



**HAL**  
open science

# Le temps long de la construction des territoires de l'archipel croate du Kvarner (îles de Krk et Cres)

Marine Rousseau

## ► To cite this version:

Marine Rousseau. Le temps long de la construction des territoires de l'archipel croate du Kvarner (îles de Krk et Cres). Archéologie et Préhistoire. Université Bourgogne Franche-Comté, 2022. Français. NNT : 2022UBFCC008 . tel-04376766

**HAL Id: tel-04376766**

**<https://theses.hal.science/tel-04376766>**

Submitted on 7 Jan 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

*ECOLE DOCTORALE SOCIETE-ESPACE-TEMPS*

**Laboratoire Chrono-environnement UMR CNRS 6249**

**THÈSE** présentée par :

**Marine ROUSSEAU**

Soutenue publiquement le 06/07/2022

Pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université de Franche-Comté**

Discipline/Spécialité : **Paleoenvironnement - Archéologie**

---

## **Le temps long de la construction des territoires de l'archipel croate du Kvarner (îles de Krk et Cres)**

---

Devant le jury composé de :

**LEBRETON, Vincent**, Professeur, Museum National d'Histoire Naturelle (Paris)

**PETIT, Christophe**, Professeur, Université Paris 1

**BOETTO, Giulia**, directrice de recherche, CNRS, UMR 7299 (Aix-en-provence)

**SORREL, Philippe**, Maître de conférence, Université Lyon 1 Claude Bernard

**Rapporteur**

**Rapporteur**

**Présidente**

**Examineur**

**RICHARD, Hervé**, Directeur de recherche émérite CNRS, Université de Franche-Comté

**ČAUSEVIC-BULLY, Morana**, Maître de conférence, Université de Franche-Comté

**Directeur**

**Co-directrice**

**GORI, Maja**, Chercheuse, Centre National de la Recherche (Rome)

**Invitée**

*Je souhaite dédier ce mémoire de thèse à mon père, la personne qui m'a insufflée cette passion pour les sciences et la géologie. Il m'a aussi appris la rigueur du travail, la patience et la persévérance. Cette thèse est le signe pour moi d'avoir tenu une promesse faite il y a bien longtemps...*

*« Mieux vaut mille refus qu'une promesse non tenue. » proverbe chinois*



## Table des matières

TABLE DES MATIERES.....	0
REMERCIEMENTS.....	8
INTRODUCTION.....	12
<b>I. : CONTEXTE HISTORIQUE ET CADRE GEOGRAPHIQUE DE L'ARCHIPEL DU KVARNER .....</b>	<b>18</b>
I.1 PARTIE 1 : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE, GEOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE .....	19
I.1.1 <i>Le Kvarner, un système karstique</i> .....	19
I.1.2 <i>Élévation du niveau marin depuis la fin du Pléistocène</i> .....	26
I.2 PARTIE 2 : CLIMAT DE LA REGION DU KVARNER .....	27
I.2.1 <i>Vents et précipitations</i> .....	27
I.2.2 <i>Températures</i> .....	29
I.3 PARTIE 3 : CARACTERISATION DES SOLS ET DE LA VEGETATION .....	30
I.3.1 <i>Les sols</i> .....	30
I.3.2 <i>Distribution de la végétation et des surfaces agricoles</i> .....	30
I.3.3 <i>Agriculture, arboriculture et pastoralisme actuels</i> .....	35
I.4 PARTIE 4 : CONTEXTE PREHISTORIQUE ET HISTORIQUE .....	40
I.4.1 <i>Préhistoire</i> .....	40
I.4.2 <i>Protohistoire</i> .....	44
I.4.3 <i>Époque romaine</i> .....	47
I.4.4 <i>Moyen Âge</i> .....	55
I.4.5 <i>Époque moderne et contemporaine</i> .....	57
<b>II. : METHODES .....</b>	<b>60</b>
II.1 PARTIE 1 : RECONSTRUCTION DES PALEOENVIRONNEMENTS.....	61
II.1.1 <i>Approche multi-paramètre et impact sur l'environnement</i> .....	61
II.1.2 <i>Technique de carottage</i> .....	64
II.1.3 <i>Carotte composite</i> .....	66
II.1.4 <i>Stratégie d'échantillonnage</i> .....	66
II.2 PARTIE 2 : DESCRIPTION DES METHODES.....	71
II.2.1 <i>Datations radiométriques</i> .....	71
II.2.2 <i>Analyses diagraphiques</i> .....	77
II.2.3 <i>Analyses micro- et macroscopiques</i> .....	85
II.2.4 <i>Analyses géochimiques</i> .....	90
<b>III. : DESCRIPTION DES LACS ET RESULTATS .....</b>	<b>96</b>
III.1 PARTIE 1 : LE LAC VRANA (VRANSKO JEZERO), ILE DE CRES .....	97
III.1.1 <i>Généralités</i> .....	97
III.1.2 <i>Végétation aquatique</i> .....	100
III.1.3 <i>Nature et évolution des sédiments lacustres</i> .....	101
III.1.4 <i>. VRA_2018</i> .....	105
III.1.5 <i>Résultats</i> .....	105
III.2 PARTIE 2 : LE LAC OMISALJ, ILE DE KRK .....	143
III.2.1 <i>Données physico-chimiques</i> .....	143
III.2.2 <i>Historique de l'anthropisation récente</i> .....	145
III.2.3 <i>OMI_2018</i> .....	146
III.2.4 <i>Résultats</i> .....	148
III.3 PARTIE 3 : LES LACS D'OSOR ET DE PUNTA SECCA .....	159

