Géomorphologie : relief, processus, environnement

Articles sous presse

Le paléoenvironnement de l'Escaut moyen sur le site de Kerkhove Stuw (Flandre Occidentale, Belgique) au cours de l'Holocène inférieur

Paleoenvironment of the middle Scheldt at Kerkhove Stuw (West Flanders, Belgium) during the Early Holocene

FRÉDÉRIC CRUZ, ANNELIES STORME, LUC ALLEMEERSCH, JORIS SERGANT, HANS VANDENDRIESSCHE, KIM ALUWÉ, MATHIEU BOUDIN, JARI MIKKELSEN ET PHILIPPE CROMBÉ

Résumés

Français English

À l'occasion d'une fouille dans la vallée de l'Escaut, une étude géomorphologique a permis, à partir de données nouvelles, de mieux appréhender la dynamique sédimentaire de la rivière au cours de l'Holocène inférieur. Ces données montrent qu'un environnement fluvio-lacustre s'installe à la transition Weichsélien/Holocène et disparaît avec la densification des forêts de pins. Elles participent probablement à l'abaissement de la nappe phréatique, mais également à l'augmentation de la fréquence et de l'étendue des feux de forêt naturels amenant à une période d'instabilité des versants et à un accroissement de la dynamique alluviale. L'apparition des forêts mixtes moins sujettes aux feux entraîne l'extension des marécages alluviaux.

During an archaeological excavation in the Scheldt Valley, a geomorphological study allowed a better understanding of the sedimentary dynamics during the Early Holocene. The data provide evidence of a fluvio-lacustrine environment established at the Weichselian/Holocene transition which disappeared with the intensification of pine forests. The latter probably contributed to the lowering of groundwater, but also to the increase in the frequency and extent of natural forest

fires leading to a period of slope instability and a renewal of alluvial dynamics. The emergence of mixed forests less prone to fires ultimately leads to the formation of alluvial swamps.

Entrées d'index

Mots-clés : alluvions, colluvions, Escaut, fluvio-lacustre, Holocène inférieur, paléoécologie

Keywords : alluvial sediments, colluvial sediments, Scheldt River, fluvio-lacustrine sediments, Early Holocene, palaeoecology

Notes de la rédaction

Manuscrit reçu le 11 septembre 2020, reçu sous forme révisée le 01 juillet 2021, définitivement accepté le 26 août 2021

Texte intégral

Cette publication présente les résultats combinés d'études financées par « *De Vlaamse Waterweg nv* » et l'Union Européenne, « *Trans-European Transport Network* » (*TENT-T*). Une partie des recherches a été effectuée durant une année spéciale de doctorat (FWO 1901716N) subventionnées par *the Research Fund – Flanders (FWO)*.

1. Introduction

- 1 Le passage du Pléniglaciaire au Tardiglaciaire résulte d'un réchauffement climatique global (Rasmussen et al., 2014) qui a provoqué des changements environnementaux importants dans le nord-ouest de l'Europe (Magny et al., 2002 ; Roberts, 1998). Dans la vallée de l'Escaut, ils se traduisent hydrologiquement par la transition d'un système fluvial en tresse vers un système fluvial méandrique (Bogemans et al., 2012 ; Kiden, 1991). Sur les versants, les dépôts éoliens weichséniens, sableux au nord et loessiques au sud, adoucissent le relief hérité de l'érosion quaternaire du toit des argiles éocènes. Les limites entre la plaine alluviale tardiglaciaire et les versants sont marquées régulièrement par des escarpements de 1 à 2 m de hauteur issus de l'incision des rivières (Kiden, 1991). Le réchauffement climatique global se poursuit jusqu'au début de l'Holocène. Il contribue à la densification du couvert forestier amenant à une baisse de la dynamique alluviale de l'Escaut. Le fleuve est alors piégé dans son ancien chenal (Bogemans et al., 2012 ; Kiden, 1991).
 - 2 La séquence type du remplissage holocène de ce grand chenal commence à la base par une gyttja (Bogemans et al., 2012 ; Heyse et Demoulin, 2017 ; Kiden, 1989, 1991, 2006 ; Meylemans et al., 2013 ; Storme et al., 2017 ; Verbruggen et al., 1991). Le terme de gyttja renvoie à un environnement lacustre (Manneville et al., 2006 ; Wetzels, 2001) sans que ce type d'environnement ne soit évoqué clairement. Lorsqu'il est fait référence à l'environnement de dépôt de ces sédiments, le terme d'« *open water* » est alors évoqué (Bogemans et al., 2012 ; Storme et al., 2017). Le terme lacustre n'a été jusqu'à présent employé que pour un méandre abandonné (Bos et al., 2005). Le comblement de l'ancien chenal se poursuit par des tourbes qui vont ensuite s'étendre à l'intégralité de la plaine inondable tardiglaciaire. L'ensemble est recouvert à la fin de l'Holocène par des argiles. Dans la basse vallée de l'Escaut, la pénétration des marées amène à la mise en place d'un environnement périmarin (Kiden, 1988, 2006 ; Kiden et Verbruggen, 2001).
- Longtemps, la vallée de l'Escaut à l'Holocène inférieur a été perçue comme un

environnement sans dynamique alluviale significative (Kiden, 1991). Néanmoins, une étude récente sur coupe a mis en évidence les indices d'une dynamique alluviale plus intense dans la vallée de l'Escaut moyen. Cette intensification est probablement due à un court évènement climatique qui aurait eu lieu vers 9 300 cal BP (Storme et al., 2018). Ainsi, malgré les nombreuses études, les environnements amenant au comblement sédimentaire du fond du chenal tardiglaciaire restent encore mal connus. Ces lacunes sont dues à la grande épaisseur des dépôts organiques et argileux postérieurs qui rendent les niveaux inférieurs difficilement accessibles. Cette contrainte explique que la majorité des travaux ait été effectuée à partir de forages (Bogemans et al., 2012 ; Kiden, 1991 ; Meylemans et al., 2013 ; Storme et al., 2017). Par conséquent, l'étude de coupes stratigraphiques lors des fouilles préventives du site de Kerkhove *Stuw* a été une occasion exceptionnelle d'améliorer significativement la compréhension de l'évolution environnementale de la vallée de l'Escaut au cours de l'Holocène.

- 4 Dans le cadre du dédoublement d'une écluse de l'Escaut à 35 km en amont de la ville de Gand (fig. 1), une pré-étude archéologique (Bats et Crombé, 2007 ; Bats et al., 2008) a mis en évidence la présence d'artefacts lithiques sur une levée tardiglaciaire (fig. 1). Cette découverte a motivé la mise en place de fouilles archéologiques préventives sur le site de Kerkhove *Stuw* qui ont révélé des occupations humaines principalement mésolithiques (Sergant et al., 2016). En parallèle aux fouilles (Sergant et al., 2018), une étude géomorphologique et paléoécologique a été menée sur le site même sous la forme de longues coupes et dans la plaine alluviale au moyen de forages (fig. 1) (Cruz et al., 2019). L'étude de la stratigraphie a pu également être affinée en laboratoire par des analyses.

Fig. 1 - localisation du site d'études (DNG : deuxième niveau général prenant comme point de référence le niveau moyen des marées basses dans le port d'Ostende, tel que mesuré durant la période 1834 – 1853).

Fig. 1 - location of the study site (DNG: second general level taking as a reference point the average level of low tides in the port of Ostend, as measured during the period 1834-1853).

A : Localisation. 1. Couverture sableuse ; 2. Région limoneuse ; 3. Vallée flamande ; 4. Rivière. B : Configuration de la fouille sur la levée tardiglaciaire. 1. Secteur de fouilles ; 2. Tranchée ; 3. Forages B1.1 à B1.7 ; 4. Forage Begemann.

A: Situation. 1. Sand belt; 2. Loess area; 3. Flemish Valley; 4. River. B: setting of the excavation on the Lateglacial levee. 1. Excavation; 2. Trench; 3. Cores B1.1 to B1.7; 4. Begemann core.

2. Méthodologie

2.1. Travaux de terrain

- 5 Deux types de forages (fig. 2) ont été employés pour recontextualiser la stratigraphie du site d'études dans celle de la vallée de l'Escaut. Sur la levée tardiglaciaire, trois transects de forages utilisant la méthode Begemann (Begemann, 1974) ont été effectués. Il s'agit de l'utilisation d'un appareil conçu spécialement pour l'échantillonnage en continu et sans perturbation des sols meubles. Les échantillons ont été prélevés sous la forme de cylindres de 66 mm de diamètre et de 1 m de hauteur. Ensuite, le transect 1 de sept forages Begemann de 5 à 10 m de profondeur a été prolongé par des forages manuels mélangeant l'utilisant d'une tête de type Edelman et des gouges de 3 et 2 cm de large. Les profondeurs atteintes manuellement varient entre 2,70 et 7 m.

Fig. 2 - lithological cross-section across the middle Scheldt alluvial plain in the area of the Kerkhove Stuw excavation.

Fig. 2 - transect lithologique à travers la plaine alluviale de l'Escaut moyen dans le secteur de la fouille de Kerkhove Stuw.

A : transect de corrélations. 1. Sable silteux (unité XVI) ; 2. Sédiment anthropique (unité XV) ; 3. Sable anthropique (unité XIV) ; 4. Argile silteuse (unité XIII) ; 5. Argile compacte (unité XII) ; 6. Silt brun à coquilles (unité XI) ; 7. Argile organique (X) ; 8. Tourbe argileuse (unité IX) ; 9. Tourbe tufacée (unité VIII) ; 10. Silt organique (unité VII) ; 11. Silt argileux (unité VI) ; 12. Sable homogène (unité IV) ; 13. Silt stratifié (unité III) ; 14. Sable silteux lité (unité II) ; 15. Sable stratifié (unité I) ; 16. Horizon Ap ; 17. Horizon A (unité V). B. localisation des types de forages. 1. Secteur de fouilles ; 2. tranchée ; 3. Forage manuel ; 4. Forage Begemann.

A: cross-section. 1. Silty sand (Unit XVI); 2. Anthropogenic layer (Unit XV); 3. Anthropogenic sand (Unit XIV); 4. Silty clay (Unit XIII); 5. Hard clay (Unit XII); 6. Brown silt with shells (Unit XI); 7. Organic clay (Unit X); 8. Clayey peat (Unit IX); 9. Tuffaceous peat (Unit VIII); 10. Organic silt (Unit VII); 11. Clayey silt (Unit VI); 12. Homogeneous sand (unit IV); 13. Stratified silt (Unit III); 14. Bedded silty sand (Unit II); 15. Stratified sand (Unit I); 16. Ap horizon; 17. A horizon (Unit V). B. setting of different cores. 1. Excavation; 2. Trench; 3. Manual core; 4. Begemann core.

- 6 Sur les fouilles, les sédiments ont été étudiés à partir de 4 tranchées, de T1 à T4 (fig. 1) pratiquées perpendiculairement à la levée tardiglaciaire. La stratigraphie du site a été relevée à partir d'une succession verticale de coupes dépassant rarement 1,20 m de hauteur pour des raisons de sécurité. Elles ont été enregistrées à l'aide de photographies redressées, puis assemblées et dessinées sous ordinateur.
- 7 Chaque coupe a fait l'objet d'une description pédosédimentaire et de prélèvements systématiques des unités stratigraphiques observées selon des transects verticaux. Des profils en aluminium de 5 cm ou plus large pour la fabrication de lames minces ont été employés, afin de prélever la stratigraphie sans perturber les sédiments. Les matériaux pour les analyses sédimentologiques et micropaléontologiques, ainsi que pour les datations radiocarbone (sur sédiment ou graines de plantes terrestres après tamisage) ont été échantillonnés en laboratoire.

2.2. Analyses en laboratoire

- 8 Les études en laboratoire se composent d'analyses sédimentologiques (perte au feu, microgranulométrie, susceptibilité magnétique), micromorphologiques, des microfossiles (palynomorphes, microcharbons et diatomées) et des macrorestes (végétaux et malacologiques) effectuées sur les sédiments de la coupe de la tranchée T1 et du forage B1.1. La stratigraphie est calée chronologiquement par une série de datations radiocarbone. Les prélèvements pour analyses sédimentologiques, palynologiques et datations ont été effectués en parallèle et au cœur des profils en aluminium ou des forages selon un pas de 8 cm.

2.2.1. Etude Sédimentologique

- 9 Les protocoles d'analyse utilisés sont ceux employés par Heiri et al. (2001) pour la perte au feu et Mulitza et al. (2008) pour l'analyse des tailles des grains allant de 0,1 à 3 500 μm . Les noms des classes granulométriques suivent la classification de Folk (1954) et les paramètres statistiques ceux de Folk et Ward (1957). Les résultats bruts sont, dans un premier temps, représentés sous la forme d'histogrammes, pour observer la composition du sédiment et la distribution générale des classes granulométriques. Ils ont ensuite été intégrés dans un diagramme C-M (Passega, 1957, 1964 ; Passega et Byramjee, 1969)
- 10 Passega (1957, 1964) a montré que l'image CM la plus complète peut être subdivisée par des points N, O, P, Q et S en segments correspondant à des mécanismes sédimentaires délimités par des valeurs Cu (taille maximum des grains transportés par suspension homogène), Cs (taille minimum des grains transportés par suspension gradée) et Cr (taille minimum des grains transportés par roulage). Cependant, la position et la taille de ces segments varient et il n'y a pas d'image CM standard (Bravard et Peiry, 1999). Néanmoins, le diagramme CM permet une approche objective des modes de dépôts des particules dans une plaine alluviale, en complément d'autres types analyses sédimentaires (Brown, 1997).
- 11 Les mesures de la susceptibilité magnétique (SM) ont été effectuées sur les carottes des forages mécanisés ouvertes en deux, à l'aide du *Multi-Sensor Core Logger* de Geotek, avec un pas de 1 cm. Elles ont été précédées d'un relevé photogrammétrique calibré du sédiment. La SM volumique a été mesurée avec le MS2 *magnetic susceptibility system* de Bartington Instruments avec une sensibilité de mesure utilisée de 1.10^{-5} SI.

2.2.2. Analyse micromorphologie

- 12 Des prélèvements non perturbés de différents niveaux ont été effectués à l'aide de boîtes en métal. Après séchage, les échantillons ont été imprégnés de résine colmatant les pores et fixant le sédiment. Les lames minces d'une épaisseur standard de 3 μm ont été obtenues par abrasion, puis polissage. Elles ont ensuite été étudiées sous microscope en lumière normale, lumière polarisée non analysée (LPNA) et lumière polarisée analysée (LPA). La description effectuée adopte la terminologie et les concepts de Stoops (2003).

