et médiévaux du pays[8]. A la fin du XIXe siècle, le potentiel de la photographie est largement reconnu et est favorisé notamment grâce à l'invention de la pellicule souple en 1889[9] et à l'apparition d'appareils plus compacts. C'est à ce moment-là que les premiers clichés à vocation documentaire sont tirés sur des fouilles archéologiques.

Dès le début du XXe siècle, les archéologues fribourgeois utilisent volontiers la photographie pour compléter leur documentation de fouilles: Fribourg/Pérolles (1902), Morat/Combette (1903), Villaz-Saint-Pierre/Champ des Morts (1906), Lussy/Fin de l'Illaz (1908), Corminboeuf/Bois Murat (1909), Attalens/En Réresse (1911), Broc/Villa Cailler (1911) ou Ferpicloz/Le Mouret (1917). Les structures mises au jour sur les chantiers de fouille deviennent rapidement de véritables sujets photographiques, comme sur cette vue du tumulus de Corminboeuf/Bois Murat fouillé par l'abbé Henri Breuil en 1909 (fig. 11). La photographie n'est pas encore uti-

Fig. / Abb. 8
Plan des tumuli relevés à Cordast en 1894 avec éléments graphiques anecdotiques
Plan der 1894 bei Cordast aufgedeckten Grabhügel mit anekdotenhaften grafischen Elementen

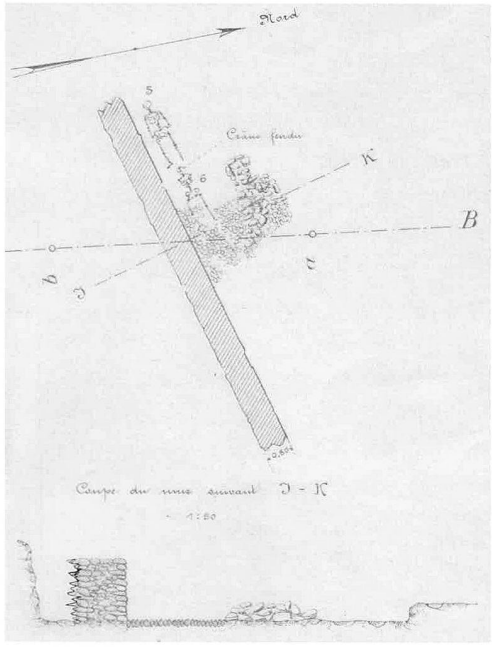


Fig. / *Abb.* 9
Plan des vestiges exhumés en 1902 sur le site de la *villa* gallo-romaine de Fribourg/Pérolles
Plan der 1902 auf der Fundstelle der römerzeitlichen villa rustica *von Freiburg/Pérolles aufgedeckten Überreste*

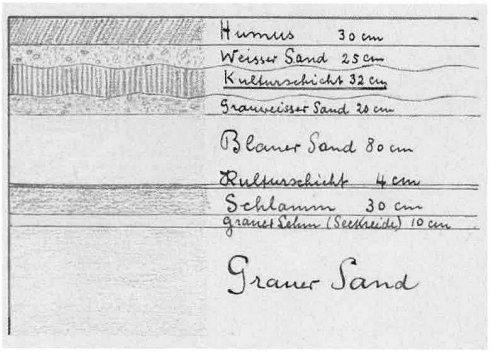


Fig. / *Abb.* 10
Relevé stratigraphique descriptif de Greng/Grenginsel, 1925
Beschreibende Stratigrafie von Greng/Grenginsel, 1925

lisée pour documenter les étapes de la fouille, mais plutôt pour illustrer les éléments spectaculaires entièrement dégagés (tombes, murs, etc.). Seuls d'éventuels outils, objets ou personnes visibles en bordure donnent une échelle approximative des vestiges.

La «retouche» de photographie archéologique apparaît en 1903 dans notre canton. Sur une vue noir-blanc de la fouille de Morat/Combette, la maçonnerie romaine a été colorisée en orange pour être est mise en évidence.

La fouille, en 1911, du cimetière du Haut Moyen Age d'Attalens/En Réresse a fourni une documentation riche comportant une série de photographies organisées en fiches de travail (fig. 12). Chaque feuille de carton comporte un numéro, un cliché de tombe et des annotations manuscrites (lieu, date, numéro de tombe, état de préservation, brève description, objets découverts, particularités anatomiques des squelettes, etc.). Sur certaines photos, les contours trop flous sont parfois retracés à la plume en pointillés. Signées par Léonard Rothey, diplômé en archéologie de la Sorbonne, ces fiches représentent une première systématisation de la documentation archéologique dans notre canton, bien que certaines photographies soient à cheval entre documentation de vestiges et vues d'ambiance (fig. 13).

Depuis les années 1920, rares sont les fouilles archéologiques pour lesquelles on ne possède pas quelques vues photographiques, qu'elles aient été tirées par souci de documentation scientifique ou simplement pour illustrer les chantiers et ce qui s'y passe. Bien évidemment, l'archéologie a adopté au fur et à mesure les innovations de la photographie (formats de boîtiers, optiques interchangeables, flash, pellicule couleur, etc.).

Le relevé actuel: un concentré d'informations

Comme le montre ce dessin d'une tombe de Bussy/Pré de Fond FR réalisé en 1999, les relevés de structures réalisés actuellement sont très codifiés: vue en plan, échelle adaptée au sujet, orientation systématique et carroyage. Le dessin est organisé pour concentrer une grande quantité d'informations sur les matières (couleurs différentes), les aspects des surfaces (textures), les traitements subis par certains matériaux (rubéfaction), etc. Sur cet exemple, la forme des cailloux et blocs est reconnaissable grâce à leurs arêtes principales, alors que les zones plus ou moins oxydées du sédiment sont mises en évidence par un léger reflet jaunâtre. Le squelette étant le sujet principal, il est représenté avec une couleur vive et un ombrage accentuant le relief des ossements. La réalisation de ce genre de relevé très détaillé prend du temps et n'est pas nécessaire dans tous les cas. C'est pourquoi l'archéologue évalue systématiquement l'importance des vestiges mis au jour pour déterminer l'investissement accordé à la documentation graphique.

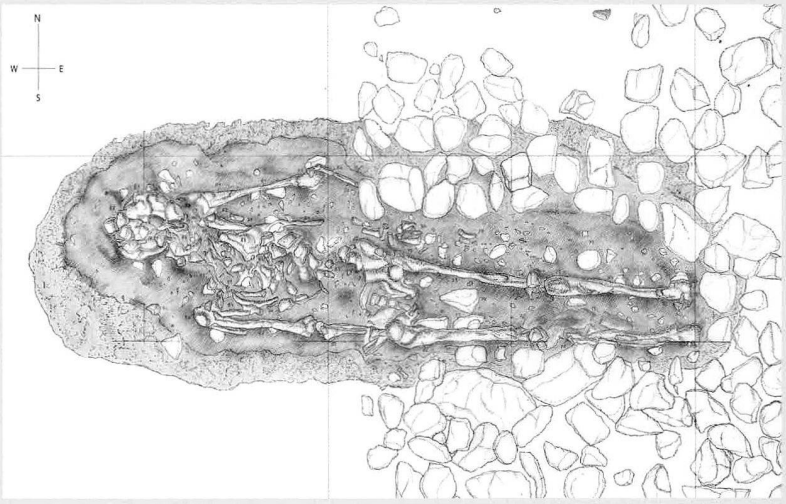


Fig. / Abb. 11
Photographie de la fouille du tumulus de Corminboeuf/Bois Murat, 1909
Fotografie von der Ausgrabung des Grabhügels von Corminboeuf/Bois Murat, 1909

La photographie aérienne et la photogrammétrie

La photographie aérienne naît en 1858, lorsqu'un cliché de Paris est réalisé depuis un ballon captif[10]. En 1925, l'observateur aéronautique Antoine Poidebard initie l'archéologie aérienne en repérant les microreliefs du *limes* romain qui apparaissent dans la lumière rasante du couchant syrien[11]. Durant la seconde guerre mondiale, tant à l'étranger qu'en Suisse, les militaires produisent une grande quantité de clichés aériens. Hans-Georg Bandi reconnaît le potentiel de ces vues pour la prospection archéologique[12]. A son initiative, la Société suisse de préhistoire crée en 1943 un Bureau de coordination pour les relevés aériens[13] qui est chargé de sensibiliser les pilotes à l'observation archéologique et de faire le lien entre l'Office fédéral de la topographie, le personnel volant dudit Office fédéral, les observateurs de l'armée de l'air et les archéologues.

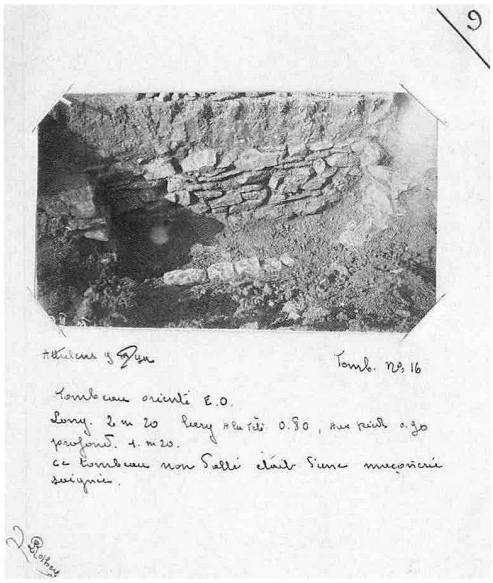


Fig. / *Abb.* 12
Fiche descriptive réalisée en 1911 pour la nécropole du Haut Moyen Age d'Attalens/En Réresse
Befundbeschreibung von 1911 für die frühmittelalterliche Nekropole von Attalens/En Réresse

Même si, pour des raisons géographiques, la contribution de l'archéologie aérienne est plus modérée en Suisse qu'en France, par exemple, cette source documentaire reste néanmoins importante pour la recherche et la mise en valeur du patrimoine archéologique et historique.

A partir de 1849, la «métrophotographie» fut développée par le polytechnicien français Aimé Laussedat[14]. Cette technique permettait de mesurer précisément des objets représentés sur des images. En 1858, l'architecte allemand Albrecht Meydenbauer développe la photogrammétrie pour la documentation de bâtiments[15]. En 1885, l'enregistrement photogrammétrique des ruines de Persépolis, au sud de l'Iran, est la première application concrète en archéologie[16]. La décennie 1920 voit le développement de la photogrammétrie aérienne permettant d'enregistrer la topographie d'un vaste terrain sans l'arpenter à pied. En Suisse, cette technique est utilisée dès 1928 pour cartographier le Plateau et le Jura[17]. Pour l'archéologie du canton de Fribourg, le plus ancien exemple d'application de la photogrammétrie est un relevé topographique du Mont Vully, réalisé en 1979 seulement sur la base de photographies aériennes. Cette technique presque aussi ancienne que la photographie n'a pas été adoptée en archéologie avec le même succès que dans le domaine des monuments historiques.

Carte archéologique et inventaire des sites cantonaux

La cartographique est depuis longtemps mise à contribution pour recenser les points de découvertes des vestiges et du matériel archéologiques. Les cartes archéologiques produites ne se limitent pas à des symboles graphiques mais sont complétées de données littérales; elles peuvent ensuite être utilisées pour étudier l'occupation ancienne du territoire. En ce sens, elles sont des données synthétiques acquises par des procédures qui se sont modernisées au fil des décennies.

C'est en 1878 que le baron Gustave de Bonstetten publia la première carte archéologique du canton de Fribourg[18]. Cet ouvrage de 22 pages signale toutes les découvertes connues à l'époque sous forme de brèves notices, ordonnées par ordre alphabétique des communes. Bien souvent, les informations fournies sont limitées et nombre de sites mentionnés dans cet ouvrage ne sont plus localisés aujourd'hui. Quelques années plus tard, en 1894-95, François Reichlen publie trois fascicules consacrés à l'archéologie fribourgeoise[19]. Il y signale les principaux sites archéologiques du canton en se basant essentiellement sur le travail du baron de Bonstetten qu'il complète. En 1941, le chanoine Nicolas Peissard, archéologue cantonal, fait paraître une nouvelle carte archéologique du canton[20]. Ce livre de 138 pages reste dans sa forme très fidèle à l'ouvrage de Bonstetten mais il a été complété par de nombreuses notices. Si Peissard apporte parfois des précisions quant à la localisation de sites mentionnés par Bonstetten, bon nombre de découvertes ne sont signalées que de manière sommaire. Cette carte est la dernière tentative de publication exhaustive des découvertes archéologiques du canton de Fribourg.