## Chapitre I / Table des matières

III.3.1	Généralités .....	159
III.3.2	Résultats .....	161
<b>IV.</b>	<b>: DISCUSSION .....</b>	<b>180</b>
<b>V.</b>	<b>: CONCLUSION .....</b>	<b>206</b>
V.1	RESULTATS PRINCIPAUX .....	207
V.2	PERSPECTIVES .....	210
<b>VI.</b>	<b>: REFERENCES .....</b>	<b>214</b>
<b>VII.</b>	<b>: LEXIQUE .....</b>	<b>246</b>
<b>VIII.</b>	<b>: ANNEXES.....</b>	<b>250</b>
VIII.1	ANNEXES 1 : PLANCHE DES MACRORESTES VEGETAUX SUR VRA_2018.....	250
VIII.2	ANNEXES 2 : PLANCHE DES MACRORESTES VEGETAUX SUR OMI_2018 .....	252
VIII.3	ANNEXES 3 : PLANCHE DES MACRORESTES VEGETAUX SUR PS_2018.....	253
VIII.4	ANNEXE 4 : DIAGRAMME POLLINIQUE COMPLET DU LAC VRANA .....	254
VIII.5	ANNEXE 5 : DIAGRAMME POLLINIQUE COMPLET DU LAC OMISALJ .....	255
VIII.6	ANNEXE 6 : DIAGRAMME POLLINIQUE COMPLET DU LAC D'OSOR .....	256
VIII.7	ANNEXE 7 : DIAGRAMME POLLINIQUE COMPLET DU LAC DE PUNTA SECCA .....	257
VIII.8	ANNEXE 8 : TESTS DE PERTE AU FEU SUR LE LAC VRANA (VRA_2018) .....	258
VIII.9	ANNEXE 9 : ANALYSE DE CRISTALLOGRAPHIE AUX RAYONS X.....	259
VIII.10	ANNEXE 10 : ANALYSE DE MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE.....	265
VIII.11	ANNEXE 11 : PHOTOGRAPHIES DES POLLENS DE TYPES « CEREAIA » .....	266