2.2.3. Etude des microfossiles

Pour les diatomées, la matière organique des échantillons (environ 0,2 g) a été oxydée par l'utilisation de peroxyde d'hydrogène et les carbonates par de l'acide chlorhydrique.

Les préparations des lames microscopiques ont été effectuées au Naphrax. L'étude sous un microscope à grossissement x1000 a commencé par une première phase d'observation de la qualité de préservation des diatomées dans les différentes unités. Ensuite, lorsque cela était possible, environ 400 frustules de diatomées ont été identifiés en utilisant les clefs de détermination (Krammer et Lange-Bertalot, 2008). *Algaebase* a été consultée pour une mise à jour de la nomenclature (Guiry et Guiry, 2016). La distribution de groupes écologiques déterminés sur la base de codes écologiques (Denys, 1991) est également présentée en pourcentages.

- 14 Concernant la palynologie, les échantillons (environ 1 ml) ont subi un traitement standard (Moore et al., 1991). Un comprimé de *Lycopodium* a été ajouté pour le calcul des concentrations (Stockmarr, 1971). Les résidus ont été étudiés sous microscope à grossissement x400. L'identification de pollen et des spores est basée sur des clés de détermination (Beug, 2004 ; Moore et al., 1991) et des collections de références. La nomenclature de pollen est celle employée par Beug (2004). En parallèle, une sélection de *non-pollen palynomorphs* (NPP) a été identifiée et comptabilisée (Komárek et Jankovská, 2001 ; van Geel, 1978 ; van Geel et al., 1989 ; van Geel et al., 1983 ; van Geel et al., 1986). Le nombre minimal d'individus relevé par niveau est de 400, à l'exception des échantillons du forage B1.1 (100 individus). Tous les pollens des taxons non-aquatiques ont été inclus dans les sommes ayant servi à exprimer les pourcentages de pollen arborescent (AP), pollen non arborescent (NAP), spores et algues. Les conditions de préservation ont été prises en compte et classées de 1 (très mauvaises) à 5 (excellentes).
- 15 A partir des échantillons palynologiques, la concentration en microcharbons a été calculée sur la base d'environ 200 particules sur la tranche T1 et estimée sur une échelle de 0 à 4 sur le forage B1.1. L'ensemble des résultats (palynologie, diatomées, microcharbons) est présenté en diagrammes de pourcentages et concentrations utilisant le logiciel *Tilia*, version 2.0.41 (Grimm, 2015). Enfin, les biozones locales ont été reliées aux biozones régionales décrites pour le bassin de l'Escaut (Storme et al., 2017).

2.2.4. Analyses de macrorestes

- 16 Les échantillons pour l'étude malacologique ont été traités de la même manière que pour l'étude des macrorestes botaniques. De larges volumes de 5 000 cm³ ont été prélevés sur les coupes, tandis que sur le forage B1.1, les échantillons (3 à 6 cm d'épaisseur) représentent de faibles volumes (de 38 à 76 cm³). Le matériel a été tamisé sous eau à faible pression. Des tamis de mailles de 2 mm et 500 µm ont été employés pour tous les échantillons et 20 % des grands échantillons ont également été tamisés avec une maille plus fine de 250 µm. Les mollusques, dont la taille est inférieure à 500 µm, n'ont pas été étudiés.
 - 17 Les macrorestes botaniques récupérés ont été étudiés à la loupe binoculaire (grossissements x10 à x45). Dans certains cas, tels que les endocarpes de *Potamogetonaceae*, un microscope a été utilisé (grossissements x100 à x400). L'identification des fruits/graines est basée essentiellement sur des travaux généraux (Cappers et al., 2012 ; Knörzer, 2009). Parfois, des clés spécifiques à certaines familles ont été employées (Berggren, 1969 ; Marjatta, 1970 ; Nilsson et Hjelmquist, 1967). Les restes de végétaux ont été déterminés avec les travaux de Grosse-Brauckmann (1972, 1974) et Grosse-Brauckmann et Streitz (1992). La taxonomie utilisée suit celle proposée par Lambinon et al. (2008). Enfin, la collection de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique (Bruxelles) et une collection privée ont été également utilisées.
- Les mollusques ont été observés à la loupe binoculaire (grossissement x10 à x45). La

plupart des déterminations a été effectuée sur la base des travaux de Devriese et al. (1992), Jansen et Vogel (1965) et Vilvens et al. (2008). Dans certains cas, les publications de Adam (1960) et Gittenberger et al. (2004) ont été consultées. Les individus incomplets ont été déterminés sur la base minimale de l'apex, dans le cas des escargots, et de l'umbo, pour les bivalves. Une coquille de bivalve a été considérée comme un spécimen. Des approches différentes entre les fractions >2 mm et 2 mm à 500 µm ont été employées, car un grand nombre de coquilles dans les petites fractions était incomplet ou représentait des individus juvéniles ne pouvant faire l'objet d'une identification plus précise que le genre. Lorsqu'elles étaient en très grand nombre, des classes ont été effectuées selon la nomenclature accessible sur le site *Fauna Europaea* (<https://fauna-eu.org>) du *Museum für Naturkunde Berlin*. Les caractéristiques écologiques sont basées sur Gittenberger et al. (2004) et Martin et Sommer (2004).

- 19 Les macrorestes botaniques et les mollusques ont été replacés dans leur groupe écologique général. Plus fournis, les résultats de l'analyse des macrorestes sont présentés selon des diagrammes effectués sous le logiciel *Tilia* (Grimm 2015).

2.2.5. Datations

- 20 Les échantillons pour datations radiocarbone ont été effectués sur les boîtes de prélèvement de la coupe de la tranchée T1 et sur le forage mécanisé B1.1. Faisant en moyenne 2 cm d'épaisseur (de 1 à 6 cm), ils ont été prélevés en tenant compte des unités stratigraphiques et de leurs variations internes. Les mesures ont été conduites sur des restes de graines de plantes terrestres non carbonisés et dans une moindre mesure sur sédiment total, lorsque la quantité de matériel était insuffisante.

- 21 Tous les échantillons ont été préparés selon la méthode AAA (HCl-NaOH-HCl, tous à 1 %). Ils ont ensuite été introduits dans un tube contenant CuO et Ag pour combustion à 400°C et obtention de CO₂. Cette température a été choisie pour minimiser la contribution des carbones liés aux minéraux argileux des échantillons (McGeehin et al., 2001, 2004). La graphitisation du CO₂ a été réalisée en utilisant H₂ sur un catalyseur à base de Fe.

- 22 L'ensemble des échantillons a été daté par méthode AMS à l'Institut royal du Patrimoine artistique de Bruxelles (Belgique, Van Strydonck et Van der Borg, 1990-1991), à l'exception des plus petits échantillons (<10 mg C) qui ont été datés à l'aide d'une source d'ions gazeuse au laboratoire ETH-Zürich (Suisse, Hajdas, 2008 ; Ruff et al., 2010). Le programme en ligne OxCal 4.3 a été employé pour la calibration des dates en utilisant la courbe atmosphérique IntCal13 (Reimer et al., 2013). La modélisation de courbes âge-profondeur a été effectuée à l'aide du logiciel Clam 2.3.2 (Blaauw, 2010).

3. Résultats

- 23 L'ensemble des descriptions et des résultats de la tranchée T3 et de l'unité VII a déjà fait l'objet d'une publication (Crombé et al., 2019). Dans cette partie, seules les données des unités III, V, VI et de la base de l'unité IX seront présentées de manière détaillée. Elles proviennent soit de la coupe de la tranchée T1 localisée en bordure du chenal tardiglaciaire, soit du forage mécanique B1.1 situé dans le secteur le plus profond reconnu du chenal tardiglaciaire (fig. 2-4).

3.1. Les séquences stratigraphiques

- L'unité I (Unit I) présente à la base de la stratigraphie du transect de forages (fig. 2), l'unité I est composée de dépôts sableux glauconieux de rivière en tresse. Ces alluvions datent du Pléniglaciaire weichsélien.
- Recouvrant une large incision au toit de l'unité I (fig. 2), l'unité II (Unit II) est composée d'alluvions sableuses gris beige. Mises en place au cours du Tardiglaciaire par une rivière au système fluvial méandrique, elles forment, notamment, la grande levée occupée par le site archéologique.
- L'unité III (Unit III) repose au fond du chenal tardiglaciaire représenté par la grande dépression au toit de l'unité II (fig. 2-4). L'épaisseur maximale de l'unité III observée varie entre une soixantaine de centimètres sur les coupes à environ 2,10 m dans les forages mécanisés. Elle se caractérise par une stratification de sable et silt plastique à granulodécroissance vers le haut, la présence de nombreuses coquilles d'escargots et une forte réaction au test HCl. Les lits bruns foncés à la base s'éclaircissent au toit pour devenir beiges sous l'effet d'une bioturbation animale et végétale qui homogénéise la couche dans sa partie supérieure. Au pied de la butte formée par l'unité II (fig. 3), l'unité III montre des plissements et des convolutes masquant partiellement une limite d'érosion qui sépare les unités II et III. Les analyses (fig. 4) indiquent que l'unité III est composée essentiellement de sable mal à très mal triés et à silt très grossier. Le taux d'argile évolue entre 0,7 % et 2,6 % pour une moyenne globale de 1,4 % sur l'ensemble de l'unité. Sur le forage B1.1, la base de l'unité III apparaît plus sableuse (49 %), avec une part des sables moyens et fins plus importante qu'au toit (26,6 % en moyenne de sable) dominée par les sables très fins. Cette base plus sableuse est très réduite sur la coupe de la tranchée T1, puisqu'elle ne concerne qu'un seul échantillon contenant 55 % de sable. En revanche, la partie supérieure de l'unité III dans la tranchée T1 montre un taux de sable identique (24,5 %) à celui de la partie supérieure de l'unité III dans le forage B1.1. Les spectres granulométriques des parties supérieures sont également plus similaires. Le taux moyen de carbonate est fort sur l'ensemble de l'unité III (18,5 % en moyenne avec un maximum à 26,1 %), malgré une baisse progressive à son toit avec une valeur minimale de 3,3 % dans le forage B1.1. Le taux moyen en matière organique est de 6,2 % avec des valeurs allant de 3,8 % à 9,2 %. Une certaine corrélation entre les valeurs de SM et la part argileuse semble indiquer l'importance de l'influence de cette dernière sur les mesures de SM.

Fig. 3 - Coupe de la tranchée T1 avec les grandes unités stratigraphiques (chiffres romains) et l'ensemble des prélèvements.

Fig. 3 - Cross-section of trench T1 with the main stratigraphic units (Roman numerals) and all samples.

1. Boîte de prélèvement ; 2. Macroreste (végétale et malacologique) ; 3. C14 ; 4. Argile compacte ; 5. Argile organique ; 6. Tourbe brune ; 7. Tourbe noire ; 8. Sable lité ; 9. silt ; 10. Silt carbonaté lité ; 11. Bois.

1. Micromorphological sample; 2. Macroremains (plant and malacology); 3. C14; 4. Hard

clay; 5. Organic clay; 6. Brown peat; 7. Black peat; 8. Bedded sand; 9. Silt; 10. Calcareous Silt; 11. Wood.

- L'unité IV (Unit IV) datant de la fin du Weichsélien, est constituée de sables homogènes correspondant à des dépôts éoliens (fig. 2).
- L'unité V (Unit V), épaisse d'une dizaine à une quarantaine de centimètres, repose sur le toit des unités II et III (fig. 2-4). Sa texture varie en fonction du niveau sous-jacent avec une composante argileuse généralement plus forte. Noirâtre à grisâtre, elle a pu subir des remaniements par bioturbation végétale (chablis, etc.). Sa limite inférieure est généralement nette sur les silts carbonatés de l'unité III et graduelle sur les sables des unités I et II. Sa limite supérieure en contact avec l'unité VII est diffuse et souvent ces deux unités ne peuvent être différenciées l'une de l'autre, lorsqu'elles se superposent. Les analyses sédimentaires (fig. 4) montrent une grande variété de faciès granulométriques qui sont généralement très semblables aux niveaux sous-jacents. Néanmoins, l'unité V se caractérise par des teneurs en argile allant de 1 à 5 % et en carbonate souvent inférieures à 1 %. Les teneurs en carbonates sont généralement plus basses que celles des unités sous-jacentes. Au pied de la butte sableuse, l'unité V montre un taux de carbonate de 4,4 % sur la coupe de la tranchée 1, lieu probable d'arrivée d'eau souterraine. Ce phénomène est souligné par une plus forte concentration en concrétions carbonatées, notamment dans l'unité II. *A contrario*, sa teneur en matière organique variant entre 2,3 % et 14,6 % est systématiquement supérieure à celle de l'unité sous-jacente. Sur le forage B1.1, l'unité V montre de fortes valeurs de SM atteignant environ $80 \cdot 10^{-5}$ SI à son toit.

Fig. 4 - Perte au feu, granulométrie, et susceptibilité magnétique du forage B1.1 et du transect T1.

Fig. 4 - Loss on ignition, grain-size analysis, and magnetic susceptibility of core B1.1 and cross-section T1.

1. Sable très grossier (1-2 mm) ; 2. Sable grossier (500 μ -1 mm) ; 3. Sable moyen (250-500 μ m) ; 4. Sable fin (125-250 μ m) ; 5. Sable très fin (63-125 μ m) ; 6. Silt très grossier (31-63 μ m) ; 7. Silt grossier (16-31 μ m) ; 8. Silt moyen (8-16 μ m) ; 9. Silt fin (4-8 μ m) ; 10. Silt très fin (2-4 μ m) ; 11. argile (< 2 μ m) ; 12. prélèvement pour lame mince ; 13. Matière organique ; 14. Carbonate ; 15. Résidus.

1. *Very coarse sand* (1-2 mm) ; 2. *Coarse sand* (500 μ -1 mm) ; 3. *Medium sand* (250-500 μ m) ; 4. *Fine sand* (125-250 μ m) ; 5. *Very fine sand* (63-125 μ m) ; 6. *Very coarse silt* (31-63 μ m) ; 7. *Coarse silt* (16-31 μ m) ; 8. *Medium silt* (8-16 μ m) ; 9. *Fine silt* (4-8 μ m) ; 10. *Very fine silt* (2-4 μ m) ; 11. *Clay* (<2 μ m) ; 12. *sample for thin-section* ; 13. *Organic matter* ; 14. *CaCO₃* ; 15. *Residue*.