Fig. / *Abb.* 13
Photographie d'une tombe du Haut Moyen Age d'Attalens/En Réresse, 1911
Fotografie eines frühmittelalterlichen Grabes von Attalens/En Réresse, 1911

Les techniques traditionnelles et les tendances actuelles

Les techniques mises en œuvre sur les chantiers de fouille dépendent étroitement des moyens disponibles. L'informatisation et l'utilisation de techniques numériques sur le terrain sont cependant de plus en plus fréquentes. Toutefois, l'acquisition des données continue de reposer en grande partie sur des techniques manuelles traditionnelles.

Parmi les instruments de mensuration optiques, le niveau à l'aide duquel on mesure les altitudes est omniprésent sur les chantiers de fouille. Grâce à une version moderne fonctionnant avec une tête rotative projetant un rayon laser, qui commence à apparaître, plusieurs fouilleurs peuvent relever des altitudes simultanément sans l'assistance d'un opérateur. Utilisé moins fréquemment que le niveau, le théodolite l'est pour mettre en place des points fixes servant de référence spatiale sur le chantier. Il est quelquefois mis à contribution pour relever des vestiges architecturaux, plus rarement pour localiser le matériel archéologique. Le tachéomètre qui permet, en plus du levé angulaire horizontal et vertical, de mesurer des distances par le biais d'un rayon laser, remplace parfois le théodolite. Bien entendu, d'autres outils de mensuration manuelle sont aussi couramment employés (chevillères, double-mètres, etc.). Le distance-mètre laser enfin est une innovation récente parfois adoptée sur le chantier de fouille, car il a l'avantage de permettre à un seul opérateur de prendre des mesures.

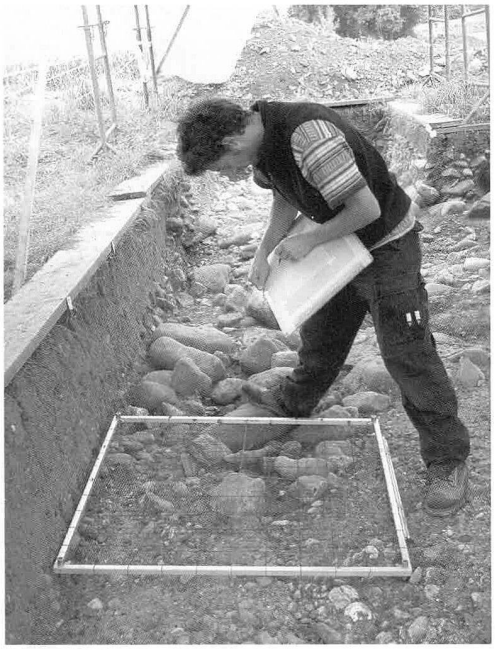
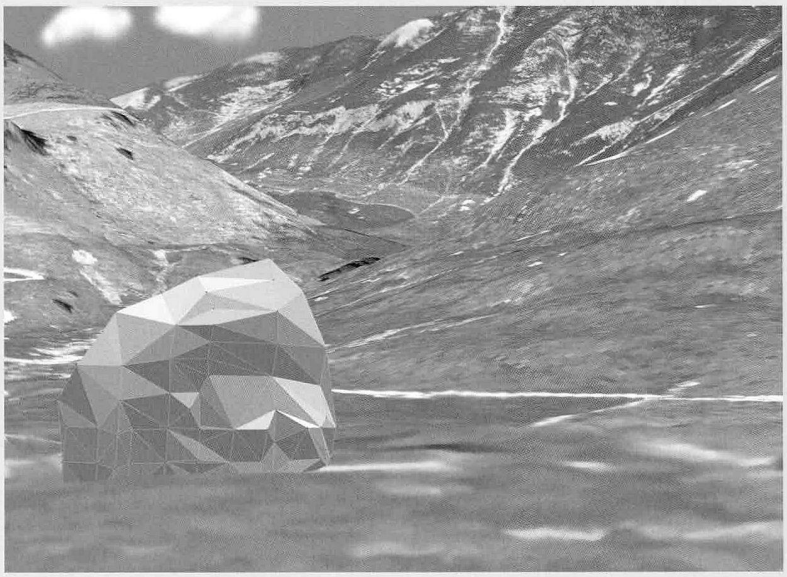


Fig. / *Abb.* 14
Relevé manuel d'une structure archéologique aujourd'hui
Manuelle, zeichnerische Dokumentation eines archäologischen Befundes heute

Approche en trois dimensions

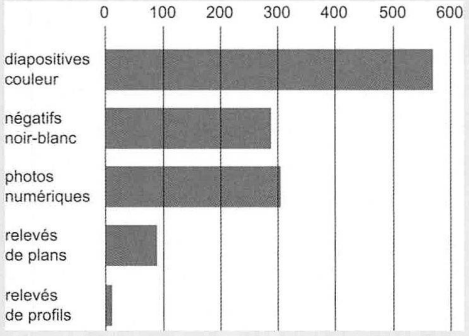
Pour lever en trois dimensions des objets volumineux difficilement accessibles, il est possible de procéder par triangulation à l'aide d'un distance-mètre laser. Chaque point de l'objet est levé en mesurant la distance le séparant de trois points fixes de coordonnées connues. Une alternative consiste à aligner les points à lever sur des lignes horizontales dont l'altitude est connue. De retour au bureau, il est possible de réaliser une modélisation grossière de l'objet en 3D dans une station de DAO[21].
Cette expérience a été tentée pour lever la paroi d'un bloc rocheux qui surplombe un site mésolithique dans les Préalpes fribourgeoises (Charmey/Petit-Mont, point 2A)[22]. L'obtention d'un résultat visuel nécessite un travail non négligeable sur l'ordinateur. La position de chaque point était définie par l'intersection de trois mesures. Les manipulations informatiques consistaient à trouver, pour chaque point, le croisement géométrique de deux sphères et d'un plan horizontal, ce qui était relativement fastidieux. Le résultat obtenu par cette technique facilement accessible permet d'apprécier la configuration de cette surface rocheuse avec une approximation relativement bonne.



La photographie représente une part importante de la documentation archéologique. Elle permet non seulement de multiplier les points de vue des vestiges exhumés, mais aussi d'avoir un aperçu des couleurs et des textures sédimentaires après la fouille. Il est fréquent que plusieurs appareils photographiques, chargés de pellicules différentes (négatif noir/blanc et diapositive couleur), soient simultanément en usage sur le chantier. La photographie permet aussi de garder une trace visuelle de l'évolution des interventions.
Sur la plupart des chantiers, les relevés de vestiges sont effectués manuellement à diverses échelles selon les sujets (fig. 14). Inspirés du dessin technique, les relevés archéologiques s'appuient sur un référentiel orthonormé, en coordonnées relatives ou absolues (système des cartes nationales) et sont munis de plusieurs informations nécessaires à la compréhension des vestiges. La couleur est parfois utilisée pour distinguer certains éléments. Les

Une documentation graphique diversifiée

La documentation graphique d'une fouille regroupe de nombreux relevés et photographies. En prenant pour exemple l'intervention archéologique de Bulle/Planchy d'Avau (projet archéologique H189), il est possible de comparer quantitativement l'importance de ces deux types de documents. Sur les 1265 documents graphiques de cette fouille, le rapport entre dessin et photographie est d'environ un pour dix. Le grand nombre de clichés argentiques nécessite des solutions adaptées pour l'archivage et le catalogage. Il en est de même pour la photographie numérique, qui livre une quantité croissante de données nécessitant des espaces de stockage de plus en plus importants. Des solutions fonctionnelles doivent également être mises en place pour garantir l'efficacité des recherches au sein de cette documentation foisonnante.



légendes se limitent usuellement à des informations générales essentielles.

Si le cahier de fouille est encore souvent en usage pour tenir à jour la liste des tâches accomplies et des interprétations en cours, les vestiges sont souvent décrits en détail sur des fiches préimprimées spécifiques. Chaque entité décrite sur le chantier (secteur de fouille, unité stratigraphique, structure archéologique, etc.) peut ainsi disposer d'une série de descripteurs organisés de manière logique. Les fiches ont l'avantage de structurer l'information, de simplifier le classement et de faciliter les saisies ultérieures tout en évitant certaines redondances littérales.

Depuis quelques années, l'informatique a fait son entrée sur les chantiers de fouille. Sa première utilisation est généralement la saisie des inventaires de mobilier et d'échantillons sous forme de listes ou de bases de données. La présence de l'ordinateur sur le terrain, qui nécessite bien entendu de disposer de l'électricité, induit parfois aussi d'autre applications courantes: saisies de fiches descriptives, dessin assisté par ordinateur des plans d'ensemble des vestiges, etc. La photographie numérique devient omniprésente. D'abord mise en œuvre comme complément à la photographie argentique traditionnelle, elle tend à la remplacer progressivement. Le corollaire de cette adoption est la nécessité de disposer, sur le chantier, d'un ordinateur avec une capacité de stockage suffisante pour accueillir les nombreux clichés numériques, ainsi que d'une solution d'impression si des épreuves doivent être utilisées sur le terrain. Ces technologies (photographie numérique et traitement d'image par ordinateur), alliées ou non au dessin manuel, donnent accès à de nouvelles procédures en matière de relevé des vestiges.

Le degré d'intégration de nouvelles technologies numériques et/ou informatiques sur le terrain peut varier selon les contextes institutionnels et les périodes archéologiques étudiées. L'usage de certains instruments (théodolite laser, distancemètre, etc.) et techniques (photogrammétrie pour les relevés de façades) est ainsi plus fréquent pour les époques gallo-romaines, médiévales et modernes alors que l'encodage des données descriptives dans des bases de données et leur analyse par des approches statistiques sont plus habituels pour les périodes pré- et protohistoriques. Dans le contexte de la prospection archéologique, l'emploi de récepteurs GPS, qui permettent de localiser les coordonnées des emplacements par le biais de signaux fournis par satellite, est courant lorsque la précision requise n'est pas très élevée (quelques mètres). Ces instruments peu onéreux sont d'un accès facile et se prêtent très bien à des ramassages de mobilier, par exemple après l'enlèvement mécanique de l'humus. Pour des positionnements plus précis (quelques centimètres), l'archéolo-

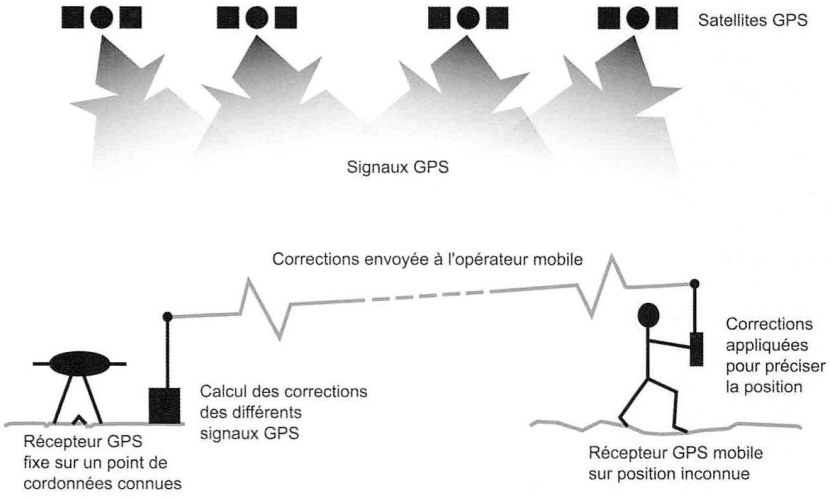


Fig. / *Abb.* 15
Principes du fonctionnement des mesures de coordonnées par DGPS
Funktionsprinzipien der Koordinatenmessung mit DGPS

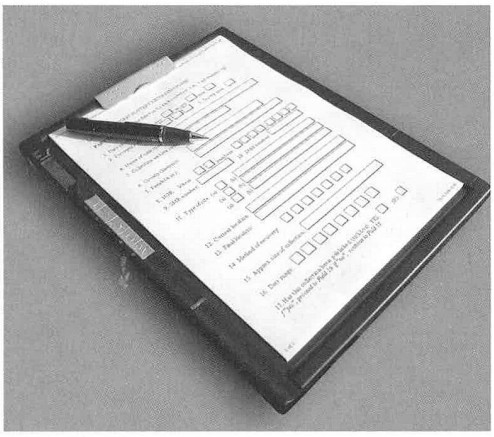


Fig. / *Abb.* 16
Bloc-notes électronique facilitant la saisie des fiches descriptives sur le terrain
Elektronischer Notizblock zur beschreibenden Datenaufnahme im Gelände

gue peut mandater un bureau de géomètre disposant d'un instrument GPS différentiel (DGPS): une station réceptrice de base fixe et une unité réceptrice mobile, permettant des mesures différentielles par des échanges de signaux radio (fig. 15). Son prix élevé ne justifie généralement pas son intégration à la panoplie des instruments d'une intervention archéologique.
D'autres techniques récentes sont quelquefois mises en œuvre sur les chantiers ou lors de l'élaboration des données. Toutefois, comme leur utilisation est encore rare, nous les avons intégrées à la suite de cette présentation.