## Table des illustrations

FIGURE 1. FONCTIONNEMENT D'UN ARCHIPEL .....	13
FIGURE 2. LOCALISATION DES LACS ETUDIES (OSOR, VRANA, PUNTA SECCA ET OMISALJ) ET DES SITES ARCHEOLOGIQUES SUR L'ARCHIPEL DU KVARNER (REGION ADRIATIQUE) .....	14
FIGURE 3. LOCALISATION DU GOLFE DU KVARNER ET DES ILES QUI LE COMPOSENT (CRES, KRK, PAG, RAB ET LOSINJ). LES POINTS JAUNES CORRESPONDENT AUX SITES DE FORAGE.....	20
FIGURE 4. DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME KARSTIQUE. ILLUSTRATION OBTENUE DE <b>NICOD (2003)</b> .....	21
FIGURE 5. CARTE GEOLOGIQUE DU GOLFE DU KVARNER OBTENUE DE L'INSTITUT GEOLOGIQUE CROATE ( <a href="http://webgis.hgi-cgs.hr/gk300/default.aspx">HTTP://WEBGIS.HGI-CGS.HR/GK300/DEFAULT.ASPX</a> ).....	23
FIGURE 6. FORMATION DE LA MER ADRIATIQUE NORD A LA TRANSITION PLEISTOCENE-HOLOCENE ( <b>BROMMER ET AL., 2009</b> ).....	24
FIGURE 7. EVOLUTION DU NIVEAU MARIN DE L'ADRIATIQUE NORD A L'HOLOCENE EN ACCORD AVEC DIFFERENTS AUTEURS ( <b>FAIRBRIDGE, 1961 ; SHEPARD, 1963 ; MORNER, 1969</b> ). ILLUSTRATION OBTENUE DE <b>GAMBOLATI ET AL., 1998</b> .....	25
FIGURE 8. DIRECTION ET VITESSE DES VENTS AU COURS DE L'ANNEE DANS DIFFERENTES STATIONS METEOROLOGIQUES DE LA BAIE DU KVARNER : RIJEKA-OMISALJ (ILE DE KRK ; 85 M A.S.L), CRES (ILE DE CRES ; 11 M A.S.L), RAB (ILE DE RAB ; 20 M A.S.L) ; NJIVICE (ILE DE KRK ; 69 M A.S.L) .....	28
FIGURE 9. DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE ENTRE 2015 ET 2021 POUR LA BAIE DU KVARNER (HIKERSBAY.COM) .....	29
FIGURE 10. CARTE DES SOLS DANS LA BAIE DU KVARNER RETRACER D'APRES LA CARTE DE <b>BOGUNOVIC ET AL., 1996</b> .....	31
FIGURE 11. CARTE DE L'UTILISATION DES TERRES SUR L'ARCHIPEL DU KVARNER (CORINE PROGRAMME 2000) .....	34
FIGURE 12. COUPE A TRAVERS UNE VIEILLE OLIVETTE DE PUNAT SUR L'ILE DE KRK (ILLUSTRATION REDESSINEE DE <b>NICOD, 1990</b> ). V – VARVAKAN, MURS D'EPierreMENT SURMONTES DE MURETTES DETERMINANT UN CHEMIN DE TRANSHUMANCE (DRAILLE) ; R – ROCHER, A ENCOCHE DE CORROSION PERMETTANT D'EVALUER L'EROSION DU SOL .....	36
FIGURE 13 AMENAGEMENTS ANCIENS A PUNAT SUR L'ILE DE KRK ( <b>GAMS, 1991A</b> ). TYPES DE MURS : 1. ENCLOS ; 2. SOUTÈNEMENT ; 3. AMAS DE PIERRE ; 4. ROCHERS ; 5. PARCELLES DE VIGNE .....	36