- L'unité VI (Unit VI) n'a été observée que dans la partie inférieure de la séquence stratigraphique du forage B1.1 (fig. 2, 4). Elle repose sur l'unité V et est recouverte par l'unité IX. Épaisse d'environ 1,30 m, elle est formée d'une stratification de couches de silt argileux beige à vert foncé. Elle contient également de nombreuses concrétions ferro-manganiques, dont la taille peut atteindre celle des graviers. Les analyses en laboratoire indiquent que cette unité mal triée peut-être classée comme un silt grossier sableux avec en moyenne 39,3 % de sable, 58,2 % de silt et 2,5 % d'argile (fig. 4). Les spectres granulométriques des silts et argiles sont relativement stables, tandis que le spectre des sables varie fortement, notamment dans la part des sables moyens et fins. Globalement, l'unité VI montre une fraction sableuse légèrement plus grossière, au-dessus de 5,45 m DNG. Du point de vue de la perte au feu, cette bipartition est également présente avec à la base un taux moyen en carbonate de 4,6 % contre 8,1 % pour la partie supérieure. Inversement, la partie inférieure a un taux de matière organique plus faible (6,9 % en moyenne) que le toit de l'unité (9,4 % en moyenne). La transition avec la tourbe supérieure est marquée par une chute du taux des carbonates et une augmentation de la teneur en matière organique. Les mesures de SM sont très élevées (entre environ 20.10⁻⁵ SI et 160.10⁻⁵ SI) avec des variations très fortes et très irrégulières.
- L'unité VII (Unit VII) occupe l'espace localisé au pied de la levée tardiglaciaire (fig. 3). Il s'agit globalement d'un silt grossier sableux, organique, noirâtre à gris très foncé et relativement homogène. Son épaisseur maximale relevée est de 40 cm sur la coupe de la tranchée T3. Le taux de carbonate est inférieur à 1 %, pour une teneur moyenne en matière organique de 9 % (Crombé et al., 2019).
- L'unité IX se situe sous la cote 6,5 m DNG de la coupe de la tranchée 1 (fig. 3). Elle est composée d'une tourbe brune stratifiée de lits silteux beiges épais de quelques centimètres. Au-dessus, elle est constituée de niveaux organiques bruns à débris de végétaux bien observables, entrecoupés de niveaux organiques noirs. Cette unité est mouchetée plus ou moins intensément sur toute sa hauteur de minéraux de vivianite. Elle est également traversée régulièrement par des veinules plus ou moins verticales de sable propre. Les analyses de la base de l'unité IX (fig. 4) indiquent que la composante clastique du sédiment est mal à très mal triée. Elle varie spatialement des silts grossiers sableux aux sables très fins silteux, avec des teneurs en argile allant de 0,4 % à 7 % (moyenne de 3,2 %). Localement, elle peut comprendre des sables grossiers à très grossiers. Les taux de carbonate sont faibles (1,35 % en moyenne) et relativement constants. La teneur en matière organique est forte dès la base (environ 27-30 %). Elle augmente très rapidement pour se stabiliser à une moyenne d'environ 65 %. Ces teneurs en matière organique permettent de classer la base de l'unité IX dans les tourbes (Cubizolle, 2009).

3.2. Résultats du diagramme CM de Passega

- 24 Les échantillons pointés sur le diagramme CM (fig. 5) ne concernent que les unités alluviales (III, VI) et la tourbe (IX).
- 25 Une distinction a été effectuée entre les échantillons de l'unité III prélevés sur les profils des tranchées (T1 et T3) situés en bordure de chenal tardiglaciaire et ceux provenant du forage B1.1 localisé dans le secteur le plus profond reconnu de ce chenal. Les échantillons prélevés sur l'unité III dans le forage se regroupent pour former un segment RQ (suspension gradée) et une partie d'un segment RS (suspension uniforme).
- 26 Il est possible d'inclure quelques échantillons des profils sur le segment RS. Cependant, les échantillons issus des profils des tranchées se localisent majoritairement dans un secteur délimité par les percentiles 120 μm et 1100 μm et des médianes égales à 15 μm et 65 μm . Ils forment un groupe à forte dispersion. Au vu de la proximité de la berge, ce phénomène pourrait être lié à des conditions hydrodynamiques locales, telles que des cellules de contre courants rencontrées dans les chenaux de rivière (Houbrechts et al., 2013 ; Petit, 1975).
- 27 Malgré quelques exemplaires sous la limite Cu, une majorité des échantillons de l'unité VI semble s'établir également sur un segment de type RQ, dans le prolongement des données issues de l'étude d'Oudenaarde *Stuw* (Storme et al., 2018) localisée à environ 11 km en aval de Kerkhove *Stuw*. L'autre partie des échantillons au-dessus de Cs indique la présence d'un transport par roulage des grains les plus grossiers mélangé à un transport en suspension gradée des fractions plus fines (Passegga, 1964).
- 28 Les échantillons de la base de l'unité IX se répartissent de manière similaire à ceux de l'unité VI (segments RQ et PQ), mais avec des médianes plus faibles et donc un tri plus important qui pourrait résulter de la présence des herbes hautes du marécage alluvial.

Fig. 5 - Image CM sur le site de Kerkhove Stuw.

Fig. 5 - CM pattern at the Kerkhove Stuw site.

1. Ligne médiane ; 2. Unité III dans les tranchées T1 à T3 ; 3. Unité III dans le forage B1.1 ; 4. Unité VI ; 5. Unité IX ; 6. Diagramme C-M du site de Oudenaarde *Stuw* (Storme A. et al., 2017). T : suspension pélagique ; SR : suspension uniforme ; RQ : suspension gradée sans roulage ; PO : suspension de fond et roulage ; ON :

roulage ; Cr = taille minimum des grains transportés par roulage ; Cs = taille maximum des grains transportés par suspension ; Cu = taille maximum des grains transportés par suspension homogène.

1. Median line; 2. Unit III from trench T1 to T3; 3. Unit III from core B1.1; 4. Unit VI; 5. Unit IX; 6. C-M pattern from Oudenaarde Stuw site (Storme A. et al., 2017). T: pelagic suspension; SR: uniform suspension; RQ: graded suspension no rolling; PO: bottom suspension and rolling; ON: rolling; Cr: minimum grain size transported as rolling; Cs: maximum grain size transported as graded suspension; Cu: maximum grain size transported as uniform suspension.

3.3. Résultats sur la micromorphologie

29 Les données des unités VII et IX étudiées à partir de la tranchée T3 ont fait l'objet d'une publication précédente (Crombé et al., 2019). Les quatre prélèvements (fig. 4), d'où sont tirées les six photographies de détails présentées (fig. 6), proviennent du forage B1.1.

- *Unité III.* A partir du prélèvement 2 entre 4,4 et 4,5 m DNG (fig. 4), l'unité III montre une séquence de neuf lamines différenciant par l'occurrence de diatomées et par la quantité en matériel fin. Des résidus de plantes allongés et alignés horizontalement (partiellement décomposés) indiquent un transport de l'eau, puis un dépôt dans une tranche d'eau stagnante. Les lamines les plus épaisses montrent des sables calcitiques détritiques (fig. 6B) incluant des diatomées probablement érodées d'un bassin lacustre. Les plus fines montrent un matériel fin calcaire plus présent (fig. 6E) et des zones riches en phosphate. Aucun indice de développement pédogénétique n'a été relevé (bioturbation négligeable, pas d'évolution de la matière organique et pas de carbonates secondaires). L'échantillon peut être interprété comme un dépôt alluvial. Plus bas sur le forage B1.1, au niveau du prélèvement 3 réalisé entre 4,8 et 4,9 m DNG (fig. 4), l'unité III est composée de deux sous unités silteuses à matrice calcaire qui diffèrent uniquement par la présence de lentilles silto-sableuses dans la plus basse. La composition micritique de la matrice, la présence d'une très grande quantité de diatomées et de restes de spicules d'éponges (fig. 6A), l'alignement horizontal de résidus de plantes et l'aspect laminé du sédiment indiquent un environnement lacustre. La présence de lentilles de sable grossier (flèche rouge sur la Figure 6D) montre toutefois un apport périodique de matériel alluvial allochtone. Dans sa partie inférieure sur le forage B1.1, au niveau du prélèvement 4 effectué vers 3,1 m DNG (fig. 4), l'unité III est composée d'une argile silteuse calcaire finement laminée avec intercalation de lamines dominées par des sables fins silico-clastiques (fig. 6C). Les abondants restes de plantes sont alignés horizontalement et les fragments de coquilles sont fréquents et souvent imbriqués. Aucune diatomée et aucun spicule d'éponges n'ont été observés. La texture et la structure sédimentaire indiquent un environnement alluvial, dont les alluvions proviennent de l'érosion de dépôts très calcaires et riches en coquilles. La présence régulière de pyrites framboïdales et de nodules de vivianites dans les différents niveaux de l'unité III atteste de périodes de saturation d'eau suivies d'une dégradation de la matière organique en conditions réductrices (McGowan et Prangnell, 2006).

Fig. 6 - Photographies de détails des lames minces des unités III (A, B, C, D, E) et VI (F, G) du forage B1.1.

Fig. 6 - Detail views of thin-sections from units III (A, B, C, D, E) and VI (F, G) from boring B1.1.

A : Restes de diatomées et de spicules d'éponges dans les dépôts lacustres du prélèvement 3 (LPA) ; B : Apparence plus grossière d'une lamine à calcite détritique du prélèvement 2 (LPA) ; C : Partie de séquence lacustre composée de silt carbonaté à lamines de silt sableux alluvial du prélèvement 4 (LPA) ; D : Niveau plus grossier (flèche rouge) indiquant un apport alluvial dans les dépôts lacustres du prélèvement 3 (LPA) ; E : Microstructure composée de fines lamines à matériel calcaire abondant du prélèvement 2 (LPA) ; F et G : Matrice fine fortement phosphatée du prélèvement 1 (1 : LPNA ; 2 : LPA).

A: Diatom remain and sponge spicules in lacustrine deposit of the sample 3 (XPL, crossed polarized light); B: Coarser layer appearance, with detrital calcite of the sample 2 (XPL); C: Part of the sequence of lacustrine carbonatic silt with alluvial sandy silt layer of the sample 4 (XPL); D: Coarser (red arrow) layer due to alluvial material input in the lacustrine deposit of the sample 3 (XPL); E: Fine layer microstructure including abundant calcareous material of the sample 2 (XPL); F and G: Highly phosphatic fine matrix of the sample 1 (1: PPL, plane polarized light; 2: XPL).

- **Unité VI.** Le prélèvement 1 de l'unité VI réalisé vers 5,3 m DNG (fig. 4) consiste en une succession régulière de niveaux de différentes épaisseurs. Une partie de

ces niveaux montre la présence de restes de plantes alignés horizontalement et partiellement décomposés. Ces caractéristiques sont indicateurs d'un transport par l'eau. Les lits les plus grossiers (silt-sableux) comprennent un abondant matériel calcaire détritique. Les plus fins (silt et argile silteuse) sont caractérisés par une matrice micritique de néoformation secondaire, bien que certaines boues micritiques puissent avoir une origine sédimentaire. Tous les lits montrent une teneur élevée en phosphate (fig. 6F-G), avec une occurrence répandue de microagrégats de matière organique et de restes de plantes. La présence de pyrite framboïdale et de cristaux de vivianites interstitiels a également été observée. La teinte verte de certains niveaux observable à l'œil nu est due à un enrichissement secondaire en phosphate et aux cristaux de vivianite.

3.4. Résultats sur l'analyses des diatomées

30 Seule, la moitié supérieure de l'unité III sur le forage B1.1 a montré la présence de diatomées. Les deux échantillons analysés ont révélé une concentration élevée et des assemblages très similaires dans les deux niveaux (fig. 7). *Cocconeis placentula* var. *euglypta* est l'espèce la plus fréquente (35-55 %). *Amphora inariensis*, *Ellerbeckia arenaria*, *Epithemia sorex*, *E. turgida*, *Fragilaria ulna* complexe et *Gomphonema olivaceum* sont également présents dans les deux échantillons (environ 3-7 %). Le toit de cette unité montre une variété taxonomique moins importante probablement due à une forte fragmentation des valves qui rend l'identification plus difficile.

31 Toutes les diatomées identifiées sont des espèces d'eau douce. La plupart des diatomées classées comme « intertidales » peuvent être interprétées dans le cas présent comme vivant dans un environnement alternant conditions humides et sèches. Elles passent la plupart de leur vie sur le substrat, soit fermement attachées au substrat (épontique), soit mobiles (benthique). Ainsi, les espèces complètement planctoniques sont absentes. Presque toutes les diatomées présentes sont indépendantes du courant, ce qui implique qu'elles peuvent vivre dans un courant d'eau ou dans une eau stagnante. La combinaison de ces caractéristiques écologiques évoque une eau peu profonde, dont le niveau fluctue avec un courant d'eau variable dans l'année. De plus, les diatomées indiquent une eau bien oxygénée, alcaline, riche en nutriments et avec une teneur élevée en matière organique.

Fig. 7 - diagramme de répartition des diatomées de l'unité III sur le forage B1.1.

Fig. 7 - distribution diagram of diatoms from unit III in core B1.1.

A : Pourcentages des taxons. Les fréquences inférieures à 0,5 % sont marquées d'un point ; B : Pourcentages des groupes écologiques.

A: Percentages of taxa. Frequencies below 0.5% are marked by a dot; B: Percentages of ecological groups.

3.5. Palynologie

Les résultats de l'analyse palynologique de l'unité II, jusqu'à la base de l'unité IX dans le forage B1.1 (30 niveaux) et sur la coupe du transect T1 (22 niveaux) sont présents sur les Figures 8 et 9. La préservation des palynomorphes est bonne à excellente dans l'unité III et pauvre à modérée dans toutes les autres unités. Cinq biozones locales avec quelques subdivisions ont été définies sur l'ensemble du site. Dans la présente étude, seules, les biozones K1 à K3 seront présentées.

(i) *Biozone K2a* (*Poaceae* (*graminées*) *dominant*, *Betula* (*bouleau*) >10 %). Cette biozone correspond à l'unité lithologique III. La végétation régionale est caractérisée non seulement par un fort pourcentage en pollen non arborescent (NAP), mais également par une grande diversité taxonomique des herbes incluant *Poaceae* (environ 50 %), *Cyperaceae* (cypéracées), *Artemisia* (armoise), *Filipendula* (reine-des-prés) et dans une moindre mesure d'autres taxons d'herbacés qui ne sont pas tous présents dans les Figures 8 et 9. Par contraste, les AP sont beaucoup moins diversifiés avec 10 à 25 % de *Betula* et de faibles valeurs de *Pinus* (pin), *Salix* (saule) et *Juniperus* (genévrier). Basée sur les spectres, cette biozone pourrait représenter l'environnement de prairies et de forêts de bouleaux de la biozone SB2 qui correspond à la première partie du Préboréal dans le bassin de l'Escaut, avant que le pin ne s'y implante (Storme et al., 2017 ; Verbruggen et al., 1996).