Nouvelles approches technologiques et numériques

Les nouveaux outils technologiques et numériques que nous allons décrire peuvent trouver des applications dans trois phases de la démarche archéologique: l'acquisition des données de terrain, le traitement et l'analyse des données, ainsi que la publication des résultats. Bien entendu, certains peuvent servir lors de plusieurs d'entre elles.
Pour structurer la suite de cette présentation, nous distinguons trois domaines: les instruments, les données et les logiciels. La nature numérique des nouvelles approches ne permet toutefois pas une classification très rigide et de fait, ces trois domaines sont de plus en plus interdépendants.

Les nouveaux instruments

Le bloc-notes électronique

La description des vestiges archéologiques est souvent effectuée dans ce qu'il convient d'appeler le «langage naturel». Il s'agit de descriptions strictement littérales des observations de terrain, sans encodage des descripteurs. Usuellement, ce type de description est consigné sous forme manuscrite dans un cahier de fouille ou sur une fiche de terrain. Lors de l'élaboration des données, il est souvent nécessaire de transcrire dans un format informatique le contenu de cette documentation.
Il existe aujourd'hui plusieurs solutions permettant de sauter l'étape de la saisie. L'une d'elles consiste à rédiger les descriptions de terrain sur un bloc-notes électronique. Cet appareil, une tablette porte-document, est munie d'un bloc de papier usuel et d'un stylo équipé d'un émetteur électromagnétique (fig. 16). Tandis que l'opérateur rédige ses notes de manière absolument classique sur le papier, la tablette enregistre tous les mouvements de la pointe du stylo dans sa mémoire interne ou sur un support mémoire amovible. A chaque changement de page, l'opérateur indique à la tablette qu'une nouvelle page doit être enregistrée. De retour au bureau, les données, stockées dans un format propriétaire (spécifique au fabricant), sont transférées sur un ordinateur et traitées par un logiciel qui va transformer l'écriture manuscrite en un texte informatique éditable. Une fois configuré, le système fournit une bonne précision lors de cette phase de reconnaissance. Il est également possible de dessiner, le logiciel de transcription étant capable de distinguer les graphismes de l'écriture. L'un des avantages du bloc-notes électronique est qu'il fonctionne avec n'importe quel type de papier; il est donc possible d'utiliser des formulaires préimprimés dédiés à des descriptions spécifiques.
Une alternative de ce bloc-notes électronique est parfois appelée système à «encre digitale». Il s'agit d'un stylo muni d'une minuscule caméra optique, avec lequel on écrit de manière tout à fait conventionnelle dans un cahier de papier spécial. Chaque feuille du cahier est pourvue d'innombrables et minuscules perforations quasi invisibles, disposées selon un ordre particulier. Le capteur optique du stylo reconnaît à tout instant sa position par rapport à la feuille de papier en fonction de la combinaison des perforations qu'il «voit», ce qui lui permet d'enregistrer ses propres mouvements dans sa mémoire interne. Il n'est pas nécessaire d'indiquer les changements de page au système, car aucune combinaison des perforations n'est identique d'une page à l'autre. Ainsi, il est à tout moment possible de rajouter de l'écriture à une page préalablement annotée. De retour au bureau, le stylo est connecté à l'ordinateur et un programme (le même que pour

la tablette précédente) se charge de transformer les annotations (texte manuscrit ou schémas) en fichiers informatiques éditables avec un bon taux de reconnaissance de l'écriture. Bien entendu, il est également possible de dessiner des schémas avec ce système.

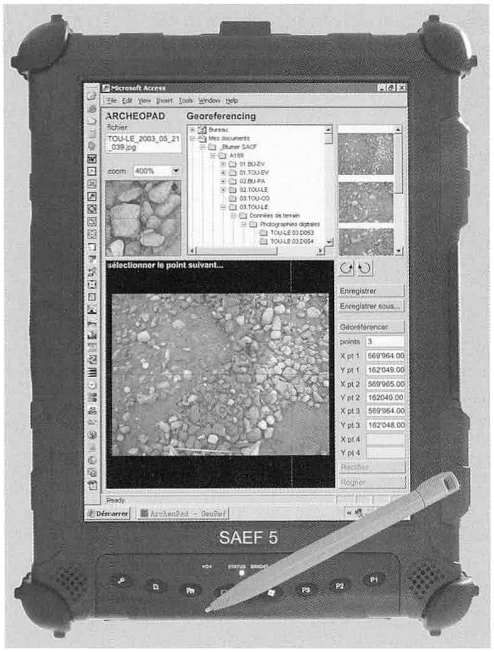
L'ordinateur de type tablette

L'ordinateur de type tablette est un système beaucoup plus évolué, puisqu'il ne s'agit pas moins que d'un véritable ordinateur portable dont les interfaces d'affichage et de saisie ne font qu'un. Les commandes ou l'écriture sont directement transmises sur un écran tactile à l'aide d'un stylet (fig. 17). La plupart des logiciels courants peuvent être installés, ce qui rend ce système particulièrement souple. Muni d'un disque dur conventionnel, l'ordinateur de type tablette possède une grande capacité de stockage de données. Plusieurs modèles ont été développés pour un usage en terrain difficile (protection contre la poussière, l'humidité et les chocs, etc.). Certains supportent même une immersion totale dans 30 cm d'eau.

Les applications possibles sont innombrables. Parmi celles qui sont liées à des tâches descriptives, la saisie de texte dans des champs d'une base de données semble tout à fait adaptée. L'utilisateur charge des formulaires de saisie *ad hoc* qui apparaissent à l'écran de l'ordinateur. Il saisit ensuite les données en écriture manuscrite et les caractères sont immédiatement convertis et enregistrés dans la base de données. La saisie de données répétitives (coordonnées, secteur, décapage, etc.) est facilitée par des sélections dans des listes déroulantes. Les informations préalablement enregistrées peuvent ensuite être recherchées, consultées et éditées à tout instant.

Les possibilités graphiques de l'appareil en font également un outil adapté à la réalisation des schémas qui complètent les descriptions littérales. Des applications spécifiques pourraient intégrer bases de données, photographies numériques et systèmes d'information géographiques qui permettraient par exemple de transformer des prises de vue subverticales en orthophotographies (relevés photographiques non déformés par la perspective de l'objectif et replacés dans un référentiel de coordonnées). Sur de tels relevés, on pourrait par exemple dessiner directement le plan définitif, positionner le mobilier archéologique, délimiter les unités stratigraphiques et les structures archéologiques, etc. A la fin de la fouille, on dispo-

Fig. / *Abb.* 17
Ordinateur-tablette robuste approprié à la fouille
Für Ausgrabungen geeigneter, robuster Tablett-Computer



serait ainsi d'un système d'information complet prêt à être analysé. Les dessinateurs pourraient en tirer les éléments graphiques nécessaires à leurs mises au net et à leurs illustrations tandis que les archéologues disposeraient de l'information pour les analyses spatiales et l'interprétation des vestiges. Dans les cas où plusieurs interventions archéologiques sont nécessaires pour compléter la documentation d'un site, l'ensemble des données des fouilles antérieures peut être chargé dans l'ordinateur-tablette pour servir de base à une nouvelle intervention.

Plusieurs ordinateurs-tablettes reliés par un réseau sans fil pourraient accéder de manière synchrone à des données de fouille communes. Une connexion de ce réseau local à une borne internet permettrait aussi de mettre immédiatement des données à disposition des bureaux du service archéologique (inventaires, descriptions, relevés, etc.). L'adoption d'un tel système n'est pas forcément évidente dans toutes les conjonctures. Elle nécessite une certaine systématisation des procédures d'acquisition des données, une planification et une gestion permettant d'intégrer des données de sources différentes et une systématique du travail en réseau.

La pantographie laser

Dans le domaine du relevé de terrain, des appareillages semi-automatiques plus ou moins complexes permettent d'obtenir des résultats de haute précision. Un de ces systèmes est basé sur le concept du pantographe, connu depuis plusieurs siècles, qui consiste à reproduire un

tracé par l'intermédiaire d'un bras articulé fonctionnant selon des principes géométriques. Le pantographe laser développé et commercialisé par une firme privée allemande[23] est constitué d'un bras articulé au bout duquel se trouve une tête mobile munie d'un pointeur laser connecté à un ordinateur. L'opérateur «décalque» les vestiges mis au jour en guidant manuellement le rayon le long des limites à relever. Ces tracés tridimensionnels sont enregistrés dans un ordinateur.

Ce système se prête surtout pour relever très précisément des structures complexes restreintes à quelques mètres carrés de superficie (fosses, tombes, puits, etc.), limite au-delà de laquelle le bras articulé ne peut aller. Cet appareil, en raison de son prix, de sa conception et de sa mise en œuvre relativement technique, semble réservé à des relevés particulièrement difficiles à effectuer manuellement.

La photogrammétrie numérique

La photogrammétrie, que nous avons brièvement mentionnée ci-dessus, n'est pas une technique nouvelle. Toutefois, l'intégration des technologies numériques a partiellement renouvelé son champ d'application. Le principe de base de la photogrammétrie, qui permet de mesurer les dimensions absolues d'un sujet à partir de plusieurs photographies, reste inchangé dans les approches numériques. Le principal changement réside dans la possibilité de réaliser des modèles informatiques tridimensionnels du sujet à partir de vues photographiques.

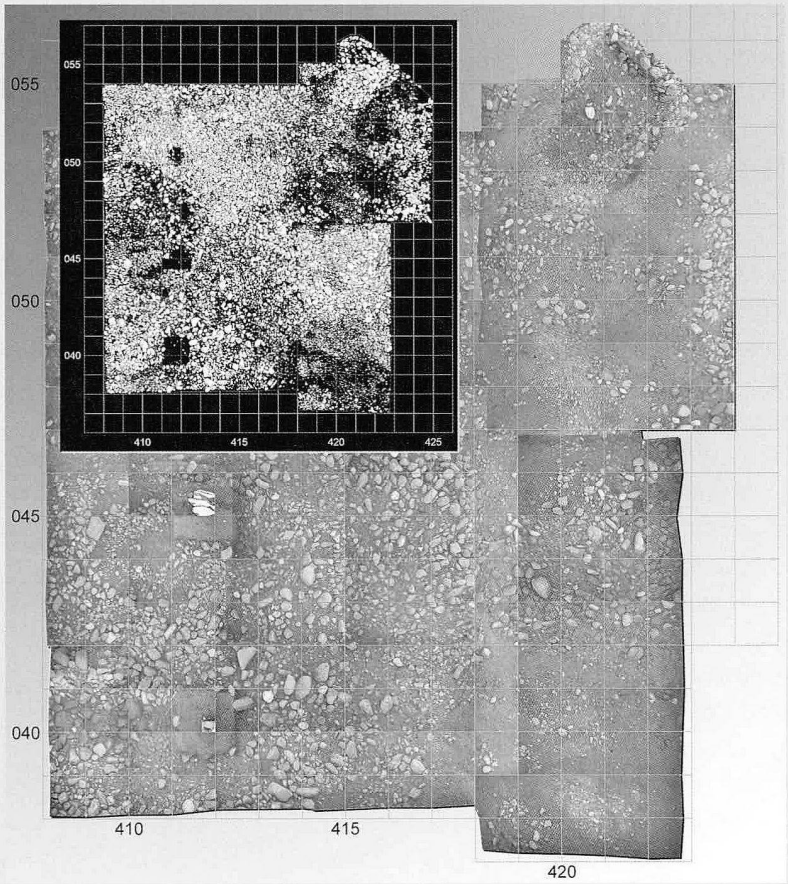
Il faut distinguer deux domaines selon la distance depuis laquelle le sujet est relevé. A longue distance, la photogrammétrie est un outil utilisé à des fins de cartographie ou de modélisation topographique; les clichés photogrammétriques sont alors effectués depuis un avion. A courte distance, elle est surtout mise en œuvre pour relever très précisément des monuments, des façades de bâtiments, des parois, des sculptures ou des bas-reliefs. Pour des travaux très précis, elle nécessite un matériel photographique spécialisé.