FIGURE 14. VERGER SUR DES TERRASSES DE CULTURES AU NORD DE PUNAT SUR L'ILE DE KRK ( <b>GAMS, 1991A</b> ). 1 – SOL NETTOYE. 2 - AFFLEUREMENT ROCHEUX. 3 - RANGEE DE BLOCS ACCUMULES. 4 - BUISSONS. 5 - GRAND AMAS DE BLOC. 6 - STATION DE MESURE. 7 - ESCARPÈMENT. 8 - ESCARPÈMENT ROCHEUX. 9 - VARVAKAN. 10 - VARVAKAN AVEC AJOUT D'UNE RANGEE. 11 - MUR SIMPLE. 12 - OLIVIER. 13 - STATION DE MESURE PRINCIPALE. 14 - STATION DE MESURE SUPPLEMENTAIRE. 15 - PROFONDEUR (EN M). .....	37
FIGURE 15. VELI MRGAR SUR L'ILE DE KRK. ....	38
FIGURE 16. SITES IMPORTANTS DU PALEOLITHIQUE EN CROATIE : 1. ŠANDALJA, 2. VINDIJA, 3. VELIKA PEĆINA, 4. KRAPINA, 5. BUKOVAC PECINA, 6. PUPICINA, 7. VELIKA PECINA, KLICERICA, 8. KASTEL ŠTAFILIC, 9. MUJINA PECINA, 10. VELI RAT (ILE DE DUGI). ILLUSTRATION MODIFIEE DE LA PUBLICATION DE <b>KARAVANIC, 2003</b> .....	41
FIGURE 17. CARTE DE LA FORMATION DE LA MER NORD ADRIATIQUE A LA TRANSITION PLEISTOCENE-HOLOCENE ET LOCALISATION DES SITES DE PEUPELEMENT DATES DE LA TRANSITION MESOLITHIQUE-NEOLITHIQUE D'APRES <b>BIRCH &amp; MIRACLE, 2017</b> .....	42
FIGURE 18. CARTE DES PHASES DE DEVELOPPEMENT DE L'AGRICULTURE DANS LE BASSIN ADRIATIQUE D'APRES <b>FORENBAHER ET AL., 2005</b> . LES FLECHES NOIRES CORRESPONDENT A LA PREMIERE PHASE RAPIDE DE LA COLONISATION PAR « SAUTE-MOUTON » ASSOCIEE AU COURANT IMPRESSA. LES LIGNES GRISÈS CORRESPONDENT A LA SECONDE PHASE « D'EXPANSION AGROPASTORALE ». ENFIN, LES LIGNES BLANCHES CORRESPONDENT A LA TROISIEME PHASE « D'EXPANSION AGROPASTORALE » ASSOCIEE AUX POTERIES DANILO/VLASKA. ....	44
FIGURE 19. CARTE DES SITES DE L'AGE DU BRONZE ET DU FER DANS LA REGION DE L'ISTRIE ET DU KVARNER D'APRES LA PUBLICATION DE <b>ČUCKOVIC (2017)</b> DONT LES DONNEES ONT ÈTE OBTENUES DE <b>MARCHESETTI (1903, 1924), MIROSAVLJEVIC (1974), BATOVIC (1977) ET BURSIC-MATIJSIC (2007)</b> .....	45
FIGURE 20. CARTE DE REPARTITION DES SITES FORTIFIES SUR L'ILE DE CRES ET DE LOSINJ ( <b>ČUCKOVIC, 2017</b> ).....	46
FIGURE 21. CARTE DES PRINCIPAUX SITES RURAUX SUR L'ARCHIPEL DU KVARNER ENTRE IER ET LE IVÈME SIECLE APRES J.-C OBTENU DES TRAVAUX DE THESE DE <b>ČAUSEVIC-BULLY 2013</b> .....	49
FIGURE 23. REPARTITION DES SITES OCCUPES AU NORD DE L'ILE DE CRES DE L'ANTIQUITE AU DEBUT DU MOYEN ÂGE ( <b>JURKOVIC, 2019</b> ).....	51