Les plantes aquatiques (*Myriophyllum*, *Potamogeton* (potamot), *Sparganium* (rubanier), *Typha* (massette), Nymphaeaceae (nénuphars), *Ceratophyllum* (cornifle)) et les algues (*Pediastrum*, *Tetraedron*) indiquent un environnement local subaquatique, tandis que les petites quantités de microfossiles remaniés indiquent des phases d'apports fluviaux. La concentration en microcharbons augmente vers le toit de la biozone.

Fig. 8 - Diagramme pollinique en pourcentages du forage B1.1.
Fig. 8 - Percentage pollen diagram of core B1.1.

Fig. 9 - Diagramme pollinique en pourcentages de transect T1 (seq. 1-3).
Fig. 9 - Percentage pollen diagram of trench T1 (seq. 1-3).

- 35 (ii) *Biozone K2b (Pinus dominant)*. La biozone K2b correspond à l'horizon de sol (unité V) situé au toit de l'unité III, ainsi que la partie inférieure de l'unité tourbeuse (unité IX) de la tranchée T1. La végétation régionale est caractérisée par une grande valeur de *Pinus* (40 à 65 %), tandis que les NAP montrent une tendance à la baisse. Les concentrations en *Filicales* (fougères, > 4 %) et charbons de bois (> 3 800 particules par mm³) montrent également un pic. Ce spectre indique une végétation dominée par les forêts de pins avec de fréquents feux de forêts et des fougères en arrière-plan. Ce type de végétation est commun dans la biozone SB3 qui correspond à la dernière partie du Préboréal dans le bassin de l'Escaut (Storme et al., 2017 ; Verbruggen et al., 1996). Les plantes aquatiques et les algues disparaissent du spectre, ce qui indique une baisse du niveau de l'eau.

- (iii) *Biozone K3a (présence de Corylus (noisetier), Quercus (chêne) et de Ulmus*

(*orme*) et *Corylus dominant*). Cette biozone inclut le niveau de colluvions (unité VII) et la base de la tourbe (unité IX) dans la tranchée T1, tandis que sur le forage B1.1, elle correspond à l'unité VI. Dans la tranchée T3, l'unité VII est moins épaisse, mais cette zone a été étudiée à plus haute résolution, permettant de distinguer trois sous-biozones (Crombé et al., 2019).

37 L'arrivée de *Corylus*, *Quercus* et *Ulmus* marque le début de cette biozone. *Pinus* montre une baisse marquée à la base pour atteindre 20 et 30 % dans B1.1 et approximativement 10 % dans la tranchée T1. Cette différence est probablement à mettre en relation avec les positions géomorphologiques des deux sites. En effet, la surreprésentation de *Pinus* dans l'unité VI alluviale est certainement due à un apport par flottation. Les concentrations en microcharbons montrent une corrélation positive avec les concentrations de *Pinus*. Les NAP sont minoritaires avec les Poaceae comme taxon dominant. Ce spectre pollinique reflète la transition de forêts mixtes à des forêts à feuilles caduques typiques de la première partie de la biozone SB4 qui correspond au Boréal dans le bassin de l'Escaut (Storme et al., 2017 ; Verbruggen et al., 1996).

38 Les plantes aquatiques et les algues montrent de faibles pourcentages dans la tranchée T1. *Salix*, qui a probablement poussé localement dans le marais, atteint des valeurs élevées dans la tourbe (unité IX). Dans B1.1, les indicateurs de plan d'eau sont présents pour la plupart à la base, suivi par une forte présence de *Sparganium* et Filicales (probablement *Thelypteris palustris* (fougère des marais)). Ces dernières soulignent une décroissance graduelle du niveau de l'eau dans ce secteur. Dans la tranchée T1, *Glomus* est présent à la base (unité VI, 5 %), soulignant une entrée limitée des matériaux remaniés d'origine colluviale. Il disparaît dès que la croissance de la tourbe (unité IX) démarre. Sur B1.1, *Glomus* est continuellement présent en accord avec un apport continu de matériaux remaniés.

39 (iv) Biozone K3b (codominance de *Corylus* et *Quercus*). Cette biozone correspond à la tourbe présente dans la tranchée T1 et dans le forage B1.1 (unité IX). Les taxons d'arbres sont les mêmes que dans la biozone précédente, mais les proportions ont évolué avec une augmentation de *Quercus*, par rapport à *Corylus*. La végétation régionale consiste maintenant en une forêt à feuilles caduques dominée par le chêne. Cette évolution de la végétation marque la partie tardive de la biozone SB4 qui correspond au Boréal dans le bassin de l'Escaut (Storme et al., 2017 ; Verbruggen et al., 1996).

40 *Salix* est dominant à la base de la biozone, mais il décline à partir de 6,10 m DNG. Dans la partie supérieure de la zone, les Poaceae augmentent. *Equisetum* (prêle) et Filicales indiquent une transition entre un marécage de saules et un marécage plus ouvert en extension des zones marécageuses de la vallée. Les spores de Sordariaceae, champignons vivant sur les excréments et les plantes en décomposition, indiquent également des zones humides. Le pic de microcharbons à 6,10 m DNG peut être une indication de brûlis dans les marécages.

3.6. Macrorestes botaniques

41 La séquence présentée a été effectuée sur la coupe de la tranchée T1 (fig. 3). Dans l'ensemble, les biozones correspondent aux unités lithologiques, mais l'unité III a pu être subdivisée en deux biozones (A à B), suivant les variations spatiales de son contenu.

Fig.10 - Diagramme des macrorestes dans la tranchée T1 (sélection des taxons les plus fréquents).

Fig.10 - Diagram of plant macro remains in trench T1 (selection of the most frequent taxa).

1. Plan d'eau ouvert, riche en nutriments et plantes émergentes ; 2. Plan d'eau ouvert, riche en nutriments et pionnier ; 3. Plantes émergentes et végétation humides, herbacée ; 4. Végétation herbacée, humide à très humide ; 5. Pionniers humides à très humides, riche en nutriments ; 6. Végétation assez humide, très riche en nutriments ; 7. Arbres et arbustes ; 8. Autres ; 9. Animaux.

1. Nutrient-rich open water and emergent plants; 2. Nutrient-rich open water and pioneers; 3. Emergent plants and wet herbaceous vegetation; 4. Wet to moist, herbaceous vegetation; 5. Wet to moist pioneers, nutrient-rich; 6. Moderately wet, very nutrient-rich vegetation; 7. Trees and shrubs; 8. Others; 9. Animals.

- Unité III.** Représentant la partie inférieure de l'unité III, la biozone A se caractérise par une forte abondance des plantes aquatiques (groupe 1) et plus particulièrement de *Schoenoplectus lacustris* (scirpe aigu). Il s'agit d'une plante pionnière bien adaptée aux changements de niveau d'eau et qui piège beaucoup de sédiments (Weeda et al., 1985/1994). Seul *Hydrocharis morsus-ranae* (morène des grenouilles) est mentionné comme un taxon de plan d'eau. *Ranunculus sceleratus* (renoncule scélérate) et *Urtica dioica* (grande ortie), également bien présents, sont des représentants des milieux humides (groupe 5) et des milieux secs (groupe 6) se développant très probablement dans des secteurs inondés par les rivières. Le déclin du groupe 6 plus précoce que le déclin du groupe 5 indique vraisemblablement une augmentation de la hauteur d'eau provoquant un éloignement de la rive. Dans la partie supérieure de l'unité III (biozone B), la quantité des macrorestes diminue progressivement. Si les plantes aquatiques (groupe 1) sont encore bien représentées, tous les autres groupes décroissent. Seul, *Urtica dioica* se maintient. *Sambucus nigra* (sureau noir) est présent avec un fruit. Cette biozone est également marquée par la présence de *Lumbricus terrestris* (lombric) qui apparaît dès le toit de la biozone A. Néanmoins, l'échantillon à la cote 5,40 m DNG se démarque par un nombre plus élevé de capsules.
- Unité V.** Les deux échantillons de cette zone sont très pauvres en macrorestes. En revanche, des concrétions ferro-manganiques brun jaunâtre apparaissent. Les espèces bien représentées sont des nitrophiles : *Chenopodium album* (chénopode blanc) et *Urtica dioica*. Un fragment carbonisé de *Cornus sanguinea* (cornouiller sanguin) et quelques exemplaires de *Sambucus nigra* (sureau noir) ont été relevés. Ce contenu indique un milieu devenant sec en été et très oxydant.
- Unité VII.** Les trois échantillons inférieurs contiennent plus de 60 % de nitrophiles (groupe 6 des milieux secs), dont *Urtica dioica* est le mieux représenté. *Sambucus* est également très présent à la cote 5,55 m DNG (16 exemplaires).
- Unité IX.** Le taxon le mieux représenté est *Mentha cf. aquatica* (menthe cf. aquatique) qui appartient au groupe 3. Le taux des macrorestes de ce groupe 3

3.7. Résultats sur la malacologie

La séquence (fig. 11) est relativement homogène. *Bithynia tentaculata* est l'espèce la plus représentée dans les grandes fractions. Ce gastéropode, avec *Acroloxus lacustris* et *Valvata cristata*, sont typiques des périodes chaudes (Bos et al., 2018 ; Gittenberger et al., 2004). *Valvata macrostoma* est principalement présent dans la partie inférieure de l'unité III. De nos jours, ces espèces sont rares dans les sédiments transportés par les courants, mais elles étaient très présentes dans les périodes humides du Weichsélien (Gittenberger et al., 2004). Les espèces qui préfèrent les eaux plus vives sont présentes, mais sont moins importantes que les espèces d'eau stagnante ou de faible énergie. Toutes ces espèces peuvent coloniser rapidement un nouvel habitat grâce à différents vecteurs de dispersion tels que les pattes d'amphibien, les plumes d'oiseau, ainsi que la peau et les poils des mammifères (van Leeuwen et al., 2013).

Fig. 11 - Mollusc taxa in unit III (T1).

3.8. Datations des unités

Tab. 1 - Tableau des datations radiocarbone.
Tab. 1 - Table of radiocarbon dating.

Code terrain	Unité	Base m DNG	Toit m DNG	Milieux m DNG	Matériel daté	Code du laboratoire	Datation	Max 2 σ	Min 2 σ	μ
2197-9b (30,5-32 cm)	IX	6,582	6,567	6,57	<i>Juncus europaeus</i> (3), <i>Mentha aquatica</i> (10), <i>Galopalis</i> (3), <i>Urtica dioica</i> (8), <i>Ranunculus</i> <i>sceleratus</i> (1)	RICH-24271	6265±39	7271	7025	7195
2197-8b (54-55,5 cm)	IX	6,347	6,332	6,34	<i>Comus sanguinea</i> (1)	RICH-24269	7482±37	8379	8200	8296
2197-7a (77,5-79 cm)	IX	6,112	6,097	6,10	<i>Solanum dulcamara</i> (1), <i>Urtica dioica</i> (1)	RICH-24262	7865±55	8977	8543	8701
2197-6a (108,5-110 cm)	IX	5,802	5,787	5,79	<i>Comus sanguinea</i> (1)	RICH-24259	8353±39	9471	9283	9375
1705-5bisb (30,5-32 cm)	IX	5,560	5,545	5,55	<i>Urtica dioica</i> (1), <i>Chenopodium album</i> (1), <i>Carex</i> (1), <i>Sambucus</i> (1+fragm.)	RICH-24261	9485±63	11085	10573	10808
B1.1 (609-612 cm)	IX	7,375	7,345	7,36	<i>Urtica dioica</i> (1)	ETH-84511	7336±149	8420	7864	8159
B1.1 (612-615 cm)	IX	7,345	7,315	7,33	<i>Lemna</i> sp. (1)	ETH-84512	7972±201	9400	8414	8869
B1.1 (6) (53-58 cm)	IX	6,935	6,885	6,91	<i>Scheuchzeria palustris</i> (30), <i>Mentha</i> <i>aquatica</i> (19)	RICH-25459	5969±34	6895	6692	6804
B1.1 (7) (603-609 cm)	IX	6,429	6,369	6,40	<i>Mentha aquatica</i> (4), <i>Lemna</i> sp. (2), <i>Oenanthe aquatica</i> (1 fragm.), <i>Solanum</i> <i>dulcamara</i> (1 fragm.), <i>Urtica dioica</i> (1)	RICH-24761	2946±58	3327	2930	3103
1705-5b (22,5-24 cm)	VII	5,640	5,625	5,63	<i>Corylus avellana</i> (1 fragm. carbonisé)	RICH-24264	8996±39	10240	9940	10165
B1.1 (8) (66 cm)	V	4,812	4,802	4,81	sédiment	RICH-23036	9394±50	10744	10503	10625
1705-2a (68-70 cm)	III	5,185	5,165	5,18	<i>Poaceae</i> (2), <i>Cirsium/Carduus</i> (1), <i>Urtica</i> <i>dioica</i> (1), <i>Carex</i> (2), <i>Juncus europaeus</i> (1)	RICH-24258	9736±59	11255	10811	11133
1705-1a (89-91 cm)	III	4,975	4,955	4,97	<i>Carex cf. rostrata</i> (17), <i>Carex biconvex</i> (1)	RICH-24266	9995±43	11701	11269	11472
B1.1 (9) (2 cm)	III	4,456	4,446	4,45	sédiment	RICH-23035	11053±52	13061	12780	12916
B1.1 (9) (4 cm)	III	4,436	4,426	4,43	sédiment	RICH-23037	10257±52	12374	11763	12003
B1.1 (9) (811-814 cm)	III	4,361	4,331	4,35	<i>Scirpus lacustris</i> (2 en 7 fragm.)	RICH-24760	9802±43	11270	11169	11221
B1.1 (9) (872-875 cm)	III	3,751	3,721	3,74	<i>Ranunculus sceleratus</i> (1), <i>Scirpus lacustris</i> (4 en 4 fragm.), <i>Rumex cf. maritimus</i> (1)	RICH-24759	9985±44	11697	11265	11455
B1.1 (10) (69 cm)	III	2,786	2,776	2,78	sédiment	RICH-23034	11552±51	13476	13284	13384
B1.1 (10) (967-973 cm)	III	2,801	2,741	2,77	<i>Urtica dioica</i> , <i>Betula</i> sp. (1), <i>Poaceae</i> (2), <i>Hydrocharis morsus-ranae</i> (2), <i>Ranunculus</i> <i>sceleratus</i> (1)	RICH-24762	10052±147	12131	11205	11647

- **Unité III.** Cette unité comprend le plus grand nombre de dates avec un total de huit datations radiocarbone. Les deux datations de la coupe de la tranchée T1 (RICH-24258 et RICH-24266) montrent des âges allant de 11701 (95,4 %) 11269 cal BP à 10255 (95,4 %) 10811 cal BP. Sur le forage B1.1, les âges des datations (RICH-23035, RICH-23037, RICH-24760, RICH-24759, RICH-23034 et RICH-24762) s'étalent entre 13476 (95,4 %) 13284 cal BP et 11270 (95,4 %) 11169 cal BP.