Les fichiers résultant d'un relevé photogrammétrique professionnel, effectué par une entreprise spécialisée, ne peuvent être pleinement exploités qu'à l'aide de logiciels adéquats. Les archéologues ne disposent pas forcément de ces derniers, ce qui limite l'utilisation de cette technique. A l'exception du domaine des relevés de monuments historiques, la photogrammétrie est donc rarement mise à contribution en archéologie, car elle nécessite des connaissances techniques pointues pour obtenir des résultats tridimensionnels de très haute qualité. Toutefois, le principe de la pho-

L'orthophotographie numérique

Durant les dernières années, la photographie numérique a été mise à contribution dans plusieurs projets archéologiques pour seconder, voire remplacer les relevés de plans et de profils. Dans le canton de Vaud, on a procédé, sur les fouilles autoroutières des sites d'Onnens, à des relevés photographiques systématiques des surfaces fouillées, par mètre carré. Les clichés étaient directement transmis à des graphistes qui effectuaient une rectification manuelle de la perspective sur ordinateur. Les vues des mètres carrés étaient ensuite assemblées à l'échelle en mosaïques d'images, puis transmises aux dessinateurs qui les utilisaient comme support pour tracer les plans manuellement.

Sur certaines fouilles du projet archéologique H189 Bulle – La Tour-de-Trême, une technique similaire a été mise en œuvre avec succès en 2003. Des clichés numériques des surfaces décapées étaient réalisés, chaque image couvrant une surface variant entre 1 et 8 m^2. Sur l'ordinateur portable du chantier, les images étaient géoréférencées individuellement dans un logiciel de DAO. Ce processus permet d'attribuer des coordonnées géographiques absolues à quelques points de référence visibles sur les photos. Le programme déforme ensuite l'image originale de manière à éliminer les effets de la perspective; chaque point de la photo retrouve alors son emplacement absolu. La mosaïque orthonormée des images rectifiées était ensuite assemblée à l'écran et imprimée à l'échelle 1:20. Les mesures d'altitudes et les limites sédimentaires ou structurelles étaient relevées directement sur ces impressions. Sur quelques secteurs du chantier de La Tour-de-Trême/A la Lêvra, cette technique a permis la fouille d'une surface de près de 800 m^2 (50 décapages répartis dans quatre secteurs) sans recourir au dessin de plans. Dans l'ensemble, cette procédure a permis d'accélérer la conduite de la fouille en économisant de nombreux jours de relevé manuel. Les plans définitifs ont finalement été mis au net par un graphiste après la fouille, directement à partir des mosaïques de photos rectifiées. La même technique a été plus tard appliquée avec succès à des relevés de plans et de profils stratigraphiques lors de certaines interventions du projet archéologique H189 ainsi que sur d'autres fouilles cantonales.



togrammétrie, allié à la photographie numérique, peut être exploité pour effectuer des relevés orthophotographiques sur le chantier de fouille. Cette application peut, dans bien des cas, rendre de précieux services en limitant le temps nécessaire au relevé manuel des plans de décapages.

Le tachéomètre laser et la station totale

Le tachéomètre (fig. 18), qui remplace parfois le théodolite sur le terrain, est un instrument mesurant non seulement des angles horizontaux et verticaux (comme le théodolite classique), mais également la distance entre l'appareil et une cible grâce à un télémètre à infrarouge ou à un laser intégré. Les mesures ne sont plus lues sur des graduations mécaniques, mais s'affichent sur un écran à cristaux liquides. Le théodolite nécessitait quelques connaissances théoriques et techniques pour être mis en œuvre de manière précise. Le tachéomètre est d'une technicité comparable, bien que la composante électronique ait multiplié ses possibilités d'application et de calcul. C'est un outil qui trouverait de nombreux usages sur une fouille archéologique. Toutefois, il est plus souvent utilisé pour placer des points de références que pour réaliser des relevés de structures archéologiques.

La station totale est une évolution du tachéomètre. Elle permet d'effectuer les mêmes types de travaux, mais dispose en plus d'une mémoire interne pour stocker de nombreuses mesures que l'on peut ensuite exporter directement vers un ordinateur. Certains modèles peuvent être télécommandés, ce qui permet à un seul opérateur de faire des levés; plus techniques et plus onéreux, ils sont rarement utilisés dans le domaine archéologique. Les modèles les plus récents sont munis d'antennes (GPS, GSM, etc.) grâce auxquelles la position absolue de l'instrument est calculée. L'avantage de ces appareils réside dans la possibilité de générer automatiquement des mesures tridimensionnelles en coordonnées absolues.

Les applications archéologiques possibles pour les tachéomètres ou les stations totales sont innombrables. Outre l'implantation de points de référence, ces instruments permettraient d'effectuer directement des relevés de décapages ou de structures. Les points et vecteurs mesurés seraient transmis à l'ordinateur grâce auquel les relevés seraient complétés, par exemple à partir d'orthophotographies. Les principaux obstacles à une utilisation plus fréquente de ces instruments sur les fouilles archéologiques sont les coûts d'acquisition et d'entretien de l'appareillage, ainsi que les compétences techniques requises. Une planification spécifique et à long terme de ces ressources, procédures et contraintes est donc indispensable pour faire profiter l'archéologie de ces nouveaux moyens technologiques.

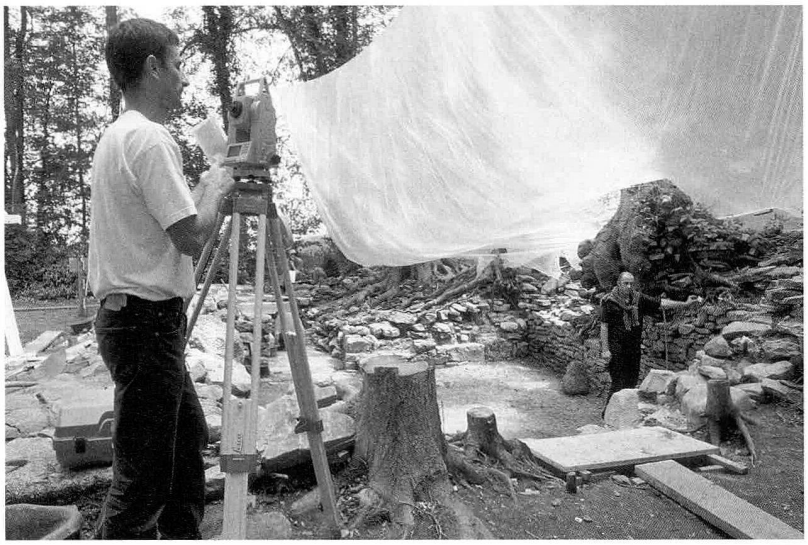


Fig. / *Abb.* 18
Mensuration au tachéomètre de vestiges architecturaux du Moyen Age à Bossonnens
Tachymeter-Vermessung von mittelalterlichen Architekturresten in Bossonnens

Le scanner laser 3D terrestre

Comme nous sommes convaincus que le scanner laser 3D est une technologie appelée à jouer un rôle de plus en plus important en archéologie, nous le présentons un peu plus en détail. Initialement développée pour la métrologie industrielle, la mesure au laser a rapidement trouvé de nouveaux champs d'application. Le scanner 3D terrestre est un exemple d'instrument très perfectionné utilisant plusieurs déclinaisons de cette technologie.

Le principe de base des mesures par scanner laser 3D est le suivant. Un faisceau laser est émis dans une direction précise par l'instrument et un chronomètre s'enclenche. Dès que le faisceau atteint un obstacle, il est renvoyé vers l'instrument sous la forme d'une réflexion plus ou moins intense selon la nature de l'obstacle. Un capteur de l'instrument réceptionne cette réflexion et arrête le chronomètre. La vitesse du rayon étant connue, le temps mis pour faire l'aller-retour permet de calculer la distance entre instrument et obstacle. La direction de l'émission étant également connue, il est alors possible de calculer la position tridimensionnelle de l'obstacle. Le scanner émet ainsi des millions d'impulsions dans toutes les directions, ce qui permet d'enregistrer la position de millions de points dans l'espace situé autour de l'appareil. Le résultat de la mesure, obtenu en quelques minutes, est appelé un «nuage de points».

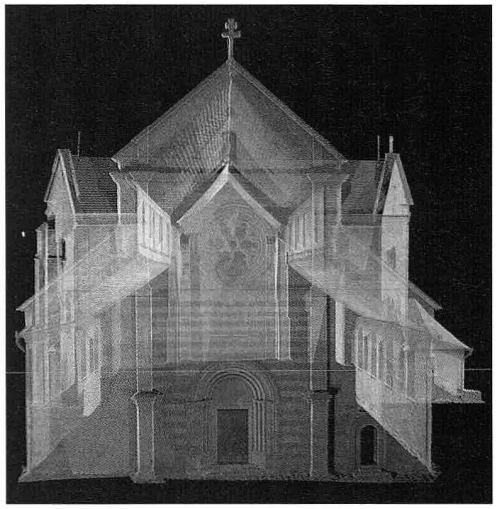


Fig. / *Abb.* 19
Nuage de points de l'église médiévale de Belapatfalva, Hongrie, mesurée par scanner laser 3D (Budapest, Burken Kft)
Mit einem 3D-Scanner aufgenommene Punktwolke der mittelalterlichen Kirche von Belapatfalva, Ungarn (Budapest, Burken Kft)

Selon la distance maximale de mesure et la précision voulue, plusieurs types de scanner 3D sont disponibles. Certains instruments enregistrent des objets placés à quelques mètres avec une précision submillimétrique alors que d'autres mesurent à quelques centimètres près des surfaces éloignées de plusieurs centaines de mètres. A environ 50 m de distance, la précision de mensuration est de ± 2-4 mm.

Les données sont généralement enregistrées sur un ordinateur portable couplé au scanner, mais dans certains cas, un support de mémoire amovible est inclus dans l'appareil (carte mémoire ou disque dur). Le pilotage du scanner se fait par l'intermédiaire d'un logiciel. Une fois lancé, le scanner travaille sans intervention de l'opérateur jusqu'à ce que le relevé soit terminé. En multipliant les emplacements de mesure, on obtient plusieurs nuages de points couvrant toute la surface d'un objet qui sont ensuite assemblés par des procédures automatiques pour former l'enregistrement tridimensionnel de l'objet, comme sur cette vue de l'église de Belapatfalva en Hongrie (fig. 19)[24].

La résolution du nuage de points, soit le nombre de points par unité de surface, est généralement inférieure à 1 cm (une surface de 1 x 1 m sera donc représentée par environ 10'000 points tridimensionnels). Il n'est pas rare que le résultat final comprenne plusieurs millions de points. Cette quantité très importante de données, difficilement exploitable telle quelle, nécessite un post-traitement informatique. Ce dernier consiste à éliminer les points redondants, puis à créer un modèle 3D surfacique formé de petits triangles reliant tous les points. Certaines surfaces uniformes du modèle peuvent ensuite subir des simplifications de manière à limiter le nombre de triangles, et par là même, la quantité des données. Les surfaces mesurées qui ne font pas partie du sujet peuvent évidemment être supprimées. Au final, on dispose d'un premier modèle tridimensionnel très précis.

La plupart des scanners 3D mesurent également l'intensité de la réflexion, ce qui permet d'enregistrer, pour chaque point, une donnée colorimétrique. Cette donnée peut être exploitée pour explorer le nuage de points, mais aussi pour colorier les petits triangles du modèle surfacique. Comme la luminosité des points ne dépend pas de l'ensoleillement ambiant mais de la lumière émise par le scanner, le modèle obtenu n'est pas altéré pas les ombres et la nature des matériaux se reflète de manière différenciée.

Le réalisme peut aller encore plus loin: nombre de scanners 3D intègrent un capteur d'image numérique (photographique ou vidéo). L'appareil enregistre ainsi des images de tous les angles de vue du scanner. Ces images peuvent ensuite être drapées avec une haute précision sur le modèle tridimensionnel (fig. 20).