FIGURE 23. REPARTITION DES SITES OCCUPES AU SUD DE L'ILE DE CRES DE L'ANTIQUITE AU DEBUT DU MOYEN ÂGE (JURKOVIC, 2019)	51
FIGURE 24. REPARTITION DES SITES OCCUPES SUR L'ILE DE KRK DE L'ANTIQUITE AU DEBUT DU MOYEN-AGE (JURKOVIC, 2019)	52
FIGURE 25. CARTE DES AXES MARITIMES PRINCIPAUX ET SECONDAIRES RELIANT L'ARCHIPEL DU KVARNER AU CONTINENT A L'ANTIQUITE (TRAVAUX DE THESE DE ČAUSEVIC-BULLY, 2013)	53
FIGURE 26. ÉVOLUTION DU NOMBRE DE MOUTONS REPERTORIES SUR L'ILE DE CRES D'APRES LES DONNEES DE LA CHAMBRE D'AGRICULTURE CROATE (HCS)	56
FIGURE 27. EVOLUTION DE LA POPULATION DE 1857 A 2001 POUR LES ILES DE CRES, KRK, RAB ET LOSINJ.	58
FIGURE 28. LES DIFFERENTS TYPES DE SEDIMENTATION SUIVANT DIFFERENTS CONTEXTES CLIMATIQUES, DE COUVERTURE VEGETALE ET D'ANTHROPISATION. ILLUSTRATION DE BICHET. V.	62
FIGURE 29. MATERIEL ET ETAPES DE PRELEVEMENT DES CAROTTES SEDIMENTAIRES.	65
FIGURE 30. ECHANTILLONNAGE DES SEQUENCES SEDIMENTAIRES AVEC (A) UNE SECTION DE CAROTTE PRE-DECOUPEE, (B ET C) RETRAIT DES SEDIMENTS EN CONTACT AVEC LA CHEMISE PVC AFIN D'EVITER DES CONTAMINATIONS EVENTUELLES, (D) ECHANTILLONS APRES LYOPHILISATION, (E) LES ECHANTILLONS APRES LYOPHILISATION SONT MAINTENUS LE TEMPS DE LA PESEE DANS UN DESSICATEUR AFIN D'EVITER QU'ILS ABSORBENT DE L'HUMIDITE AMBIANTE, (F) SEDIMENT AVANT OUVERTURE DANS LA CHEMISE PVC.	68
FIGURE 31. TRANSFERT ET DEPOT DU PLOMB 210 ET DES RADIONUCLEIDES DANS LES SEDIMENTS LACUSTRES	74
FIGURE 32. BANC DE DIAGRAPHIE GEOPHYSIQUE GEOTEK® AVEC LES DIFFERENTS CAPTEURS (CAPTEUR DE VITESSE DES ONDES P, SPECTROCOLORIMETRE, SUSCEPTIBILIMETRE, DENSITOMETRE GAMMA, CAMERA NUMERIQUE), ET LE MONITEUR DE CONTROLE ET D'ACQUISITION DES DONNEES. LES DEMI-SECTIONS DE CAROTTES SONT DEPLACEES SUR UN RAIL POUSSEES PAS A PAS PAR UN « PUSHER »	78
FIGURE 33. PIECES DE CALIBRATION POUR LE DENSITOMETRE GAMMA.	79
FIGURE 34. DIAGRAMME Q7/4 D'APRES DEBRET ET AL., 2011	82
FIGURE 35. VARIABLES DE CALCUL POUR L'INDICE DE PROFONDEUR D'ABSORPTION RELATIVE (RABD)	83
FIGURE 36. CLASSIFICATION DES PARTICULES DU PALYNOFACIES PAR SEBAG ET AL., 2006	88
FIGURE 37. ÉTAPES DE PREPARATION DES ECHANTILLONS POUR L'ANALYSE ISOTOPIQUE AVEC (A) BROYAGE AVEC DES BILLES D'AGATES A 500 TOURS PENDANT 8 MIN, (B) DECARBONATATION ET RINÇAGE DES ECHANTILLONS, (C) LYOPHILISATION PENDANT TROIS JOURS, (D) ENCAPSULAGE AVEC UNE BALANCE DE PRECISION ET (E) ANALYSE A L'IRMS-EA	91
FIGURE 38. (A ET B) LOCALISATION ET GEOLOGIE DU BASSIN VERSANT DU LAC VRANA SUR L'ILE DE CRES, (C) PHOTO DE MARINE ROUSSEAU© ET CARTE BATHYMETRIQUE D'APRES SCHMIDT ET AL., 2000.	98
FIGURE 39. EVOLUTION DU NIVEAU DU LAC VRANA ENTRE 1929 ET 2015 (BONACCI, 2017)	99
FIGURE 40. CARTE DE DISTRIBUTION DE LA VEGETATION MACROPHYTES DE VRANA (ALEGRO ET AL., 2016)	101
FIGURE 41. CARTE DE LA DISTRIBUTION GEOCHIMIQUE DU Pb, DU RATIO Pb/Al ET DU Cr DANS LES SOLS DE L'ILE DE CRES ET DES SEDIMENTS DE SURFACE DE VRANA (MIKO ET AL., 2003)	103
FIGURE 42. LOCALISATION DES FORAGES VRA_2018 ET VRA96 ET PROFILS SISMIQUES A 3,5 KHZ OBTENUS DE SCHMIDT ET AL., 2001. (A) DANS LA PARTIE CENTRALE DU LAC VRANA ; (B) EN ZONE COTIERE AVEC LOCALISATION DES DISCORDANCES (SLUMPS).	105
FIGURE 43. ETABLISSEMENT DE LA CAROTTE COMPOSITE VRA_2018 A L'AIDE DE DONNEES DE SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE (COURBE BLEUE), DU L* (COURBE BLANCHE) ET DE LA DENSITE (COURBE JAUNE)	106
FIGURE 44. VARIATION DE LA TENEUR EN EAU (w/w) ET DE LA DENSITE G/CC LE LONG DE LA SEQUENCE VRA_2018 (582 CM) AVEC LA FIGURE DE CORRELATION ENTRE LES DEUX PARAMETRES.	107
FIGURE 45. ACTIVITE DU CESIUM 137 MESUREE SUR LES 25 PREMIERS CENTIMETRES DE LA SEQUENCE DE LA VRANA (VRA_2018)	110
FIGURE 46. MODELE D'AGE AU PLOMB DU LAC VRANA (VRA_2018), TRACE A L'AIDE DE PACKAGE BACON INTEGRE DANS RSTUDIO COMPRENANT LA COURBE DU PLOMB TOTALE (VIOLET), LE RADON EN EQUILIBRE (ROSE) ET LE MODELE D'AGE CRS OBTENU MANUELLEMENT SOUS EXCEL (VERT) ET CALCULER AVEC PLUM (GRIS)	111
FIGURE 47. MODELE D'AGE/PROFONDEUR DE VRA_2018 ETABLI D'APRES LES DATATIONS DES MACROESTES TERRESTRES (BLEU) ET DE DATATIONS SUR SEDIMENT TOTAL CORRIGEEES DE L'EFFET RESERVOIR (NON-CORRIGEEES EN ROUGE ET CORRIGEEES EN VERT)	112
FIGURE 48. (GAUCHE) MODELE D'AGE OBTENU PAR SCHMIDT ET AL., 2000 SUR LA SEQUENCE VRA-96; (DROITE) MODELE D'AGE ETABLI DANS LES TRAVAUX D'ILIJANIC, 2014 SUR LA SEQUENCE VRA-1A. ILLUSTRATION OBTENUE DES TRAVAUX D'ILIJANIC, 2014	113