45 Les trois datations du forage effectuées sur sédiment (RICH-23035, RICH-23037 et RICH-23034) montrent des âges plus anciens que ceux des datations sur restes de végétaux (RICH-24760, RICH-24759 et RICH-23034). Ce décalage indique un biais (matière organique remaniée ?) dans les datations sur sédiment de cette unité qui ont été, par conséquent, écartées. Les trois datations restantes (RICH-24760, RICH-24759 et RICH-23034) indiquent des âges allant de 12131 (95,4 %) 11205 cal BP à 11255 (95,4 %) 10811 cal BP.

46 Les cinq datations conservées (RICH-24258 et RICH-24266 de T1 et RICH-24760, RICH-24759 et RICH-23034 de B1.1) donnent un intervalle chronologique allant de 12131 (95,4 %) 11205 cal BP à 11255 (95,4 %) 10 811 cal BP. Elles permettent de situer le dépôt de l'unité III, en accord avec la malacofaune de période chaude, plutôt au début de l'Holocène inférieur (Cohen et al., 2020).

Ces datations permettent également de souligner le caractère lacustre de

l'environnement. La comparaison entre les courbes temps/profondeur de B1.1 et de T1 (fig. 12) montre une absence de sédimentation avant environ 11500 cal BP dans le secteur de T1, puis des vitesses de sédimentation relativement similaires à des altitudes différentes. Ceci indique une aggradation sédimentaire sous une faible tranche d'eau. Elle prend place dans un premier temps uniquement au fond de l'ancien chenal tardiglaciaire, puis elle s'étend avec l'évasement de ce dernier.

Fig. 12 - comparaison des courbes temps/profondeur entre B1.1 (secteur le plus profond reconnu du chenal tardiglaciaire) et T1 (rebord du chenal tardiglaciaire).

Fig. 12 - comparison of time/depth curves between B1.1 (deepest sector recognized of the Lateglacial channel?) and T1 (edge of the Lateglacial channel).

- *Unité V.* Elle ne comprend qu'une datation radiocarbone effectuée sur sédiment dans le forage B1.1 (RICH-23036). Elle a donné une date de 10744 (95,4 %) 10503 cal BP correspondant au milieu de l'Holocène inférieur.
- *Unité VI.* Aucun élément organique n'a permis d'effectuer de datation sur l'unité VI. Néanmoins, avec la datation de l'unité V et les datations de la base l'unité IX du forage B1.1 (voir ci-dessous), il est possible de situer les dépôts de l'unité VI au cours de l'Holocène inférieur.
- *Unité VII.* Une seule datation a été effectuée sur l'unité VII de la tranchée T1, donnant une date de 10240 (95,4%) 9940 cal BP. En revanche, l'unité VII a été étudiée en détail et datée par 15 datations radiocarbone sur le profil de la tranchée T3 (Crombé et al., 2019). Dans ce secteur le début et la fin du dépôt de cette unité sont datés respectivement de 11810 (95,4 %) 11180 cal BP et 9880

(95,4%) 9610 cal BP, indiquant la première moitié de l'Holocène inférieur. La série de datations montre également un taux de sédimentation lent à la base qui s'accélère autours de 10500 cal. BP (Crombé et al., 2019).

- **Unité IX.** Dans le forage B1.1, deux premières datations (RICH-25459 et RICH-24761) situées à la base de l'unité IX ont montré des incohérences entre elles. Deux autres datations (ETH-84512 et ETH-84511) ont alors été effectuées au-dessus, donnant 9400 (95,4 %) 8414 cal BP pour la plus basse et 8420 (95,4 %) 7864 cal BP pour la plus élevée. Si ces datations ne permettent pas de dater précisément le début de la tourbification, elles donnent, néanmoins, un *terminus ante quem* de cette dernière dans ce secteur, mais également de la fin des dépôts de l'unité VI (voir ci-dessus).

- 48 Les quatre datations faites sur la partie inférieure de la tourbe de la tranchée T1 (RICH-24271, RICH-24269, RICH-24262 et RICH-24259) montrent des âges s'étalant entre 9471 (95,4 %) 9283 cal BP et 7271 (95,4 %) 7025 cal BP. Elles indiquent la fin de l'Holocène inférieur et le début de l'Holocène moyen (Cohen et al., 2020).

Fig. 13 - Synthèse chronologique prenant en compte la stratigraphie du site et les datations radiocarbone ; datation de l'unité V dans le secteur le plus profond reconnu du chenal tardiglaciaire.

Fig. 13 - chronological synthesis taking into account the site's stratigraphy and radiocarbon dates; dating of unit V at the bottom of the Lateglacial channel.

4. Discussion

- 49 Sur le site de Kerkhove *Stuw*, les dépôts tardiglaciaires de l'Escaut (unité II) se présentent sous la forme de levées et de barres de méandre. Elles indiquent un système fluvial méandriforme évoqué dans les précédentes études (Meylemans et al., 2013 ; Bogemans et al., 2012 ; Kiden, 1991 ; Verbruggen et al., 1991). La plaine alluviale tardiglaciaire est bordée par des dépôts éoliens (unité IV) qui se mettent en place principalement à la fin du Pléniglaciaire (De Moor et Heyse, 1974, 1978). Ils ont pu être remaniés par l'activité éolienne, au cours du Tardiglaciaire. Cette dernière est soulignée par la présence de dunes sur des barres de méandre datées de cette période (Bogemans et Vandenberghe, 2011).

- 50 Le passage à l'Holocène se traduit sur le site d'études, comme sur l'ensemble bassin de l'Escaut (Kiden, 1991 ; Verbruggen et al., 1991), par un ralentissement de la dynamique alluviale (fig. 14). Ce changement est souligné par la mise en place d'un silt carbonaté (unité III) dans l'ancien chenal tardiglaciaire. Ces dépôts cumulent des caractéristiques d'environnement lacustre (diatomées, aspect laminé sur certaines lames minces, plantes locales d'environnement subaquatique et taux de sédimentation)

et fluvial (diatomées, granulométrie avec un transport gradé, alignement de grains et de fragments de végétaux et microfossiles remaniés).

51 Outre la limite d'érosion observée à la base de l'unité III sur la coupe de la tranchée T1, la dynamique alluviale du début de l'Holocène est également mise en évidence par des problèmes de datation. Toutes les datations effectuées sur sédiment montrent systématiquement un âge vieilli qui ne peut s'expliquer que par la présence de matières organiques en dépôt secondaire. Ce fait amène à s'interroger sur la validité des datations de ces dépôts dans les études précédentes, effectuées dans le bassin versant de l'Escaut. En effet, lorsque le type de matériel daté est évoqué, il s'agit majoritairement de datations sur sédiment total (Meylemans et al., 2013 ; Storme et al., 2017).

52 Ces deux types d'environnements, lacustre et fluvial, évoluent spatialement et temporellement de l'un à l'autre, permettant de parler d'une manière plus générale d'environnement fluvio-lacustre (Foucault et Raoult, 2001). Il s'inscrit dans un paysage végétal de prairies et de forêts de bouleaux du début de l'Holocène représentant une phase de transition entre un environnement ouvert de toundra de la fin du Dryas Récent (GS-1) et un environnement forestier dominé par le pin à la fin du Préboréal, i.e., SB3 (Storme et al., 2017).

Fig. 14 - évolution morphologique du fond de la vallée de l'Escaut au cours de l'Holocène inférieur.

Fig. 14 - morphological evolution of the Scheldt Valley during the Early Holocene.

53 Le pourcentage de *Betula* est plus faible que dans les dépôts contemporains du bassin de l'Escaut inférieur. De tels pourcentages ont été retrouvés dans les sédiments d'un chenal sur le site de Ename *Castrum* datant probablement de l'Holocène inférieur, contrairement à l'interprétation initiale (Storme et al., 2017). Il semble exister une relation entre le type de sol et la proximité des forêts de bouleaux au début de l'Holocène, avec des forêts plus denses dans la région sableuse et plus ouvertes dans la région limoneuse. Les courtes variations climatiques de cette période (Hoek et Bos, 2007) ne sont pas reflétées dans l'enregistrement pollinique à Kerkhove.

54 La nature sableuse des interfluves (Bogemans, 2007) et l'évolution du couvert végétal semblent représenter les facteurs déterminants de la mise en place de l'environnement fluvio-lacustre. Les sables éoliens ont probablement favorisé une infiltration rapide des eaux pluviales au cours d'une période marquée par une faible évapotranspiration. L'augmentation des écoulements souterrains a permis d'une part de maintenir un niveau élevé de la nappe phréatique et par conséquent un étiage assez haut de la rivière, et d'autre part, de réduire l'amplitude des événements de haute énergie de la rivière par

la recharge rapide des nappes phréatiques. *A contrario* dans la région des loess, où ces sédiments très sensibles à l'effet splash favorisent les écoulements de surface, les fonds de chenal tardiglaciaires sont colmatés par des alluvions presque jusque vers la fin du Préboréal (Huybrechts, 1999 ; Huybrechts et Verbruggen, 1994).

55 La fermeture de ce paysage au cours du Préboréal provoque un abaissement important de la nappe phréatique indiqué par une phase de pédogenèse (unité V). Elle est soulignée par une décarbonatation, un enrichissement en matière organique, des traces de bioturbations, des capsules de *Lumbricus terrestris* et un environnement oxydant dans l'unité V et/ou au toit de l'unité III. Aucun dépôt alluvial contemporain à l'unité V n'a été observé sur le terrain. Les indices polliniques indiquent une disparition des plantes aquatiques et des algues. Il est probable que les écoulements de fonds de vallée aient pris la forme de ruissellements diffus, ou de petits chenaux temporaires. Bien que la durée précise de cette phase reste inconnue, elle semble être relativement courte dans le fond du chenal sur le site de Kerkove *Stuw* (fig. 12). Sur la levée tardiglaciaire, la pédogenèse débutant probablement dès le Dryas Récent (GS-1) se poursuit jusqu'à l'ensevelissement sous les tourbes.

56 La forte teneur en carbonate et les restes de plantes alignés horizontalement sur les lames minces montrent que l'unité VI est un dépôt alluvial. Cette nature est soulignée par un sédiment transporté par suspension gradée traduisant une situation proche ou en rebord de chenal. De plus, l'absence de pollen indique une forte oxydation à l'origine également de concrétions ferro-manganiques. À partir de ces éléments, il est permis d'interpréter l'unité VI comme une levée alluviale, impliquant la présence d'un chenal à proximité. La granulométrie indique deux phases, soulignées par des taux de matière organique plus importants à leur toit.

57 Il est également possible de considérer la base de la tourbe (unité IX) dans la tranchée T1 comme l'extension de cette levée. Bien qu'elle se situe à des altitudes similaires, il n'y a pas, dans les données, de lien stratigraphique direct entre la levée holocène (unité VI) et la base des tourbes (unité IX) qui s'interstratifie avec les colluvions (unité VII). Néanmoins, les données de l'analyse granulométrique indiquent un environnement alluvial pour la base de l'unité IX avec une partie clastique transportée principalement par suspension gradée. Les unités VI, VII et la base de l'unité IX présentent une signature palynologique identique (biozone K3a pour l'unité VI et l'unité VII ; K3a et K3b pour la base de l'unité IX), ainsi que des taux de microcharbons importants, retrouvés également dans l'unité VII (Crombé et al., 2019). Au cours de la formation de l'unité VI, l'espace piégé entre les levées holocènes et tardiglaciaires représente un environnement marécageux régulièrement inondé, comme le montre la présence de *Mentha aquatica*, etc.

58 Tous ces indices concordent vers une synchronicité de la mise en place des dépôts des unités VI, de la majeure partie de l'unité VII et de la base de l'unité IX (fig. 12 13). La date radiocarbone de l'unité V donne une datation *post quem* du point de rupture environnemental ayant conduit au changement de la dynamique sédimentaire dans le secteur d'études. Ce changement de dynamique se situerait à la fin du Préboréal (SB 3) (Storme et al., 2017) et peut être relié à d'importants feux de forêts prenant place dans un paysage végétal dominé par le pin (Crombé et al., 2019). L'importance du pin dans les feux de forêt induisant des colluvions au cours de l'Holocène inférieur a déjà été soulignée dans l'est de l'Allemagne (Dreibrodt et al., 2010). Pour intervenir sur la dynamique alluviale, l'ouverture du paysage doit être suffisamment fréquente et importante, et par conséquent, il est peu probable que l'homme soit la principale cause des départs de feux de cette époque.

Le début du Boréal est marqué par une disparition des forêts de pin au profit de forêts mixtes de pin, noisetier, chêne et orme beaucoup moins sujettes aux feux de forêt (Cui

et al., 2015 ; Dietze et al., 2018 ; Dreibrodt et al., 2010). Ce changement de couvert végétal s'accompagne sur le site de Kerkhove d'un ralentissement de la dynamique alluviale et d'une extension des milieux marécageux au fond des vestiges du chenal tardiglaciaire. Néanmoins, la dynamique alluviale ne restera pas stable, puisqu'elle sera impactée au moins localement par certains événements climatiques (Storme et al., 2018).

5. Conclusion

60 Les nouvelles données issues de l'étude du site de Kerkhove *Stuw* montrent que les dépôts évoqués sous le terme de gyttja dans les précédentes études effectuées dans la vallée de l'Escaut (Bogemans et al., 2012 ; Heyse et Demoulin, 2017 ; Kiden, 1989, 1991, 2006 ; Meylemans et al., 2013 ; Storme et al., 2017 ; Verbruggen et al., 1991) représentent probablement des dépôts très variés, tels que des colluvions, des alluvions, des sédiments lacustres et/ou des sédiments fluvio-lacustres. En outre, les datations radiocarbone de Kerkhove *Stuw* contestent la datation tardiglaciaire du début de la mise en place de ces dépôts.