Si la réalisation d'un modèle 3D peut être un but en soi, le système est surtout intéressant par le fait qu'il permet de réaliser, *a posteriori*, toutes sortes de relevés très précis à partir du modèle: relevés orthophotographiques d'élévations, plans détaillés, coupes verticales ou horizontales, courbes de niveau, etc. Des mesures peuvent être effectuées directement sur le modèle 3D ou sur les produits dérivés (distances horizontales, verticales ou obliques, altitudes, angles, etc.), ce qui rend caduque la prise de mesures sur le terrain. Plusieurs modèles 3D d'une même zone,

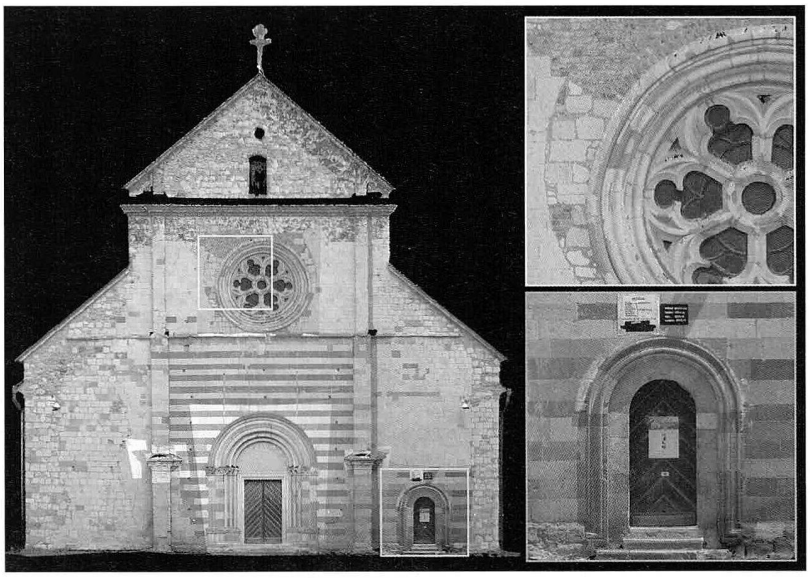


Fig. / *Abb.* 20
Drapage de photographies numériques sur le modèle tridimensionnel de l'église de Belapatfalva, Hongrie, permettant de réaliser des relevés orthophotographiques de haute précision (Budapest, Burken Kft)
Dreidimensionales Modell der Kirche von Belapatfalva, Ungarn, auf Grundlage eines mittels digitaler Fotografie erstellten, präzisen orthofotografischen Planes (Budapest, Burken Kft)

par exemple avant et après un creusement ou un terrassement, permettent de calculer automatiquement le volume extrait ou accumulé. Les produits dérivés peuvent servir à réaliser des mises au net extrêmement précises, même lorsqu'on n'a plus accès au terrain.
Le scanner 3D, par les possibilités de traitement *a posteriori*, permet donc de libérer très rapidement le terrain pour d'autres travaux. Cet avantage a rapidement été reconnu en archéologie, puisque la documentation des surfaces «immobilise» toujours le terrain pendant un certain temps, ce qui peut poser des problèmes lors de certaines interventions de sauvetage. Le scanner 3D offre là des opportunités d'enregistrer une documentation très précise en un temps limité. Les autres avantages reconnus pour l'archéologie résident dans la possibilité de mesurer des surfaces sans qu'aucun contact physique ne soit nécessaire, dans la précision des mesures, dans l'intégration étroite de la photographie en couleur, dans la possibilité de distinguer différents matériaux en fonction de leur réflectivité, dans la variété des distances depuis lesquelles les mesures peuvent être effectuées, etc. Le fait que le scanner 3D soit un équipement spécialisé, très technique, nécessitant une manipulation par un personnel entraîné (une personne suffit généralement) constitue par contre un inconvénient. De plus, cette technique génère de grandes quantités de données nécessitant des logiciels spécifiques et une infrastructure informatique conséquente. Enfin, son coût élevé semble difficilement conciliable avec les budgets archéologiques.

De nombreuses applications peuvent être envisagées en archéologie avec cette technique d'acquisition de données. Certaines ont déjà fait l'objet de tests, avec des résultats très positifs et prometteurs. Au Royaume-Uni, les ruines médiévales sont fréquemment les cibles du scanner 3D[25]. En France, la grotte Cosquer a été numérisée en trois dimensions[26]. En Allemagne, ce sont des fouilles en milieu urbain qui ont été documentées systématiquement à l'aide d'un scanner 3D[27]. En Italie, une équipe américaine s'est intéressée à la statuaire de Michel-Ange à Florence[28]. Le Parthénon de l'acropole d'Athènes[29], le temple égyptien d'Opeth à Karnak[30], la statue du Colosse d'Alexandrie[31], toutes sortes de sites archéologiques et de monuments ont été abordés, dans des conditions variées, avec cette technique nouvelle. Ces exemples, utilisés comme arguments promotionnels par les fabricants de scanner 3D, sont porteurs d'une image positive pour cette technologie.
L'application de cette technologie est encore balbutiante en Suisse au vu du nombre d'expériences réalisées. Dans le contexte des fouilles archéologiques, le scanner 3D est parfois mis en œuvre pour relever l'état précis d'un vestige exceptionnel. Son potentiel comme outil d'enregistrement systématique de la fouille archéologique n'est pas reconnu et c'est probablement dans cette perspective qu'il pourrait jouer un rôle de premier plan à l'avenir. Une telle approche apporterait non seulement des avantages indéniables en termes de précision, de fiabilité, de possibilités d'exploration et de contrôle *a posteriori*, de productivité et de rapidité de mise en œuvre, mais révolutionnerait probablement aussi la manière d'appréhender la recherche archéologique, tant sur le terrain qu'au laboratoire.

Les nouvelles données à exploiter

Le nombre de sources de données stockées sur des serveurs centralisés augmente sans cesse: plans cadastraux, limites communales, biozones, risques naturels, etc. Ces données sont généralement disponibles pour les archéologues par l'intermédiaire de serveurs spécifiques. En outre, certaines sources de données particulières, les modèles numériques d'altitude, révolutionnent l'approche topographique en archéologie.

Les modèles numériques de terrain de résolution faible à moyenne

L'archéologie utilise constamment des références topographiques, que ce soit pour ancrer la fouille dans le terrain actuel ou pour tenter de reconstituer la topographie ancienne d'un site archéologique. Il y a quelques années encore, les données topographiques devaient être extraites des cartes nationales ou alors relevées manuellement sur le terrain. L'avènement des modèles numériques d'altitude (MNA) offre une alternative bienvenue en permettant d'accéder à des données altitudinales de plus en plus nombreuses et précises.
Un MNA est une représentation topographique dans laquelle les données altimétriques sont agencées en une grille régulière que l'on exploite à l'aide de logiciels spécifiques. Parmi les utilisations possibles figurent l'extrapolation de courbes de niveau, la modélisation 3D, l'ombrage du relief, la mesure d'altitudes en des

points donnés, la mise en évidence de tranches d'altitudes définies, ainsi que le calcul de la valeur des pentes ou de leur orientation.

Le premier modèle numérique d'altitude d'origine helvétique, développé en 1965 à des fins militaires et couvrant l'ensemble du territoire Suisse, s'appelle RIMINI. Les altitudes, extrapolées depuis les cartes nationales au 1:25'000, sont espacées de 250 m dans l'espace horizontal et leur précision n'est pas très élevée. Ces limitations restreignent fortement son utilité pour l'archéologie. Les applications envisageables se réduiront donc à des études à l'échelle du pays ou d'une région, par exemple dans le cadre d'analyses des modes d'occupation du territoire. Malgré son ancienneté et sa faible précision, le modèle RIMINI est encore commercialisé par Swisstopo.

Le second MNA développé entre 1981 et 1987 (avec une actualisation en 2000) et commercialisé par Swisstopo est également constitué d'altitudes tirées des cartes nationales à l'échelle 1:25'000. Il est dénommé MNA25, car sa résolution horizontale est d'un point d'altitude tous les 25 m en abscisse et en ordonnée, soit un point pour 625 m². Sa précision est limitée à ± 1,5 m en plaine et à ± 3 m dans les Alpes. Couvrant l'ensemble de la Suisse, ce modèle est utile pour des applications à l'échelle régionale, mais pas pour des analyses à l'échelle locale par manque de résolution et de précision.

D'autres données altimétriques, extraites de modèles élaborés à l'étranger par d'autres méthodes, sont disponibles pour la Suisse. Le modèle dénommé GTOPO30 couvre le monde entier et est accessible gratuitement sur internet[32]. Produit entre 1993 et 1996 par l'*U.S. Geological Survey* à partir de plusieurs sources de données, sa résolution horizontale est d'environ une altitude par kilomètre et sa précision verticale très variable d'une région du monde à l'autre. Il ne se prête donc guère qu'à des applications nationales ou suprarégionales. SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) est un modèle américain développé à partir de 2000 dans lequel les altitudes de la surface de la Terre ont été mesurées en une dizaine de jours par radar depuis la navette spatiale *Endeavour*. La précision altimétrique moyenne du modèle est de ± 2 m pour l'Europe. Une grille de 90 m de résolution, disponible pour le monde entier entre 60 degrés de latitude Nord et 56 degrés de latitude Sud, est gracieusement mise à disposition du public depuis septembre 2003 et est accessible par internet auprès de l'*U.S. Geological Survey*. Il s'agit là du modèle le plus précis disponible gratuitement pour la Suisse.

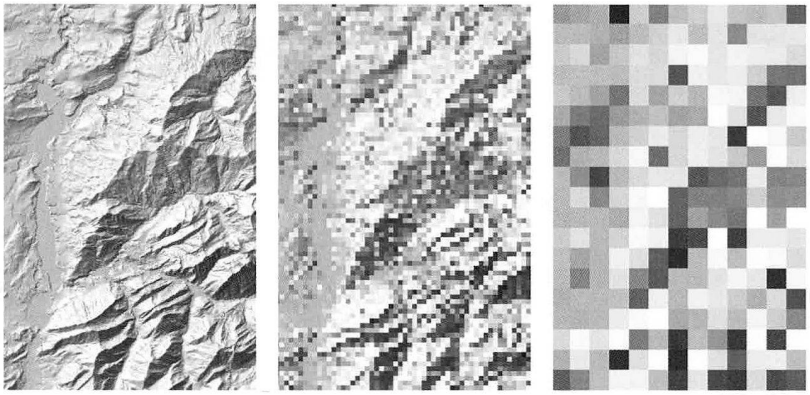
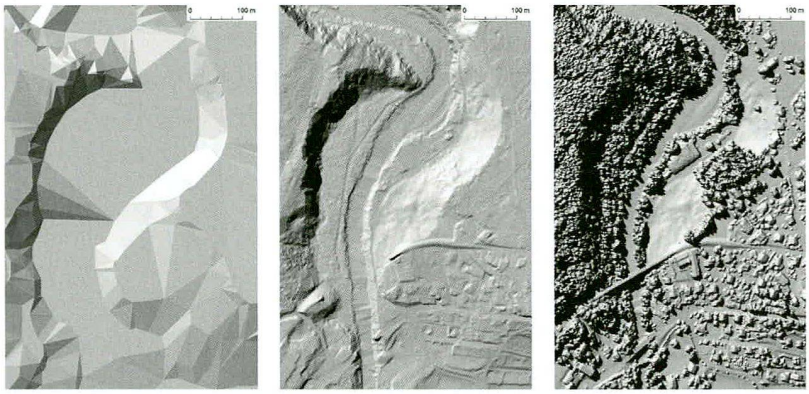


Fig. / *Abb.* 21
Résolution des modèles numériques d'altitude déterminant les échelles représentables (exemple d'une région de 13 x 19 km)
Verschieden hohe, den darstellbaren Massstab bestimmende Auflösungen digitaler Höhenmodelle (Beispiel eines Geländes von 13 x 19 km)

Les modèles numériques d'altitude mentionnés ci-dessus se prêtent bien à des études archéologiques réalisées à vastes échelles (territoire européen, suisse, cantonal, voire régional), mais pas à des projets nécessitant des références altimétriques précises. On se rend d'ailleurs aisément compte de leurs limites en plaçant côte à côte la topographie ombrée d'une région avec différentes résolutions (fig. 21). Il serait par exemple vain de tenter de détecter des anomalies topographiques sur ces modèles, à moins qu'elles ne soient vraiment de très grandes dimensions (enceintes fortifiées modernes, buttes médiévales, aménagements périurbains gallo-romains, éventuellement éperons barrés protohistoriques ou oppida celtiques). Par contre, les quantités de données relativement limitées permettent de manipuler facilement ces modèles numériques d'altitude.