FIGURE 49. TAUX DE SEDIMENTATION EN CM/AN OBTENU ESTIME D'APRES LE MODELE D'AGE-PROFONDEUR DE LA SEQUENCE VRA_2018. ....	116
FIGURE 50. DIAGRAMME Q7/4 OBTENU DES SEDIMENTS DE LA SEQUENCE VRA_2018 .....	118
FIGURE 51. COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS DE LA SPECTROMETRIE DE FLUORESCENCE X SUR LE SEDIMENT SEC (BLEU) AVEC CELLE SUR LE SEDIMENT HUMIDE (ORANGE) .....	119
FIGURE 52. DESCRIPTION DES PARAMETRES ACQUIS EN ISOTOPIE (C/N, D13C ET D15N), EN SPECTROMETRIE DE FLUORESCENCE-X (MN/FE), AVEC LE BANC DE DIAGRAPHIE GEOTEK® (SM, RABA), EN PERTE AU FEU (MO TOTALE, MINERAUX ET CARBONATES TOTAL), AVEC LES MACROCHARBONS DE BOIS ET EN PALYNOLOGIE (SPORES DE CHAMPIGNONS, DE PLANTES PALUSTRES ET DE FOUGERES ; LES ALGUES ; LA SOMMES DES POLLENS ET LE DIAGRAMME AVEC LA SOMME DE FEUILLUS, CONIFERES, ARBUSTES ET HERBACEES).....	124
FIGURE 53. DESCRIPTION DU CONTENU SEDIMENTAIRE SUR LES 9000 DERNIERES ANNEES. LES CATEGORIES SONT DEFINIES SELON <b>SEBAG ET AL., 2006</b> .....	127
FIGURE 54. DIAGRAMME POLLINIQUE SIMPLIFIE OBTENU DE L'ANALYSE PALYNOLOGIQUE DES SEDIMENTS DU LAC VRANA (ILE DE CRES, CROATIE) .....	131
FIGURE 55. LOCALISATION DU LAC OMISALJ (OU DE NJIVICE). CARTE GEOLOGIQUE DE KRK (AU CENTRE) ; IMAGE SATELLITE GOOGLE EARTH (EN HAUT A DROITE) ; CARTE BATHYMETRIQUE RETRACER D'APRES LES TRAVAUX DE THESE D' <b>ALEKSANDAR POPIJAC</b> (EN BAS A DROITE). LA PHOTO EN HAUT A GAUCHE CORRESPOND A LA PLAQUE A L'ENTREE DU CANAL DE DRAINAGE ( <a href="http://www.croinfo.net/vijesti-regija/7932-zaboravljenje-obljetic-100-godina-hidrotehnikog-tunelajezero-njivice-more.html">HTTP://WWW.CROINFO.NET/VIJESTI-REGIJA/7932-ZABORAVLJENE-OBLJETNICE-100-GODINA-HIDROTEHNIKOG-TUNELAJEZERO-NJIVICE-MORE.HTML</a> ) .....	144
FIGURE 56. EVOLUTION DU LAC OMISALJ D'APRES LES CARTES ANCIENNES : PREMIERE CAMPAGNE MILITAIRE (1774-1775) ; SECONDE CAMPAGNE MILITAIRE (1821 – 1824) ; TROISIEME CAMPAGNE MILITAIRE AU 1:25000 (1869 – 1887) ; CARTE DE 1910 AU 1:200000 (WWW.MAPIRE.EU) .....	146
FIGURE 57. LOG STRATIGRAPHIQUE ET TENEUR EAU DE LA CAROTTE OMI_2018 .....	149
FIGURE 58. MODELE D'AGE AU PLOMB DU LAC OMISALJ (OMI_2018), TRACE A L'AIDE DE PACKAGE BACON INTEGRE DANS RSTUDIO COMPRENANT LA COURBE DU PLOMB TOTALE (VIOLET), LE RADON EN EQUILIBRE (ROSE) ET LE MODELE D'AGE CRS OBTENU MANUELLEMENT SOUS EXCEL (VERT) ET CALCULER AVEC PLUM (GRIS) .....	150