61 Du point de vue de l'évolution de la dynamique alluviale, un contrôle de l'évolution du couvert végétal provoquée par les changements climatiques est mis en évidence. Au passage du Tardiglaciaire à l'Holocène, le paysage très ouvert permet la mise en place d'un environnement fluvio-lacustre. À ce moment, la plaine alluviale est restreinte à l'ancien chenal tardiglaciaire. Avec la densification des forêts, l'environnement fluvio-lacustre disparaît et un nouveau chenal se met en place. Ce dernier est mis en évidence indirectement par la présence d'une levée alluviale. À la fin du Préboréal, la dominance du pin amène à de nombreux feux de forêt ayant probablement comme conséquence une dynamique sédimentaire importante, tant colluviale qu'alluviale qui ralentira fortement avec l'apparition des forêts mixtes.

*Auteur correspondant : Tel : +

fredericcruz@hotmail.com (Frédéric Cruz)

Bibliographie

Adam W. (1960) – Faune de Belgique, Mollusques I, Mollusques terrestres et dulcicoles. Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, Bruxelles. 60 p.

Bats M., Crombé P. (2007) – Bovenschelde, vernieuwen en ontdebellen van de stuw te Kerkhove. Archeologisch vooronderzoek. Gent, 45 p. (non publié).

Bats M., Crombé P., Gheyle W., Jacobs J. (2008) – Bovenschelde, vernieuwen en ontdebellen van de stuw te Kerkhove. Fase 2b : Aanvullend Archeologisch Onderzoek. Gent, 27 p. (non publié).

Begemann H.K.S.P. (1974) – The delft continuous soilsampler. Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, 10, 35-37.

DOI : 10.1007/BF02634629

DOI : 10.1007/BF02634629

DOI : 10.1007/BF02634629

Berggren G. (1969) – Atlas of seeds and small fruits of Northwest-European plant species (Sweden, Norway, Denmark, East Fennoscandia and Iceland) with morphological descriptions, part 2: Cyperaceae. Swedish National Research Council, Stockholm. 68 p.

Beug H.-J. (2004) – Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete. Pfeil, München. 542 p.

Blaauw M. (2010) – Methods and code for 'classical' age-modelling of radiocarbon sequences.

Quaternary Geochronology, 5 (5), 512-518.

DOI : 10.1016/j.quageo.2010.01.002

DOI : 10.1016/j.quageo.2010.01.002

DOI : 10.1016/j.quageo.2010.01.002

Bogemans F. (2007) – Kaart en Toelichtingen bij het Kaartblad 29 Kortrijk. Vlaamse overheid, Dienst Natuurlijke Rijkdommen, Vrije Universiteit Brussel. 40 p.

Bogemans F., Meylemans E., Jacobs J., Perdaen Y., Storme A., Verdurmen I., Deforce K. (2012) – The evolution of the sedimentary environment in the lower River Scheldt valley (Belgium) during the last 13,000 BP. *Geologica Belgica*, 15 (1-2), 105-112.

Bogemans F., Vandenberghe D. (2011) – OSL dating of an inland dune along the lower River Scheldt near Aard (East Flanders, Belgium). *Netherlands Journal of Geosciences*, 90 (1), 23-29.

DOI : 10.1017/S0016774600000640

DOI : 10.1017/S0016774600000640

DOI : 10.1017/S0016774600000640

Bos J.A.A., De Smedt P., Demiddele H., Hoek Z.W., Langohr R., Marcelino V., van Asch N., van Damme D., van der Meeren T., Verniers J., Crombé P. (2018) – Weichselian Lateglacial environmental and vegetation development in the Moervaart palaeolake area (NW Belgium) ; implications for former human occupation patterns. *Review of Palaeobotany and Palynology* (248), 1-14.

DOI : 10.1016/j.revpalbo.2017.09.006

DOI : 10.1016/j.revpalbo.2017.09.006

Bos J.A.A., Huisman D.J., Kiden P., Hoek W., van Geel B. (2005) – Early Holocene environmental change in the Kreekrak area (Zeeland, SW-Netherlands): A multi-proxy analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 227, 259-289.

DOI : 10.1016/j.palaeo.2005.05.020

DOI : 10.1016/j.palaeo.2005.05.020

Bravard J.-P., Peiry J.-L. (1999) – The CM pattern as a tool for the classification of alluvial suites and floodplains along the river continuum. *Geological Society, London, Special Publications*, 163 (1), 259-268.

DOI : 10.1144/GSL.SP.1999.163.01.20

DOI : 10.1144/GSL.SP.1999.163.01.20

DOI : 10.1144/GSL.SP.1999.163.01.20

Brown A.G. (1997) – Alluvial geoarchaeology. Floodplain archaeology and environmental change. Cambridge University Press, Cambridge. 404 p.

Cappers R.T.J., Bekker R.M., Jans J.E.A. (2012) – Digitale zadenatlas van Nederland. (2 ed. Vol. 4). Barkhuis & Groningen University Library, Groningen. 502 p.

Cohen K.M., Finney S.C., Gibbard P.L., Fan J.-X. (2020) – The ICS International Chronostratigraphic Chart (2020/05). International Commission on Stratigraphy, IUGS. www.stratigraphy.org (visited 2020/05/08).

DOI : 10.18814/epiiugs/2013/v36i3/002

Crombé P., Storme A., Cruz F., Allemeersch L., Vandendriessche H., Deforce K., Mikkelsen J., Aluwé K., Boudin M., Sergant J. (2019) – Early Holocene slope erosion in the Scheldt basin (Belgium): Naturally and/or human induced? *Geomorphology*, 337, 79-93.

DOI : 10.1016/j.geomorph.2019.03.025

DOI : 10.1016/j.geomorph.2019.03.025

Cruz F., Sergant J., Storme A., Aluwé K., Jacobs J., Vandendriessche H., Noens G., Mikkelsen J., Rozek J., Laloo P., Crombé P. (2019) – Méthodologie d'une recherche paléoenvironnementale en archéologie préventive. In Deák J., Ampe C., & Mikkelsen J. (Eds.): Soils as records of past and present. From soil surveys to archaeological sites: research for interpreting soil characteristics. Raakvlaak, Bruges, 175-188.

DOI : 10.5281/zenodo.3420827

DOI : 10.5281/zenodo.3420827

Cubizolle H. (2009) – Paléoenvironnements. Armand Colin, Paris. 271 p.

Cui Q.Y., Gaillard M.-J., Olsson F., Greisman A., Lemdahl G., Zernova G. (2015) – A case study of the role of climate, humans, and ecological setting in Holocene fire history of northwestern Europe. *Science China*, 58 (2), 195-210.

DOI : 10.1007/s11430-014-4960-y

DOI : 10.1007/s11430-014-4960-y

DOI : 10.1007/s11430-014-4960-y

De Moor G., Heyse I. (1974) – Lithostratigrafie van de Kwartaire afzettingen in de overgangszone tussen de kustvlakte en de Vlaamse Vallei in Noordwest België. *Natuurwetenschappelijk Tijdschrift*, 56, 85-109.

De Moor G., Heyse I. (1978) – De morfologische evolutie van de Vlaamse Vallei. *De aardrijkskunde*, 4, 343-375.

Denys L. (1991) – A check-list of the diatoms in the holocene deposits of the western Belgian coastal plain with a survey of their apparent ecological requirements, vol I. Introduction, ecological code and complete list. *Professional Paper*, 246 (2), 1-41.

Devriese R., Warmoes T., Vercoutere B. (1992) – Land- en zoetwatermollusken van de Benelux, Gent: Jeugdbond voor Natuurstudie en Milieubescherming. Gent: Jeugdbond voor Natuurstudie en Milieubescherming, Gent. 192 p.

Dietze E., Theuerkauf M., Bloom K., Brauer A., Dörfler W., Feeser I., Feurdean A., Gedminienė L., Giesecke T., Jahns S., Karpińska-Kołaczek M., Kołaczek P., Lamentowicz M., Latalowa M., Marcisz K., Obremska M., Pędziszewska A., Poska A., Rehfeld K., Stančikaitė M., Stivrins N., Święta-Musznicka J., Szal M., Vassiljev J., Veski S., Wacnik A., Weisbrodt D., Wiethold J., Vannière B., Słowiński M. (2018) – Holocene fire activity during low-natural flammability periods reveals scale-dependent cultural human-fire relationships in Europe. *Quaternary Science Reviews* (201), 44-56.

DOI : 10.1016/j.quascirev.2018.10.005

DOI : 10.1016/j.quascirev.2018.10.005

Dreibrodt S., Lubos C., Terhorst B., Damm B., Bork H.-R. (2010) – Historical soil erosion by water in Germany: Scales and archives, chronology, research perspectives. *Quaternary International*, 222 (1-2).

DOI : 10.1016/j.quaint.2009.06.014

DOI : 10.1016/j.quaint.2009.06.014

DOI : 10.1016/j.quaint.2009.06.014

Folk R.L. (1954) – The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. *The Journal of Geology*, 62 (4), 344-359.

Folk R.L., Ward W.C. (1957) – Brazos river bar : a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27 (1), 3-26.

DOI : 10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D

DOI : 10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D

DOI : 10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D

Foucault A., Raoult J.-F. (2001) – Dictionnaire de Géologie (5 ed.). Dunod, Paris. 379 p.

Gittenberger E., Janssen A.W., Kuijper W.J., Kuiper J.G.J., Meijer T., Velde G., van der Vries J.N. (2004) – De Nederlandse zoetwatermollusken. Recente en fossiele weekdieren uit zoet en brak water (2 ed.). Nationaal Natuurhistorisch Museum Naturalis, KNNV Uitgeverij & EIS-Nederland, Leiden. 292 p.

Grimm E.C. (2015) – Tilia for windows: pollen spreadsheet and graphics program.

Grosse-Brauckmann G. (1972) – Über pflanzliche Makrofossilien mitteleuropäischer Torfe. I. Gewebereste krautiger Pflanzen und ihre Bestimmung. *Telma*, 2, 19-56.

Grosse-Brauckmann G. (1974) – Über pflanzliche Makrofossilien mitteleuropäischer Torfe. II. Weitere reste (Früchte und Samen, Moose u.a. und ihre Bestimmungsmöglichkeiten). *Telma*, 4, 51-118.

Grosse-Brauckmann G., Streitz B. (1992) – Pflanzliche Makrofossilien mitteleuropäischer Torfe. III. Früchte, Samen und einige Gewebe (Fotos von fossilen Pflanzenresten). *Telma*, 22, 53-102.

Guiry M.D., Guiry G.M. (2016). *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Retrieved 11.17.16 <http://www.algaebase.org>

Hajdas I. (2008) – Radiocarbon dating and its applications. *E&G Quaternary Science Journal*, 57 (1-2), 2-24.

DOI : 10.3285/eg.57.1-2.1

DOI : 10.3285/eg.57.1-2.1

Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. (2001) – Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproductibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 25, 101-110.

DOI : 10.1023/A:1008119611481

DOI : 10.1023/A:1008119611481

Heyse I., Demoulin A. (2017) – The Flemish Valley: Response of the Scheldt Drainage System to Climatic and Glacio-Eustatic Oscillations. In Migoń (Ed.), *Landscapes and Landforms of Belgium and Luxembourg*. Springer, Cham, 297-311.

DOI : 10.1007/978-3-319-58239-9_18

Hoek W.Z., Bos J.A.A. (2007) – Early Holocene climate oscillations-causes and consequences. *Quaternary Science Reviews*, 26 (15-16), 1901-1906.

DOI : 10.1016/j.quascirev.2007.06.008

DOI : 10.1016/j.quascirev.2007.06.008

DOI : 10.1016/j.quascirev.2007.06.008

Houbrechts G., Hallot E., Levecq Y., Denis A.-C., Van Campenhout J., Peeters A., Petit F. (2013) – Images CM de Passegga des rivières ardennaises. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 61, 37-68.

Huybrechts W. (1999) – Post-pleniglacial floodplain sediments in central Belgium. *Geologica Belgica*, 2 (3-4), 29-37.

DOI : 10.20341/gb.2014.009

DOI : 10.20341/gb.2014.009

Huybrechts W., Verbruggen C. (1994) – Rivierlandschappen in Vlaanderen: geomorfologische ontwikkeling. *Landschap*, 11 (2), 3-13.

Jansen A.W., de Vogel E.F. (1965) – Zoetwatermollusken van Nederland. *Nederlandse Jeugdbond voor Natuurstudie*, Amsterdam. 160 p.

Kiden P. (1988) – Holocene palaeohydrology and paleotides in the perimarine lower Scheldt area. *Bulletin de la Société belge d'Etudes Géographiques*, 57, 63-66.

Kiden P. (1989) – The Late Holocene evolution of the perimarine part of the River Scheldt. In Henriet J.P. & D. M. G. (Eds.): *The Quaternary and Tertiary Geology of the Southern Bight, North Sea*. Ministerie van Economische Zaken, Belgische Geologische Dienst, Brussels, 173-184.

Kiden P. (1991) – The Lateglacial and Holocene Evolution of the Middle and Lower River Scheldt, Belgium. In Starkel L., Gregory K. J., & Thornes J. B. (Eds.): *Fluvial processes in the temperate zone during the last 15,000 years : Temperate Paleohydrology*. John Wiley and Sons, 283-299.

Kiden P. (2006) – De evolutie van de Beneden-Schelde in België en Zuidwest-Nederland na de laatste ijstijd. *Belgeo*, 3, 279-294.

DOI : 10.4000/belgeo.12025

DOI : 10.4000/belgeo.12025

DOI : 10.4000/belgeo.12025

Kiden P., Verbruggen C. (2001) – Het verhaal van een rivier : de evolutie van de Schelde na de laatste ijstijd. In Bourgeois J., Crombé P., De Mulder G., & Rogge M. (Eds.): *Een duik in het verleden. Schelde, Maas en Rijn in de pre- en protohistorie*. Het Provinciaal Archeologisch Museum van Zuid-Oost-Vlaanderen-Site, 11-35.

Knörzer K.H. (2009) – Geschichte der synanthropen Flora im Niederrheingebiet. Philipp Von Zabern, Mainz. 484 p.

Komárek J., Jankovská V. (2001) – Review of the green algal genus *Pediastrum* ; implication for pollenanalytical research. *Bibliotheca Phycologica*. J. Cramer, Berlin/Stuttgart. 127 p.

Krammer K., Lange-Bertalot H. (2008) – Die Süßwasserflora von Mitteleuropa 2. Teil 1–4. Springer Spektrum, München.