Les modèles numériques de terrain de haute résolution

Entre 2000 et 2002, une série de survols systématiques de la Suisse a été réalisée pour développer un modèle numérique d'altitude de haute résolution. La technique utilisée, dénommée LIDAR (*Light Detection and Ranging*), est similaire à celle du scanner laser 3D. Un système laser émet des impulsions lumineuses vers une cible tandis qu'un télescope se charge de recevoir les réflexions de ces impulsions. Un système informatique analyse ensuite les signaux reçus et calcule les distances des cibles touchées par le laser. La direction d'émission et la position des instruments étant connues, il est alors possible d'enregistrer un modèle tridimensionnel du terrain analysé. L'avantage du LIDAR est la portée de détection



25 m 1 m 1 m

Fig. / *Abb.* 22
Modèles numériques de terrain; a) MNA 25; b) MNT, sans végétation ni bâtiment; c) MNS, avec végétation et bâtiment
Digitale Geländemodelle; a) MNA; b) MNT, ohne Vegetation und Bebauung; c) MNS, mit Vegetation und Bebauung

atteignant plusieurs centaines de mètres. L'avion, dans lequel avait été embarqué le système laser pour réaliser la couverture de la Suisse, volait à environ 900 m au-dessus du sol. Une autre particularité de ce système de mesure réside dans la dimension du rayon émis, qui était de l'ordre de 30 cm au sol. Ce large rayon peut intercepter plusieurs obstacles à des altitudes différentes au cours de sa descente vers le sol. Le système calcule ainsi non seulement l'altitude du sol (dernière réflexion lumineuse), mais également les altitudes des différents obstacles (feuillages, câbles électriques, poteaux métalliques, etc.).

Deux modèles numériques altitudinaux différents ont été créés à partir de ces mensurations. Le premier, intitulé modèle numérique de surface (MNS), est une représentation de la topographie du paysage «tel quel», c'est-à-dire avec sa couverture végétale et ses aménagements humains permanents. Le second s'appelle modèle numérique de terrain (MNT) et représente la topographie du sol sans couverture végétale et sans aménagements anthropiques. La résolution de ces modèles est très élevée, puisque les grilles produites contiennent une cote par mètre carré (fig. 22). La précision absolue des altitudes au sol est de ± 50 cm en plaine, celle de la couverture végétale de ± 1,5 m. Cependant, la précision relative entre points voisins est de ± 1,5 cm, ce qui autorise de nombreuses applications locales.

Une couverture photographique a été réalisée en même temps que les mesures LIDAR, ce qui permet de multiplier les observations possibles. Ces photographies peuvent également être utilisées pour draper des modèles 3D de la topographie.

Le principal inconvénient des modèles de haute résolution est la quantité de données à manipuler. Un secteur de 1 km² contient un million de valeurs altitudinales. La couverture cantonale fribourgeoise (1671 km²) totalise donc plus d'un milliard et demi de cotes! Pour faciliter leur manipulation, les données sont subdivisées en «catelles» de 4375 x 3000 m contenant environ 13 millions d'altitudes.

Les données MNS et MNT sont commercialisées par Swisstopo. Toutefois, la couverture de la Suisse a été réalisée dans le cadre d'un mandat donné à la fois par la Confédération et les cantons, ce qui permet aux administrations cantonales d'en disposer.

Les services que peuvent rendre ces modèles numériques de haute résolution sont multiples. Dans le domaine de la prospection, la résolution et la précision sont suffisantes pour détecter des anomalies topographiques locales (petites buttes et monticules, légères ruptures de pente, dépressions, etc.) qui peuvent être dues à des aménagements anciens. Cette exploration à distance est aussi possible dans des zones difficiles d'accès (forêts denses, zones très pentues, etc.). Les microreliefs situés dans les forêts sont également observables. Dans le domaine de la fouille archéologique, la précision relative locale du MNT permet d'économiser de nombreuses mesures topographiques manuelles pour autant que le modèle numérique soit calibré à l'aide d'altitudes absolues fournies par un géomètre. Dans celui de la géomorphologie, le MNT peut servir de base pour étudier la mise en place des différentes unités paysagères et sédimentaires locales au cours du temps, ainsi que pour modéliser des ruissellements superficiels. Il est évidemment possible d'extrapoler des courbes de niveau ou d'extraire des altitudes ponctuelles de ces modèles à tout instant, mais leur grand intérêt réside surtout dans les nouvelles approches analytiques qu'ils permettent, comme la détection semi-automatique d'anomalies topographiques ou la mise en évidence des zones offrant certaines conditions géographiques et topographiques (pente, ensoleillement à une certaine époque de l'année, distance-effort au cours d'eau le plus proche, etc.). Grâce à ces approches, il est possible de développer des stratégies de prospection novatrices, notamment en ce qui concerne l'occupation pré- et protohistorique du paysage. Les modèles numériques d'altitude de haute résolution permettront également le développement de modèles théoriques plus proches de la réalité. Finalement, ils représentent aussi un écrin tridimensionnel dans lequel les données archéologiques peuvent être présentées au public de manière plus attractive ou plus interactive.

Les nouvelles solutions logicielles

Les logiciels informatiques permettant de résoudre des tâches spécifiques sont innombrables et variés, ce qui peut parfois poser des problèmes lorsqu'il s'agit de mettre en place des procédures de traitement de données. Certaines solutions logicielles s'imposent toutefois comme des outils incontournables par la richesse des possibilités offertes pour résoudre des problèmes très diversifiés. C'est indubitablement dans cette catégorie qu'il faut notamment classer les logiciels permettant de réaliser des systèmes d'information géographiques.

Les systèmes d'information géographiques

Aujourd'hui, la quantité et la variété des informations numériques qui doivent être stockées et exploitées sont gigantesques. Les outils de création et de gestion de bases de données sont de plus en plus utilisés partout et l'archéologie ne fait pas exception à cette tendance. C'est ainsi que nous passons rapidement d'un âge des listes à une ère des tables de données. Toutefois, cette facilité avec laquelle il est aujourd'hui possible de saisir et de stocker des données est en contradiction avec les difficultés parfois rencontrées lorsqu'il s'agit de les exploiter de manière efficiente. Vu ces difficultés, nombre d'informations enregistrées restent inutilisées lors de l'élaboration des données archéologiques. Nous n'allons pas nous étendre ici sur le développement historique des «banques de données» depuis les années 1960, sur leurs échecs et leurs succès ou sur les manières idéales d'organiser des bases de données. Toutefois, nous devons aborder quelques concepts directement liés à ce domaine dans la présentation d'un outil qui révolutionne la gestion du patrimoine archéologique: le système d'information géographique.

Par définition, un système d'information géographique (SIG) est un outil informatique permettant de saisir, d'explorer, de gérer, d'analyser et d'afficher des données localisées géographiquement. Il s'agit donc d'un outil de cartographie informatisé dans lequel chaque élément de la carte est en relation avec les informations d'une base de données. La gestion du cadastre est un exemple relativement simple illustrant le principe d'un SIG: chaque limite cadastrale qui s'affiche à l'écran sous forme de plan est directement liée avec les informations concernant la parcelle (numéro, nom du propriétaire, nom de l'exploitant, type d'affectation, etc.) stockées dans une table de données.

Entre carte archéologique et gestion des périmètres menacés: la gestion spatiale de l'archéologie fribourgeoise

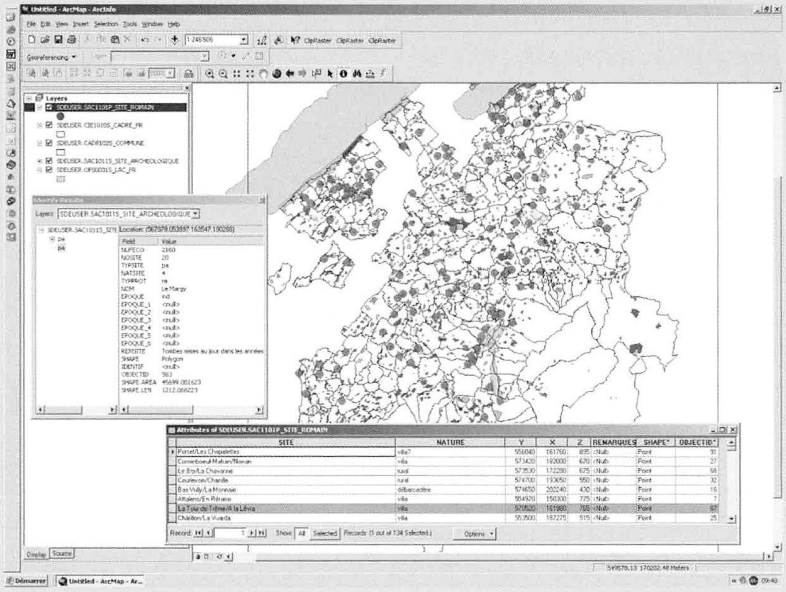
Les archéologues qui ont rédigé les anciennes cartes archéologiques du canton de Fribourg[33] ne disposaient d'aucun moyen technique spécifique. Ils ont composé leurs notices sur la base de la documentation à disposition et les ont complétées par leurs notes personnelles. Les cartes accompagnant leurs ouvrages ont été dessinées à la main; elles ne constituaient pas un outil de gestion, mais reflétaient simplement l'état de la recherche à l'époque.

Aujourd'hui, une partie des données archéologiques est informatisée et sa gestion est assurée par un système d'information géographique dans lequel des périmètres archéologiques sont reliés aux descriptions stockées dans une base de données. Le système permet de recueillir plus facilement les informations nécessaires pour émettre les préavis dans le cadre des procédures de mise à l'enquête.

Toutefois, ce système est actuellement limité à cette tâche et ne permet pas de gérer l'ensemble des données archéologiques cantonales. Le développement d'un nouvel outil, servant à la fois d'instrument de gestion des zones menacées, mais aussi de système d'information archéologique est actuellement en cours de planification. Il devrait intégrer les aspects suivants:

- archéologique: matériel, structures, sites
- historique: archives photographiques, cartographiques, littérales, épistolaires
- géographique: cartographie, topographie, sédimentologie, hydrographie, etc.
- administrative: cadastre, réseau routier, frontières administratives
- opérationnelles: ramassages de surface, sondages, fouilles, surveillances de chantiers

Un tel système, alimenté de manière dynamique, permettra d'aborder de manière plus optimale et intégrée la gestion et l'analyse du patrimoine archéologique. A l'avenir, l'introduction de modèles prédictifs, calculant le «risque archéologique» encouru par une zone donnée en fonction de différentes variables, pourrait éventuellement être envisagée pour servir d'outil complémentaire d'aide à la décision.



Les capacités des logiciels de SIG actuels permettent d'importer une très large variété de données de formats différents. Chaque type d'information est enregistré dans une couche spécifique dont l'affichage peut être activé ou désactivé au besoin (fig. 23). Toute information ou donnée est traitée dans un cadre géoréférencé, c'est-à-dire que tout élément que l'on veut intégrer au système doit être en relation avec des coordonnées absolues ou avec d'autres données géoréférencées. Les entités typiquement manipulées dans un SIG sont

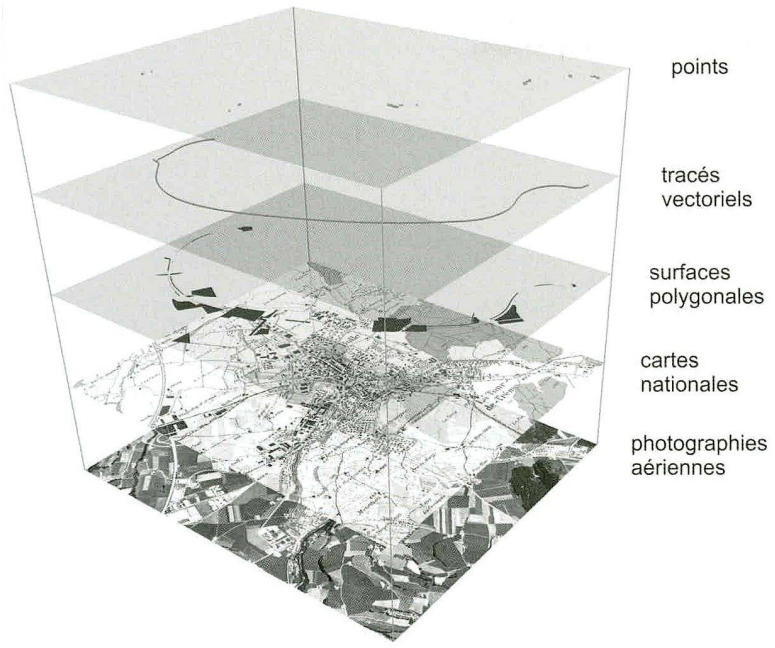


Fig. / *Abb.* 23
Dans un système d'information géographique, chaque type de donnée est stocké dans une couche spécifique
Im Geografischen Informationssystem wird jeder Datentyp in einer eigenen Ebene gespeichert

les points, les lignes, les surfaces, ainsi qu'une multitude de fichiers graphiques de formats variés (cartes digitalisées, photographies aériennes, images de satellites, modèles numériques d'altitude, etc.). La plupart des SIG permettent d'extraire, d'insérer et de modifier directement des informations de bases de données externes, ce qui en fait un puissant outil de visualisation, d'analyse et de gestion.