FIGURE 59. MODELE D'AGE OBTENU DES DATES RADIOCARBONE SUR LES SEDIMENTS DU LAC OMISALJ (OMI_2018) .....	151
FIGURE 60. ACTIVITE DU CESIUM 137 SUR LES TRENTE PREMIERS CENTIMETRES DE LA CAROTTE OMI_2018 .....	152
FIGURE 61. DIAGRAMME Q7/4 OBTENU DES SEDIMENTS D'OMISALJ (OMI_2018).....	155
FIGURE 62. RESULTATS DE L'ANALYSE DE PERTE AU FEU (MATIERE ORGANIQUE, CARBONATES, ELEMENTS MINEROGENIQUES) ET DE LA SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE DE OMI_2018 .....	156
FIGURE 63. DIAGRAMME PALYNOLOGIQUE D'APRES LES ANALYSES DES SEDIMENTS DU LAC OMISALJ (OMI_2018) .....	158
FIGURE 64. LOCALISATION DES LACS D'OSOR ET DE PUNTA SECCA AVEC (A) IMAGE GOOGLE EARTH 2020, (B) VISUALISATION OBTENUE PAR ANALYSE LASER. LES COULEURS BEIGES CORRESPONDENT A DES DEPRESSIONS FERMEES (DOLINES), LES CHIFFRES BLEUS INDIQUENT LES PROFONDEURS SOUS LE NIVEAU DE LA MER ET LES CHIFFRES ROUGES LES ALTITUDES AU-DESSUS DU NIVEAU DE LA MER. L'ILLUSTRATION EST OBTENUE DE <b>DRAGANIT ET AL., 2019</b> , (C) SITES DE FORAGE ET MORPHOLOGIE DU LAC PUNTA SECCA ET DE OSOR. ....	160
FIGURE 65. LOCALISATION DES LACS PUNTA SECCA ET D'OSOR SUR LA CARTE DE LA SECONDE CAMPAGNE MILITAIRE DE 1821 – 1824 ET DE 1869 – 1887 (ILLUSTRATIONS OBTENUES DU SITE <a href="https://maps.arcnum.com">HTTPS://MAPS.ARCANUM.COM</a> ).....	161
FIGURE 66. UNITES SEDIMENTAIRES ET DENSITE DES SEDIMENTS DE LA CAROTTE OSOR_2016.....	162
FIGURE 67. UNITES SEDIMENTAIRES ET VARIATIONS DE LA TENEUR EN EAU DE LA CAROTTE PS-2018 .....	163
FIGURE 68. MODELE D'AGE/PROFONDEUR DE OSOR_2016 ESTIME A PARTIR DE QUATRE DATES AU RADIOCARBONE. LA BASE DE LA SEQUENCE EST DATEE A 115 CM A 1500 CAL. BC (3500 CAL. BP). ....	166
FIGURE 69. MODELE D'AGE AU PLOMB DU LAC PUNTA SECCA (PS_2018), TRACE A L'AIDE DE PACKAGE BACON INTEGRE DANS RSTUDIO COMPRENANT LA COURBE DU PLOMB TOTALE (VIOLET), LE RADON EN EQUILIBRE (ROSE) ET LE MODELE D'AGE CRS OBTENU MANUELLEMENT SOUS EXCEL (VERT) ET CALCULER AVEC PLUM (GRIS).....	167
FIGURE 70. ACTIVITE DU CESIUM 137 SUR LES QUINZE PREMIERS CENTIMETRES DE LA CAROTTE PS_2018 .....	168
FIGURE 71. MODELE D'AGE/PROFONDEUR OBTENU SUR LA CAROTTE DE PUNTA SECCA (PS_2018) D'APRES UNE SEULE DATATION AU RADIOCARBONE. LES SEDIMENTS SERAIENT DATES A 67 CM A ENVIRON 460 CAL. BC (2410 CAL. BP).....	169