Lambinon J., Delvosalle L., Duvigneaud J. (2008) – Nouvelle Flore de la Belgique, du Grand-Duché de Luxembourg, du Nord de la France et des régions voisines (2 ed.), Meise. 1167 p.

Magny M., Bégeot C., Ruffaldi P., Bossuet G., Marguet A., Billaud Y., Millet L., Vannière B., Mouthon J. (2002) – Variations paléohydrologiques de 14700 à 11000 cal BP dans le Jura et les Préalpes françaises. In Bravard J.-P., Magny M. (Eds.): *Les fleuves ont une histoire. Paléo-environnement des rivières et des lacs français depuis 15 000 ans*. Errance, Motz, 135-142.

Manneville O., Vergne V., Villepoux O. (2006) – Le monde des tourbières et des marais. Delachaux et Niestlé, Paris. 320 p.

Marjatta A. (1970) – Potamogeton fruits. I. Recent and subfossil endocarps of the fennoscandian species (vol. 88). Societas Pro Fauna et Flora Fennica, Helsinki. 81 p.

Martin K., Sommer M. (2004) – Relationships between land snail assemblage patterns and soil properties in temperate-humid for-est ecosystems. *Journal of Biogeography*, 31, 531-545.

DOI : 10.1046/j.1365-2699.2003.01005.x

DOI : 10.1046/j.1365-2699.2003.01005.x

McGeehin J., Burr G.S., Hodgins G., Bennett S.J., Robbins J.A., Morehead N., Markewich H. (2004) – Stepped-combustion ¹⁴C dating of bomb carbon in lake sediment. *Radiocarbon*, 42 (2), 893-900.

DOI : 10.1017/S0033822200035931

McGeehin J., Burr G.S., Jull A.J.T., Reines D., Gosse J., Davis P.T., Muhs D., Southon J.R. (2001) – Stepped-combustion ¹⁴C dating of sediment: a comparison with established techniques. *Radiocarbon*, 43 (2A), 255-261.

McGowan G., Prangnell J. (2006) – The significance of vivianite in archaeological setting. *Geoarchaeology: an international journal*, 21 (1), 93-111.

DOI : 10.1002/gea.20090

Meylemans E., Bogemans F., Storme A., Perdaen Y., Verdurmen I., Deforce K. (2013) – Lateglacial and Holocene fluvial dynamics in the Lower Scheldt basin (N-Belgium) and their impact on the presence, detection and preservation potential of the archaeological record. *Quaternary International*, 308-309, 148-161.

DOI : 10.1016/j.quaint.2013.03.034

DOI : 10.1016/j.quaint.2013.03.034

Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. (1991) – Pollen analysis. Blackwell Science, Oxford. 216 p.

Mulitza S., Prange M., Stuut J.-B., Zabel M., von Dobeneck T., Itambi A.C., Nizou J., Schulz M., Wefer G. (2008) – Sahel megadroughts triggered by glacial slowdowns of Atlantic meridional overturning. *Paleoceanography*, 23, 1-11.

DOI : 10.1029/2008PA001637

DOI : 10.1029/2008PA001637

DOI : 10.1029/2008PA001637

Nilsson Ö., Hjelmquist H. (1967) – Studies on the nutlet structure of South Scandinavian species of *Carex*. *Botaniska Notiser*, 120, 460-485.

Passega R. (1957) – Texture as characteristic of clastic deposition. *Bulletin of the American Association of petroleum Geologists*, 41 (9), 1952-1984.

DOI : 10.1306/oBDA594E-16BD-11D7-8645000102C1865D

DOI : 10.1306/oBDA594E-16BD-11D7-8645000102C1865D

Passega R. (1964) – Grain size representation by CM Patterns as geological tool. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34 (4), 830-847.

DOI : 10.1306/74D711A4-2B21-11D7-8648000102C1865D

DOI : 10.1306/74D711A4-2B21-11D7-8648000102C1865D

Passega R., Byramjee R. (1969) – Grain-size image of clastic deposits. *Sedimentology*, 13, 233-252. DOI : 10.1111/j.1365-3091.1969.tb00171.

Petit F. (1975) – Zones de dépôts et points d'érosion dans les méandres et les sinuosités du Geer inférieur. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 11, 129-145.

Rasmussen S.O., Bigler M., Blockley S.P., Blunier T., Buchardt S.L., Clausen H.B., Cvijanovic I., Dahl-Jensen D., Johsen S.J., Fischer H., Gkinis V., Guillevic M., Hoek W.Z., Lowe J.J., Pedro J.B., Popp T., Seierstad I.K., Steffensen J.P., Svensson A.M., Vallelonga P., Vinther B.M., Walker M.J., Weatley J.J., Winstrup M. (2014) – A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy. *Quaternary Science Reviews*, 106, 14-28.

DOI : 10.1016/j.quascirev.2014.09.007

DOI : 10.1016/j.quascirev.2014.09.007

DOI : 10.1016/j.quascirev.2014.09.007

Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Haffidason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C.S.M., van der Plicht J. (2013) – Intcal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 55 (4), 1869-1887.

DOI : 10.2458/azu_js_rc.55.16947

DOI : 10.2458/azu_js_rc.55.16947

Roberts N. (1998) – The Holocene. An environmental history. (2^e ed.). Blackwell, Oxford. 316 p.

Ruff M., Fahrni S., Gaggeler H.W., Hajdas I., Suter M., Synal H.-A., Szidat S., Wacker L. (2010) – On-line radiocarbon measurements of small samples using elemental analyzer and Micadas gas ion source. *Radiocarbon* 52 (4), 1645-1656.

DOI : 10.1017/S003382220005637X

DOI : 10.1017/S003382220005637X

DOI : 10.1017/S003382220005637X

Sergeant J., Cruz F., Storme A., Allemeersch L., Aluwé K., Jacobs P., Vandendriessche H., Noens G., Mikkelsen J., Rozek J., Laloo P., Crombé P. (2018) – Kerkhoe "Stuw" - Verslag van de opgraving en analyses van werput 1 en 2 (2015-185). 351 p. (non publié).

Sergeant J., Vandendriessche H., Noens G., Cruz F., Allemeersch L., Aluwé K., Jacops J., Wuyts F., Windey S., Rozek J., Depaepe I., Herremans D., Laloo P., Crombé P. (2016) – Opgraving van een mesolitische wetlandsite te Kerkhove "Stuw" (Avelgem, West-Vlaanderen, BE). Eerste resultaten. *Notae Praehistoricae*, 45-57.

Stockmarr J. (1971) – Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen et Spores*, 13, 615-621.

Stoops G. (2003) – Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Soil Science Society of America, Madison, WI. 184 p.

Storme A., Bastiaens J., Crombé P., Debruyne S., Louwye S., Deforce K. (2018) – Ecology and fluvial dynamics of an Early Holocene medium-sized European lowland river valley (Upper Scheldt, northern Belgium). *Boreas*, 48, 678-694.

DOI : 10.1111/bor.12362

DOI : 10.1111/bor.12362

Storme A., Louwye S., Crombé P., Deforce K. (2017) – Postglacial evolution of vegetation and environment in the Scheldt Basin (northern Belgium). *Vegetation History and Archaeobotany*, 26, 293-311.

DOI : 10.1007/s00334-016-0594-7

van Geel B. (1978) – A palaeoecological study of Holocene peat bog sections in Germany and The Netherlands, based on the analysis of pollen, spores and macro- and microscopic remains of fungi, algae, cormophytes and animals. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1-120.

DOI : 10.1016/0034-6667(78)90040-4

van Geel B., Coope G.R., van der Hammen T. (1989) – Palaeoecology and stratigraphy of the lateglacial type section at Usselo (the Netherlands). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 60, 25-129.

DOI : 10.1016/0034-6667(89)90072-9

DOI : 10.1016/0034-6667(89)90072-9

van Geel B., Hallewas D.P., Pals J.P. (1983) – A Late Holocene deposit under the Westfriese Zeedijk near Enkhuizen (Prov. of Noord-Holland, The Netherlands): Palaeoecological and archaeological aspects. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 38, 269-335.

DOI : 10.1016/0034-6667(83)90026-X

van Geel B., Klink A.G., Pals J.P., Wiegers J. (1986) – An Upper Eemian lake deposit from Twente, eastern Netherlands. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 47, 31-61.

DOI : 10.1016/0034-6667(86)90005-9

DOI : 10.1016/0034-6667(86)90005-9

van Leeuwen C., Huig N., van Der Velde G., van Halen T., Wagemaker C., Sherman C., Klaassen M., Figuerola J. (2013) – How did this snail get here? Several dispersal vectors

inferred for an aquatic invasive species. *Freshwater Biology*, 58 (1), 88-99.

DOI : 10.1111/fwb.12041

DOI : 10.1111/fwb.12041

Van Strydonck M., Van der Borg K. (1990-1991) – The construction of a preparation line for AMS-targets at the Royal Institute for Cultural Heritage Brussels. *Bulletin of the Royal Institute for Cultural Heritage* 23, 228-234.

Verbruggen C., Denys L., Kiden P. (1991) – Paleo-ecologische en geomorfologische evolutie van laag- en Midden-Belgie tijdens het Laat-Kwartair. *De Aadrijkunde*, 3, 3557-3376.

Verbruggen C., Denys L., Kiden P. (1996) – Belgium. In Berglund B.E., Birks H.J.B., Ralska-Jasiewiczowa M., & Wright H.E. (Eds.): *Paleoecological Events During the Last 15 000 Years: Regional Synthese of Paleoecological Studies of Lakes and Mires in Europe*. John Wiley & Sons, 553-574.

Vilvens C., Marée B., Meuleman E., Alexandre M., Waiengnier E., Valtat S. (2008) – Mollusques terrestres et dulcicoles de Belgique. Tome I: Gastéropodes terrestres à coquilles (1ère partie). Société Belge de Malacologie, Jodogne. 60 p.

Weeda E.J., Westra R., Westra C., Westra T. (1985/1994) – *Nederlandse oecologische Flora. Wilde planten en hun relaties*. IVN/VARA and Vewin, Amsterdam.

Wetzel R.G. (2001) – *Limnology: Lake and River Ecosystems* (3 ed.). Elsevier, San Diego. 1005 p.

Annexe

Abridged English Version

From the 1990s until very recently, the Scheldt valley of the end of Lateglacial and the Early Holocene was recognized as a low energy environment (Kiden, 1991; Bogemans et al., 2012; Storme et al., 2017), contrasting with the great climate change that characterizes this period (Rasmussen et al., 2014; Magny et al., 2002; Roberts, 1998). Taking advantage of an archaeological excavation of the Mesolithic occupation of Kerkhove Stuw (fig. 1), a multidisciplinary palaeoenvironmental study was undertaken to improve the knowledge of the landscape evolution in the Middle Scheldt Valley. The study is based on a large transect of mechanized and manual boreholes (fig. 2), several long profiles (fig. 1-3) and laboratory analyzes consisting of sedimentological analyses (LOI, grain size analysis and Passega diagram), microfossil analyses (pollen, diatoms and micro-charcoal), archaeobotanical analyzes, malacology and micromorphology.

The sediments dated to the Pleniglacial are composed of very stratified glauconitic sand (Unit I), deposited by a braided river. With a very large spatial extension (fig. 2), these deposits present a wide depression, at their top incised by the lateral movements of the Lateglacial River. This Lateglacial River was characterized by a large meandering system of which the date of establishment remains unknown. On the archaeological site, the Lateglacial alluvium (Unit II) consists of silty bedded sands (fig. 3-4) forming an elevation (fig. 1) that was interpreted as a natural levee. On the other side of the Lateglacial channel (fig. 2), whose location is occupied by the current river, the top of the Lateglacial alluvium presents a slight undulation, highlighting point bars.

The bottom of the Lateglacial channel is initially filled in with whitish layers of sandy silts. The malacological spectrum includes *Bithynia tentaculata*, *Acroloxus lacustris* and *Valvata cristata*, which live in temperate periods (Bos et al., 2018; Gittenberger et al., 2004). These deposits are dated to the Early Holocene (Unit III) (tab. 1, fig. 2, 4). As shown in the Passega diagram (fig. 5), micromorphological sections (fig. 6) and palynological data (fig. 7-9), they present characteristics of both deposits of lake and fluvial environment, which evolve spatially and over time. Consequently, the term fluvio-lacustrine sediment appears to be more appropriate than gyttja, which is generally used for similar deposits in the Lower Scheldt Basin (Bogemans et al., 2012; Heyse and Demoulin, 2017; Kiden, 1989, 1991, 2006; Meylemans et al., 2013; Storme et al., 2017; Verbruggen et al., 1991). On the slopes, the landscape presents a transition from a tundra landscape at the end of the Late Dryas towards a forest environment dominated by pine at the end of the Preboreal (fig. 8-9). Outside the Lateglacial channel, this period is marked by a pedogenesis setting up a greyish soil (Unit V) (fig. 2-4). The presence of this soil on the top of carbonate sandy silts (Unit III) (fig. 2-4) indicates a phase of significant lowering of the water table.

A return of sedimentary dynamics is marked, on the one hand, by the presence of a deposit of greenish clayey silts (Unit VI) (fig. 2-4) near the center of the old large Lateglacial channel, which

forms the Early Holocene alluvial plain, and on the other hand, by blackish silty colluvium on the slope of the Lateglacial levee (Unit VII) (fig. 2-4). This colluvium interstratifies with brown peat (base of Unit IX) (fig. 2-4). The contemporaneity of these three layers (base Unit IX, Unit VI, and Unit VII) is underlined by their similar pollen spectrum and high concentrations of charcoal. This change in dynamics is dated to the end of the Preboreal (tab. 1, fig. 13) and is interpreted to be induced by frequent forest fires. This phenomenon requires a high fire frequency over a very large area to influence the alluvial dynamics and hence points to the hypothesis of a natural cause. At the beginning of the Boreal, the addition of hazelnut, oak and elm to the pine forests created mixed forests (fig. 8-9), which are much less prone to forest fires. This caused deceleration of sedimentary dynamics. The peat completes the filling of the large channel before extending to the whole of the Lateglacial alluvial plain (fig. 2).

At the Kerkhove *Stuw* site, the evolution of sediment dynamics is not represented by a long and continuous slowdown from the end of the Lateglacial to the Subatlantic. By contrast, it is made up of variations (fig. 14) led by the vegetation development and major climatic changes.