Les SIG sont actuellement utilisés couramment dans plus en plus de domaines de l'économie, de la recherche et de l'administration. Ils trouvent des applications innombrables dans toutes les disciplines qui nécessitent de gérer et d'analyser un grand nombre de données réparties spatialement (cartographie, recensements, scrutins démocratiques, épidémiologie, réseaux de télécommunication, stockage et transport de marchandises, etc.).

Usages et implications des SIG en archéologie

En archéologie, les analyses spatiales se développent et se diversifient depuis les années 1950. Elles sont d'une grande utilité dans de nombreux domaines, que ce soit à l'échelle régionale (répartition spatiale des sites, peuplement du territoire, carte archéologique), à l'échelle locale (répartition des vestiges, organisation spatiale d'un site) ou à l'échelle de la structure (répartition spatiale du matériel ou de la faune, relation entre des fragments d'objet, variation de densités de vestiges, etc.). Toutefois, avant l'avènement des systèmes d'information géographiques, il n'existait pas de plateforme informatique spécifiquement dédiée à ces approches qui devaient donc être réalisées manuellement. Certains archéologues ont rapidement reconnu que les approches de type SIG offraient une vaste panoplie d'outils susceptibles non seulement de simplifier leurs analyses spatiales, mais aussi de permettre de nouveaux types d'études.

Les chercheurs américains ont largement puisé dans ces outils pour développer des modèles hypothétiques et les confronter à leurs données archéologiques[34]. Pour cela, ils ont cherché à corréler des variables concernant le milieu naturel (topographie, couverture et qualité des sols, réseau hydrographique, ressources naturelles, etc.) avec des répartitions de sites pour tenter de déterminer les relations éventuellement entretenues entre les populations humaines et leur milieu. Ils ont également utilisé ces corrélations pour développer des modèles prédictifs susceptibles de localiser des sites archéologiques non encore découverts. Ces approches sont aujourd'hui employées de plus en plus fréquemment par certains organismes archéologiques au Royaume-Uni, au Pays-Bas, et, depuis peu, en France, même si elles ne sont pas encore approuvées de manière consensuelle par toute la communauté scientifique[35].

En Europe, l'histoire de la recherche et les traditions scientifiques induisent un autre type d'usage des SIG[36]. Les capacités des nouveaux outils permettent avant tout de gérer plus facilement l'ensemble des données archéologiques avec lesquelles le chercheur tente de développer empiriquement une théorie explicative. Ainsi, le SIG est de plus en plus souvent mis en œuvre au niveau du site ou de la structure lors de l'élaboration des données, ce qui permet notamment de mettre en relation des plans de vestiges et des cartes de répartition de matériel avec des informations descriptives ou contextuelles (fig. 24). A une échelle plus large, le SIG sert surtout à gérer la carte archéologique d'une région, mais n'est pas utilisé pour faire des prédictions quantitatives sur les vestiges restant à découvrir.

Toutefois, les deux écoles archéologiques (anglo-saxonne et européenne) trouvent, au travers de l'utilisation d'une plateforme informatique commune, des terrains de discussion, de confrontation ou de collaboration qui n'étaient pas envisageables il y a quelques années encore et qui permettent, dans certains cas, des rapprochements positifs. Ainsi, des approches hypothético-déductives longtemps honnies et décriées par les archéologues européens commencent à être utilisées dans des projets réels. Dans la vallée du

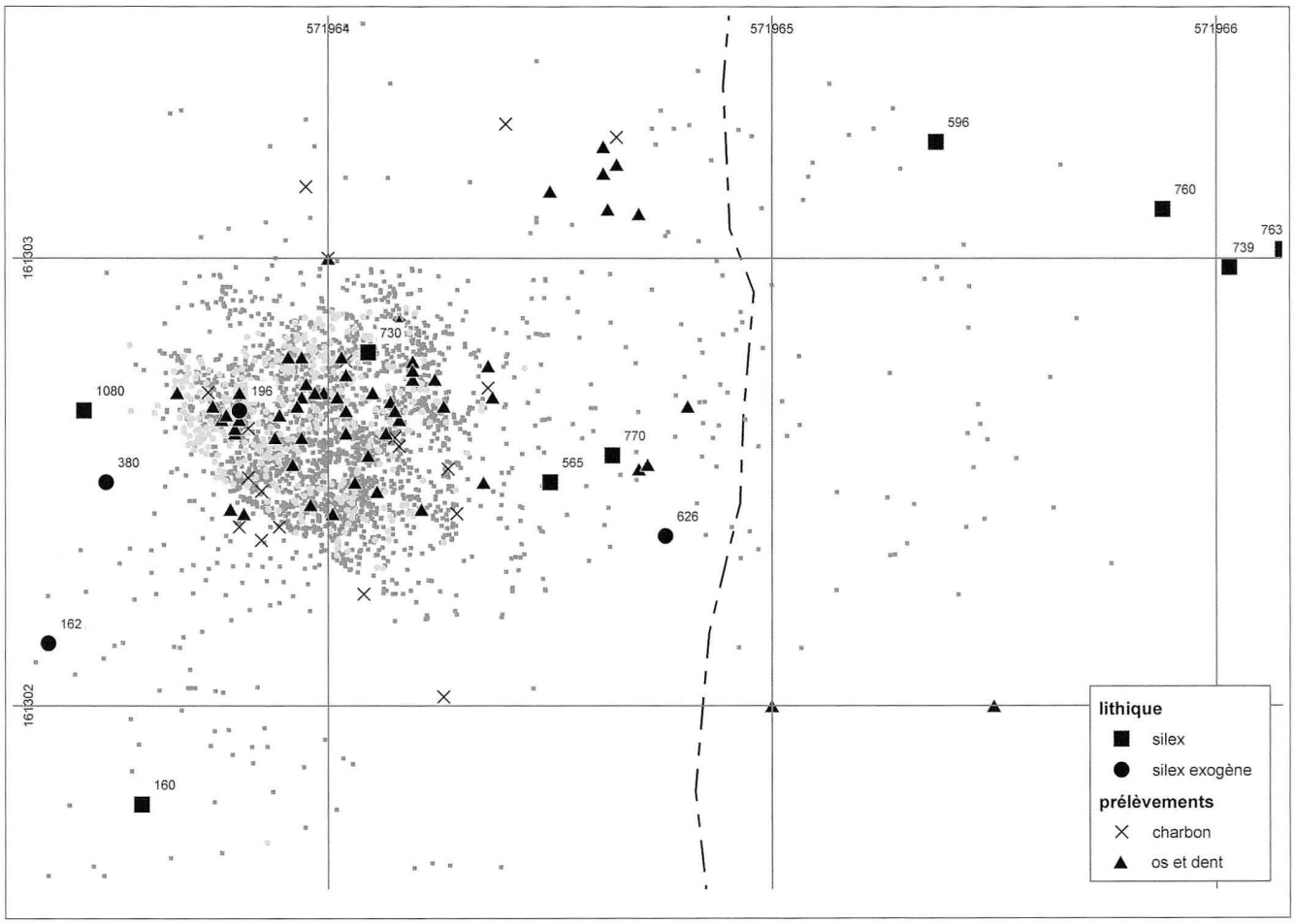


Fig. / *Abb.* 24
Analyse spatiale d'un foyer mésolithique d'après les informations stockées dans les bases de données d'inventaire
Raumanalyse einer mesolithischen Feuerstelle mittels der in den Inventardatenbanken gespeicherten Informationen

Rhône, les variables liées à la topographie, à la couverture actuelle du sol et à la géomorphologie sont utilisées pour prédire la présence de sites à différentes périodes[37]. Le potentiel archéologique des terrains néerlandais est sans cesse recalculé en fonction des derniers vestiges découverts pour planifier les interventions[38]. Ces expériences, parfois très prometteuses, sont de plus en plus nombreuses. Et si certaines d'entre elles resteront sans doute sans suite, d'autres sont susceptibles de réorienter de manière importante la recherche archéologique à venir.

Par la multiplicité des outils à disposition, les SIG peuvent paraître déconcertants de prime abord. Il est important de noter que c'est avant tout la démarche de l'archéologue qui détermine les outils à utiliser, et non l'inverse. Un SIG peut avoir plusieurs finalités. Il permet de saisir de nouvelles données (digitalisation de cartes ou de plans anciens) ou de gérer de manière efficace et centralisée des données à l'échelle d'un projet ou d'un canton (carte archéologique, gestion des interventions, centralisation de documentations et de résultats). Il peut être mis en œuvre pour analyser des données dans le cadre d'une élaboration (analyses spatiales) ou pour élaborer et tester des modèles théoriques. Il peut servir à produire des illustrations cartographiques standardisées, à créer des applications interactives pour le grand public ou à diffuser des résultats archéologiques sur internet.

Avant d'intégrer une approche par SIG dans une démarche archéologique, il est important de prévoir la forme qui sera donnée aux informations enregistrées. Des bases de données spécifiques doivent être élaborées et développées. La chaîne opératoire des dessinateurs, qui va du relevé de terrain à l'illustration publiée, doit être réaménagée pour que l'information graphique puisse être exploitée par le SIG au même titre que les bases de données. Le SIG est aussi un outil qui permet à plusieurs personnes d'exploiter simultanément les mêmes sources de données. Le renouvellement de l'organisation du travail permet à tous ceux qui doivent exploiter ces données (graphiques ou non) d'y accéder et de les mettre en forme selon leurs besoins spécifiques. Cette personnalisation n'est pas contraignante pour les autres utilisateurs, car elle ne touche que l'apparence des données. Dans l'ensemble, tous les acteurs de

l'archéologie gagnent à l'intégration des outils SIG. Enfin, par leur ouverture potentielle vers l'extérieur, ils peuvent aussi contribuer à faciliter les échanges d'informations avec d'autres domaines d'activités (urbanisme, planification, génie civil, ingénierie, enseignement, universités, etc.), ce qui permet à l'archéologie de se positionner en participant de manière dynamique à des réseaux socioprofessionnels.

L'archéologie au seuil d'une mutation

Durant son développement, l'activité archéologique a toujours su tirer parti des technologies employées dans d'autres domaines. Parfois, elle s'est distinguée en inventant des applications innovantes pour certaines techniques. L'évolution des technologies étant un phénomène continu qui tend à s'accélérer, nous disposons aujourd'hui d'une panoplie de plus en plus vaste d'instruments, de données numériques et de logiciels informatiques.

Certaines de ces technologies sont susceptibles de compléter, voire d'optimiser quelques-uns des processus traditionnels de la démarche archéologique. Leur mise en œuvre effective peut toutefois impliquer des changements dans l'organisation du travail.

Traditionnellement, l'essentiel du travail de terrain (fouille, relevé et documentation) se déroulait dans le secteur de fouille. Avec certaines technologies nouvelles, le passage entre la fouille et le bureau de chantier deviendra incontournable (redressement et impression de photographies numériques, traitement de nuages de points d'un scanner 3D, actualisation d'une base de données à partir d'une unité portable, etc.). Les tâches effectuées au bureau de chantier devront parfois être complétées dans le secteur de fouille (limites complémentaires à dessiner, encodage des unités stratigraphiques ou des structures, etc.). Actuellement, il n'existe aucune solution matérielle permettant d'éliminer complètement ces allers-retours. Vu que l'ordinateur est déjà souvent présent sur les fouilles pour des saisies d'inventaires, il est raisonnable de supposer que d'autres tâches informatisées seront à l'avenir réalisées sur le terrain.