Table des illustrations

	<p>Titre</p> <p>Fig. 1 - localisation du site d'études (DNG : deuxième niveau général prenant comme point de référence le niveau moyen des marées basses dans le port d'Ostende, tel que mesuré durant la période 1834 – 1853).Fig. 1 - location of the study site (DNG: second general level taking as a reference point the average level of low tides in the port of Ostend, as measured during the period 1834-1853).</p>
<p>Légende</p> <p>A : Localisation. 1. Couverture sableuse ; 2. Région limoneuse ; 3. Vallée flamande ; 4. Rivière. B : Configuration de la fouille sur la levée tardiglaciaire. 1. Secteur de fouilles ; 2. Tranchée ; 3. Forages B1.1 à B1.7 ; 4. Forage Begemann.A: <i>Situation. 1. Sand belt; 2. Loess area; 3. Flemish Valley; 4. River. B: setting of the excavation on the Lateglacial levee. 1. Excavation; 2. Trench; 3. Cores B1.1 to B1.7; 4. Begemann core.</i></p>
	<p>URL</p> <p>http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/15954/img-1.jpg</p>
	<p>Fichier</p> <p>image/jpeg, 284k</p>
	<p>Titre</p> <p>Fig. 2 - lithological cross-section across the middle Scheldt alluvial plain in the area of the Kerkhove Stuw excavation.Fig. 2 - transect lithologique à travers la plaine alluviale de l'Escaut moyen dans le secteur de la fouille de Kerkhove Stuw.</p>
<p>Légende</p> <p>A : transect de corrélations. 1. Sable silteux (unité XVI) ; 2. Sédiment anthropique (unité XV) ; 3. Sable anthropique (unité XIV) ; 4. Argile silteuse (unité XIII) ; 5. Argile compacte (unité XII) ; 6. Silt brun à coquilles (unité XI) ; 7. Argile organique (X) ; 8. Tourbe argileuse (unité IX) ; 9. Tourbe tufacée (unité VIII) ; 10. Silt organique (unité VII) ; 11. Silt argileux (unité VI) ; 12. Sable homogène (unité IV) ; 13. Silt stratifié (unité III) ; 14. Sable silteux lité (unité II) ; 15. Sable stratifié (unité I) ; 16. Horizon Ap ; 17. Horizon A (unité V). B. localisation des types de forages. 1. Secteur de fouilles ; 2. tranchée ; 3. Forage manuel ; 4. Forage Begemann.A: cross-section. 1. Silty sand (Unit XVI); 2. Anthropical layer (Unit XV); 3. Anthropical sand (Unit XIV); 4. Silty clay (Unit XIII); 5. Hard clay (Unit XII); 6. Brown silt with shells (Unit XI); 7. Organic clay (Unit X); 8. Clayey peat (Unit IX); 9. Tufaceous peat (Unit VIII); 10. Organic silt (Unit VII); 11. Clayey silt (Unit VI); 12. Homogeneous sand (unit IV); 13. Stratified silt (Unit III); 14. Bedded silty sand (Unit II); 15. Stratified sand (Unit I); 16. Ap horizon; 17. A horizon (Unit V). B. setting of different cores. 1. Excavation; 2. Trench; 3. Manual core; 4. Begemann core.</p>
	<p>URL</p> <p>http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/15954/img-2.jpg</p>
	<p>Fichier</p> <p>image/jpeg, 180k</p>
<p>Titre</p> <p>Fig. 3 - Coupe de la tranchée T1 avec les grandes unités stratigraphiques (chiffres romains) et l'ensemble des prélèvements.Fig. 3 - Cross-section of trench T1 with the main stratigraphic units (Roman numerals) and all samples.</p>
	<p>URL</p> <p>http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/15954/img-3.jpg</p>
	<p>Fichier</p> <p>image/jpeg, 128k</p>
<p>Titre</p> <p>Fig. 4 - Perte au feu, granulométrie, et susceptibilité magnétique du forage B1.1 et du transect T1.Fig. 4 - Loss on ignition, grain-size analysis, and magnetic susceptibility of core B1.1 and cross-section T1.</p> <p>1. Sable très grossier (1-2 mm) ; 2. Sable grossier (500 µ-1 mm) ; 3. Sable moyen (250-500 µm) ; 4. Sable fin (125-250 µm) ; 5. Sable très fin (63-125 µm) ; 6. Silt très grossier (31-63 µm) ; 7. Silt grossier (16-31 µm) ; 8. Silt moyen (8-16 µm) ; 9. Silt fin (4-8 µm) ; 10. Silt très fin (2-4 µm) ; 11. argile (< 2 µm) ; 12. prélèvement pour lame mince ; 13. Matière organique ; 14. Carbonate ; 15. Résidus.1. <i>Very coarse sand (1-2 mm); 2. Coarse sand (500 µ-1 mm); 3. Medium sand (250-500 µm); 4. Fine sand (125-250 µm); 5. Very fine sand (63-125 µm); 6. Very coarse silt (31-63 µm); 7. Coarse silt (16-31 µm); 8. Medium silt (8-16 µm); 9. Fine silt (4-8 µm); 10. Very fine silt (2-4 µm); 11. Clay</i></p>

		($<2\ \mu\text{m}$); 12. <i>sample for thin-section</i> ; 13. <i>Organic matter</i> ; 14. CaCO_3 ; 15. <i>Residue</i> .
	URL	http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/15954/img-4.jpg
	Fichier	image/jpeg, 400k
	Titre	Fig. 5 - Image CM sur le site de Kerkhove Stuw. <i>Fig. 5 - CM pattern at the Kerkhove Stuw site.</i>
Légende	1. Ligne médiane ; 2. Unité III dans les tranchées T1 à T3 ; 3. Unité III dans le forage B1.1 ; 4. Unité VI ; 5. Unité IX ; 6. Diagramme C-M du site de Oudenaarde Stuw (Storme A. et al., 2017). T : suspension pélagique ; SR : suspension uniforme ; RQ : suspension gradée sans roulage ; PO : suspension de fond et roulage ; ON : roulage ; Cr = taille minimum des grains transportés par roulage ; Cs = taille maximum des grains transportés par suspension ; Cu = taille maximum des grains transportés par suspension homogène. 1. <i>Median line</i> ; 2. <i>Unit III from trench T1 to T3</i> ; 3. <i>Unit III from core B1.1</i> ; 4. <i>Unit VI</i> ; 5. <i>Unit IX</i> ; 6. <i>C-M pattern from Oudenaarde Stuw site (Storme A. et al., 2017)</i> . T: <i>pelagic suspension</i> ; SR: <i>uniform suspension</i> ; RQ: <i>graded suspension no rolling</i> ; PO: <i>bottom suspension and rolling</i> ; ON: <i>rolling</i> ; Cr: <i>minimum grain size transported as rolling</i> ; Cs: <i>maximum grain size transported as graded suspension</i> ; Cu: <i>maximum grain size transported as uniform suspension</i> .
	URL	http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/15954/img-5.jpg
	Fichier	image/jpeg, 120k
	Titre	Fig. 6 - Photographies de détails des lames minces des unités III (A, B, C, D, E) et VI (F, G) du forage B1.1. <i>Fig. 6 - Detail views of thin-sections from units III (A, B, C, D, E) and VI (F, G) from boring B1.1.</i>
Légende	A : Restes de diatomées et de spicules d'éponges dans les dépôts lacustres du prélèvement 3 (LPA) ; B : Apparence plus grossière d'une lamine à calcite détritique du prélèvement 2 (LPA) ; C : Partie de séquence lacustre composée de silt carbonaté à lamines de silt sableux alluvial du prélèvement 4 (LPA) ; D : Niveau plus grossier (flèche rouge) indiquant un apport alluvial dans les dépôts lacustres du prélèvement 3 (LPA) ; E : Microstructure composée de fines lamines à matériel calcaire abondant du prélèvement 2 (LPA) ; F et G : Matrice fine fortement phosphatée du prélèvement 1 (1 : LPNA ; 2 : LPA). A: <i>Diatom remain and sponge spicules in lacustrine deposit of the sample 3 (XPL, crossed polarized light)</i> ; B: <i>Coarser layer appearance, with detrital calcite of the sample 2 (XPL)</i> ; C: <i>Part of the sequence of lacustrine carbonatic silt with alluvial sandy silt layer of the sample 4 (XPL)</i> ; D: <i>Coarser (red arrow) layer due to alluvial material input in the lacustrine deposit of the sample 3 (XPL)</i> ; E: <i>Fine layer microstructure including abundant calcareous material of the sample 2 (XPL)</i> ; F and G: <i>Highly phosphatic fine matrix of the sample 1 (1: PPL, plane polarized light; 2: XPL)</i> .
	URL	http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/15954/img-6.jpg
	Fichier	image/jpeg, 652k
	Titre	Fig. 7 - diagramme de répartition des diatomées de l'unité III sur le forage B1.1. <i>Fig. 7 - distribution diagram of diatoms from unit III in core B1.1.</i>
Légende	A : Pourcentages des taxons. Les fréquences inférieures à 0,5 % sont marquées d'un point ; B : Pourcentages des groupes écologiques. A: <i>Percentages of taxa. Frequencies below 0.5% are marked by a dot</i> ; B: <i>Percentages of ecological groups</i> .
	URL	http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/15954/img-7.jpg
	Fichier	image/jpeg, 404k
Titre	Fig. 8 - Diagramme pollinique en pourcentages du forage B1.1. <i>Fig. 8 - Percentage pollen diagram of core B1.1.</i>

URL	http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/15954/img-8.jpg
	Fichier	image/jpeg, 404k
	Titre	Fig. 9 - Diagramme pollinique en pourcentages de transect T1 (seq. 1-3).Fig. 9 - Percentage pollen diagram of trench T1 (seq. 1-3).
URL	http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/15954/img-9.jpg
	Fichier	image/jpeg, 384k
	Titre	Fig.10 - Diagramme des macrorestes dans la tranchée T1 (sélection des taxons les plus fréquents).Fig.10 - Diagram of plant macro remains in trench T1 (selection of the most frequent taxa).
Légende	1. Plan d'eau ouvert, riche en nutriments et plantes émergentes ; 2. Plan d'eau ouvert, riche en nutriments et pionnier ; 3. Plantes émergentes et végétation humides, herbacée ; 4. Végétation herbacée, humide à très humide ; 5. Pionniers humides à très humides, riche en nutriments ; 6. Végétation assez humide, très riche en nutriments ; 7. Arbres et arbustes ; 8. Autres ; 9. Animaux. <i>1. Nutrient-rich open water and emergent plants; 2. Nutrient-rich open water and pioneers; 3. Emergent plants and wet herbaceous vegetation; 4. Wet to moist, herbaceous vegetation; 5. Wet to moist pioneers, nutrient-rich; 6. Moderately wet, very nutrient-rich vegetation; 7. Trees and shrubs; 8. Others; 9. Animals.</i>
	URL	http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/15954/img-10.jpg
	Fichier	image/jpeg, 256k
Titre	Fig. 11 - Mollusques déterminés dans l'unité III (T1).Fig. 11 - Mollusc taxa in unit III (T1).
	Légende	Barres colorées : nombre d'exemplaires exacts ; barres blanches : estimations ($n < 20 = 15$; $n > 20 = 30$; $n \cdot 10 = 50$; $n > 100 = 200$; $n \cdot 100 = 300$). <i>Colored bars: exact number of individuals; white bars: estimates ($n < 20 = 15$; $n > 20 = 30$; $n \cdot 10 = 50$; $n > 100 = 200$; $n \cdot 100 = 300$).</i>
	URL	http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/15954/img-11.jpg
Fichier	image/jpeg, 188k
	Titre	Tab. 1 - Tableau des datations radiocarbone.Tab. 1 - Table of radiocarbon dating.
	URL	http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/15954/img-12.jpg
Fichier	image/jpeg, 428k
	Titre	Fig. 12 - comparaison des courbes temps/profondeur entre B1.1 (secteur le plus profond reconnu du chenal tardiglaciaire) et T1 (rebord du chenal tardiglaciaire).Fig. 12 - comparison of time/depth curves between B1.1 (deepest sector recognized of the Lateglacial channel?) and T1 (edge of the Lateglacial channel).
	URL	http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/15954/img-13.jpg
Fichier	image/jpeg, 104k
	Titre	Fig. 13 - Synthèse chronologique prenant en compte la stratigraphie du site et les datations radiocarbone ; datation de l'unité V dans le secteur le plus profond reconnu du chenal tardiglaciaire.Fig. 13 - chronological synthesis taking into account the site's stratigraphy and radiocarbon dates; dating of unit V at the bottom of the Lateglacial channel.
	URL	http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/15954/img-14.jpg
	Fichier	image/jpeg, 36k

Titre	Fig. 14 - évolution morphologique du fond de la vallée de l'Escaut au cours de l'Holocène inférieur. <i>Fig. 14 - morphological evolution of the Scheldt Valley during the Early Holocene.</i>
URL	http://journals.openedition.org/geomorphologie/docannexe/image/15954/img-15.jpg
Fichier	image/jpeg, 216k

Pour citer cet article

Référence électronique

Frédéric Cruz, Annelies Storme, Luc Allemeersch, Joris Sergant, Hans Vandendriessche, Kim Aluwé, Mathieu Boudin, Jari Mikkelsen et Philippe Crombé, « Le paléoenvironnement de l'Escaut moyen sur le site de Kerkhove *Stuw* (Flandre Occidentale, Belgique) au cours de l'Holocène inférieure », *Géomorphologie : relief, processus, environnement* [En ligne], Articles sous presse, mis en ligne le 30 novembre 2021, consulté le 02 décembre 2021. URL : <http://journals.openedition.org/geomorphologie/15954>

Auteurs

Frédéric Cruz

Gate bvba, Dorpstraat 73, B-8450 Bredene, Belgique

Annelies Storme

Gate bvba, Dorpstraat 73, B-8450 Bredene, Belgique

Luc Allemeersch

Gate bvba, Dorpstraat 73, B-8450 Bredene, Belgique

Joris Sergant

Gate bvba, Dorpstraat 73, B-8450 Bredene, Belgique

Hans Vandendriessche

Université de Gand, département d'archéologie, Sint-Pieternieuwstraat 35, B-9000 Gand, Belgique

Kim Aluwé

Gate bvba, Dorpstraat 73, B-8450 Bredene, Belgique

Mathieu Boudin

Institut Royal pour le Patrimoine artistique, Jubelpark 1, B-1000 Bruxelles, Belgique

Jari Mikkelsen

Raakvlak, Komvest 45, B-8000 Brugge, Belgique

Philippe Crombé

Université de Gand, département d'archéologie, Sint-Pieternieuwstraat 35, B-9000 Gand, Belgique

Droits d'auteur

© Groupe français de géomorphologie