L'archéologie, en tant que discipline de recherche et de gestion du patrimoine, rend périodiquement compte de ses résultats au public qui lui fournit les moyens de poursuivre ses activités. L'optimisation des processus, par l'accélération des flux entre les données enregistrées sur le terrain et l'information diffusée vers l'extérieur, permettra certainement d'améliorer la perception de l'archéologie par les sphères publique, politique et économique. L'assimilation d'approches technologiques nouvelles est susceptible d'y contribuer de manière très concrète.

NOTES

1 Photo libre de droit tirée de National Oceanic and Atmospheric Administration / Department of Commerce, Washington D.C., USA, Photo Gallery, références internet: www.photolib.noaa.gov/library/libr0027.htm.

2 Références internet: en.wikipedia.org/wiki/Theodolite, en.wikipedia.org/wiki/Jesse_Ramsden.

3 Herzig/Hochuli-Gysel 1998.

4 Archives de l'Etat de Fribourg, Protocole des séances de la Société Archéologique de Fribourg, 1826-1829.

5 La Gruyère illustrée, IV, fasc. I, 1890, 4-5.

6 Keller 1854.

7 Troyon 1860.

8 Mondenard 2002.

9 Référence internet: en.wikipedia.org/wiki/Photography.

10 Référence internet: fr.wikipedia.org/wiki/Photographie_a%C3%A9rienne.

11 Poidebard 1934.

12 Bandi 1942.

13 *Vermittlungsstelle für Fliegeraufnahmen*; Bandi 1945.

14 Référence internet: www.univie.ac.at/Luftbildarchiv/wgv/intro.htm.

15 Voir note 14.

16 Voir note 14.

17 Référence internet: www.swisstopo.ch/fr/neutral/en/about/history/2.html.

18 Bonstetten 1878.

19 Reichlen 1894-1895.

20 Peissard 1941.

21 Dessin assisté par ordinateur. Le programme mis en œuvre était Autodesk AutoCAD v. 14.

22 Merci à Michel Mauvilly et à Pascal Grand, SAEF, de leur collaboration lors de ces mensurations effectuées par une journée magnifique.

23 ArcTron GmbH à Altenthann D, référence internet: www.arctron.com.

24 Tous nos remerciements vont à Lajos Kandra, Managing Director de Burken Kft., Hongrie (référence internet: www.geovision.hu), d'avoir mis à notre disposition des illustrations concernant cette technique.

25 Carty/Goskar 2003.

26 Albouy 1997.

27 Neubauer n. d.

28 Projet conjoint des Universités de Stanford et de Washington, référence internet: graphics.stanford.edu/projects/mich.

29 Debevec 2005.

30 Chazaly/Laroze 2005.

31 Mention dans Albouy 1997.

32 Référence internet: edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/gtopo30.html.

33 Bonstetten 1878; Peissard 1941.

34 La *New Archaeology* anglo-saxonne a contribué à populariser les outils informatiques et les systèmes d'information géographiques permettant de développer et de tester ses modèles hypothético-déductifs. L'archéologie européenne, fidèle aux démarches empirico-inductives, utilisait alors l'ordinateur plutôt pour des travaux de classification, de typologie et de chronologie. Aujourd'hui, elle reconnaît que les SIG peuvent être utilisés de manière empirique ET hypothétique. Toutefois, on observe un certain retard en Europe dans l'adoption à large échelle de ces outils. Ce décalage semble en grande partie dû aux différences évolutives des deux écoles archéologiques et à un certain dogmatisme scientifique. Ces dernières années ont vu l'apparition de modèles probabilistes dans le cadre de projets français (Brandt *et al.* 2005, Carozza *et al.* 2005, Berger *et al.* 2005b). Voir Gallay 1986 pour des généralités sur ces questions et Djindjian 1991 pour les aspects plus techniques.

35 Un panorama international de l'adoption de ce type d'approche est disponible dans Berger *et al*. 2005a.

36 Voir note 34.

37 Berger *et al*. 2005b.

38 Verhagen *et al*. 2005.

BIBLIOGRAPHIE

Albouy 1997

M. Albouy, «Restitution en image de synthèse de la grotte Cosquer et du site de Marmaria à Delphes», *in*: Y. Desrichard (dir.), *Patrimoine et multimédia. Le rôle du conservateur*, Actes du colloque organisé à la Bibliothèque Nationale de France (Paris, 23-25 octobre 1996), Paris 1997, 87-93.

Bandi 1942

H.-G. Bandi, «Die Bedeutung von Fliegeraufahmen in der Urgeschichtsforschung», *Ur-Schweiz* VI.3, 1942, 33-35.

Bandi 1945

H.-G. Bandi, «Erfahrungen der Vermittlungsstelle für Fliegeraufnahmen», *Ur-Schweiz* IX.3, 1945, 49-58.

Berger *et al.* 2005a

J.-F. Berger – F. Bertoncello – F. Braemer – G. Davtian – M. Gazenbeek, *Temps et espace de l'Homme en société. Analyses et modèles spatiaux en archéologie*, Actes des 25ème Rencontres internationales d'archéologie et d'histoire (Antibes, 21-23 octobre 2004), Antibes 2005.

Berger *et al.* 2005b

J.-F. Berger – G. Davtian – N. Bernigaud – G. Gaucher – S. Bleu – R. Royet – B. Helly – P.-G. Salvador – A. Balbo – E. Poirson – S. Perrin-Toinin – M. Thévenin, «Un essai de modélisation prédictive du peuplement en haute vallée du Rhône», *in*: Berger *et al*. 2005a, 117-122.

Bonstetten 1855

G. de Bonstetten, *Recueil d'antiquités suisses* (*Recueil d'antiquités suisses* 1), Berne/Paris/ Leipzig 1855.

Bonstetten 1860

G. de Bonstetten, *Supplément au recueil d'antiquités suisses* (*Recueil d'antiquités suisses* 2), Lausanne 1860.

Bonstetten 1867

G. de Bonstetten, *Second supplément au recueil d'antiquités suisses* (*Recueil d'antiquités suisses* 3), Lausanne 1867.

Bonstetten 1878

G. de Bonstetten, *Carte archéologique du canton de Fribourg. Epoque romaine et anté-romaine*, Genève/Bâle/Lyon 1878.

Brandt *et al.* 2005

R. Brandt – M. Gazenbeek – S. van der Leeuw – P. Verhagen, «La gestion du patrimoine archéologique régional ou de l'usage des modèles prédictifs en SIG: l'Argonne, un cas d'école», *in:* Berger *et al*. 2005a, 93-104.

Carozza *et al.* 2005

J.-M. Carozza – M. Pous – T. Odiot – L. Carozza, «Modélisation prédictive du risque archéologique: application de la méthode 'Weights of Evidence' à la plaine du Roussillon. Premiers résultats», *in*: Berger *et al*. 2005a, 105-116.

Carty/Goskar 2003

A. Carty – T. Goskar, *Surveying Knolton Church and Henge using 3D Laser Scanning*, Glasgow 2003. Disponible en ligne sous minotaur.archaeoptics.co.uk/downloads/knowlton.pdf.

Chazaly/Laroze 2005

B. Chazaly – E. Laroze, «Le relevé par scannage 3D du temple d'Opeth à Karnak, Egypte», *XYZ (revue de l'Association française de topographie)*, 2005, 1. Disponible sous www.riegl.com/terrestrial_scanners/terrestrial_scanner_literature_/downloads_/xyz0503.pdf.

Debevec 2005

P. E. Debevec, *Making «The Parthenon»*, 2005. Disponible uniquement en ligne sous www.debevec.org/Parthenon/debevec-vast2005-parthenon.pdf.

Djindjian 1991

F. Djindjian, *Méthodes pour l'archéologie*, Paris 1991.

Gallay 1986

A. Gallay, *L'archéologie demain*, Paris 1986, 15-125.

Herzig/Hochuli-Gysel 1998

H. E. Herzig – A. Hochuli-Gysel, «Der Plan von Avenches von Erasmus Ritter, 1786», *in*: T. Klöti – M. Oehrli – H.-U. Feldmann, *Eine aktuelle Sicht auf die 16000 Landkarten des Johann Friedrich von Ryhiner (1732-1803)*, Murten 1998. Disponible en ligne sous www.stub.unibe.ch/welten/texte/herzig.html.

Keller 1854

F. Keller, *Die keltischen Pfahlbauten in der Schweizerseen, 1. Pfahlbaubericht* (*Mitteilungen der Antiquarischen Gesellschaft* 9), Zürich 1854.

Mondenard 2002

A. de Mondenard, *La mission héliographique. Cinq photographes parcourent la France en 1851*, Paris 2002.

Montesson 1766

D. de Montesson, *La Science De L'Arpenteur*, Paris 1766.

Neubauer n. d.

W. Neubauer, *Leipzig–Petersstrasse 33, Grabung L103, Karstadt Areal. Test-Dokumentation 3D Laser Scanner*, Bericht an das Sächsische Landesamt für Archäologie, Vienna Institute for Archaeological Science, Wien. Disponible en ligne sous www.riegl.co.at/terrestrial_scanners/terrestrial_scanner_literature_/downloads_/bericht_leipzig_low_resolution_images_.pdf.

Peissard 1941

N. Peissard, *Carte archéologique du canton de Fribourg*, Fribourg 1941.

Poidebard 1934

R. P. A. Poidebard, *La trace de Rome dans le désert de Syrie*, Paris 1934.

Reichlen 1894-1895

F. Reichlen, *Archéologie fribourgeoise*, Fribourg 1894-1895.

Troyon 1860

F. Troyon, *Habitations lacustres des temps anciens et modernes (lac Léman, etc.)* (*Mémoires et documents de la Société d'Histoire de la Suisse Romande* 17), Lausanne 1860.

Verhagen *et al.* 2005

P. Verhagen – J. Deeben – D. Hallewas – P. Zoetbrood – H. Kamermans – M. van Leusen, «A review of predictive modelling for archaeological heritage management in the Netherlands», *in*: Berger *et al*. 2005a, 83-92.

ZUSAMMENFASSUNG

Schon bei den frühen archäologischen Unternehmungen im 18. Jahrhundert verwendeten die Archäologen unserer Region unterschiedliche Techniken zur Dokumentation aufgedeckter Befunde. Dies war und ist von grundlegender Bedeutung, weil die meisten Fundstellen bei der Ausgrabung zerstört werden, so dass die im Gelände gesammelten Daten die einzigen bleibenden Informationen darstellen.

Als Folge der sich immer weiter entwickelnden Techniken und Methoden zur Informationsgewinnung und –erfassung wurde auch die Archäologie in ihren Fragestellungen und Methoden immer präziser und systematischer. Heute bestimmen standardisierte Verfahren in vielfältiger Art und Weise die Durchführung einer Ausgrabung, ihre Erfassung und die Abläufe bei der auf sie folgenden Auswertung.

Die wichtigsten Veränderungen der letzten Jahre im methodischen Bereich gehen auf die Einführung von Digitalfotografie und Computer im Terrain zurück sowie auf die zunehmende Bedeutung computergestützter Verfahren bei der Auswertung gewonnener Daten.

Einige innovative, noch nicht flächendeckend genutzte Techniken, die im Allgemeinen nicht für Archäologen entwickelt wurden, eignen sich in besonderer Weise, das Erfassen und Analysieren archäologischer Daten zu optimieren. Sowohl auf der Ebene des Instrumentariums (Tachymeter, differenzielles GPS, 3D-Scanner), der digitalen Datenverarbeitung (hoch aufgelöste digitale Höhenmodelle) als auch der Software (Geografisches Informationssystem) lassen sich neue Methoden der Datenverarbeitung für eine innovative analytische Nutzbarmachung und Vermittlung gegenüber der Öffentlichkeit anwenden.

Die Digitalisierung stellt einen bedeutenden Wendepunkt in den Möglichkeiten der Archäologie dar. Die Zukunft wird weisen, ob und in welchem Masse die sich daraus ergebenden Chancen genutzt werden. Grundsätzlich gilt es aber, sich mit den jüngsten technologischen Entwicklungen auseinanderzusetzten – nur so lassen sich ihre Vor- und Nachteile und mithin ihr Nutzen für unsere Forschung abschätzen.