## Chapitre I / Table des matières

FIGURE 72. DIAGRAMME Q7/4 DES SEDIMENTS DE OSOR (OSOR_2016) .....	170
FIGURE 73. DIAGRAMME Q7/4 DES SEDIMENTS DE PUNTA SECCA (PS_2018) .....	171
FIGURE 74. ANALYSE DIAGRAPHIQUE DES SEDIMENTS DU LAC D'OSOR (OSOR_2016) AVEC DE GAUCHE A DROITE, LA SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE POUR LA DESCRIPTION DES APPORTS DETRITIQUES, LE RAPPORT CA/TI POUR LA PRODUCTION DE CARBONATES AUTHIGENIQUES, L'INDICE DE CHLOROPHYLLE (RABD) POUR DECRIRE LES PHASES DE PRODUCTIVITE PRIMAIRE ET L'ELEMENT DU BROME POUR LE CONTENU EN MATIERE ORGANIQUE.....	172
FIGURE 75. ANALYSE DIAGRAPHIQUE DES SEDIMENTS DE PUNTA SECCA (PS_2018) AVEC DE GAUCHE A DROITE, LA SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE POUR LA DESCRIPTION DES APPORTS DETRITIQUES, LE RAPPORT CA/TI POUR LA PRODUCTION DE CARBONATES AUTHIGENIQUES, L'INDICE DE CHLOROPHYLLE (RABD) POUR DECRIRE LES PHASES DE PRODUCTIVITE PRIMAIRE, L'ELEMENT DU BROME ET LA PERTE AU FEU POUR LE CONTENU EN MATIERE ORGANIQUE ET ENFIN LN(BR/TI) POUR DECRIRE LES ENTREES D'EAUX MARINES.....	173
FIGURE 76. DIAGRAMME POLLINIQUE OBTENU DES SEDIMENTS DU LAC D'OSOR (OSOR_2016). ANALYSE EFFECTUEE PAR BENJAMIN DIETRE.....	176
FIGURE 77. DIAGRAMME POLLINIQUE OBTENU DES SEDIMENTS DU LAC PUNTA SECCA (PS_2018).....	178
FIGURE 78. SYNTHESE DES PRINCIPAUX RESULTATS DE VRA_2018 AVEC LES UNITES LITHOLOGIQUES, PALYNOLOGIQUES ET SEDIMENTAIRES. LA VEGETATION EST CLASSEE SUIVANT DIFFERENTS BIOMES QUE SONT LES ESPECES MEDITERRANEENNES, MESOTHERMIQUES, MICROTHEMIQUES, EURYTHEMIQUES, LES HERBACEES ET LA STEPPE.....	183
FIGURE 79. LES FORETS THERMOPHILES DE CRES DANS LEUR CONTEXTE AVEC DE BAS EN HAUT, LE FLUX DE POLLEN PALUSTRE DU LAC VRANA COMPARE A L'EVOLUTION DU NIVEAU MARIN GENERAL ET DE L'ADRIATIQUE NORD ; EVOLUTION DES PROPORTIONS D'IPA ET DE LA VEGETATION DANS LE BASSIN VERSANT DE VRANA (ESPECES STEPPIQUES, THERMOPHILES, MEDITERRANEENNES) ; SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE DE VRA_2018 ; D18O ET TEMPERATURE DE SURFACE (SST DES EAUX DE L'ADRIATIQUE).....	188
FIGURE 80. DONNEES SEDIMENTOLOGIQUES, MACRO-CHARBONS, POLLENS ET NNP : RECONSTRUCTION DES CHANGEMENTS DANS LE BASSIN VERSANT DU LAC VRANA ET CHANGEMENTS DANS LA COMPOSITION DES SEDIMENTS INCLUANT : (A) FLUX TOTAL DE CARBONE ORGANIQUE ET TAUX DE SEDIMENTATION, (B) SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE (SM), (C) OXYGENATION DE LA COLONNE D'EAU AVEC LE RAPPORT FE/MN, (D) FLUX DES MACROCHARBONS, (E A M) ABONDANCE RELATIVE DES INDICES POLLINIQUES D'ANTHROPISATION (IPA), DES POLLENS (JUNIPERUS, CEREALIA-TYPE, OLEA EUROPAEA, VITIS, JUGLANS REGIA, CASTANEA SATIVA) ET DES MACROFOSSILES NON POLLINIQUES (SPORES DE CHAMPIGNONS COPROPHILES COMPRENANT SPORORMIELLA ET SORDARIACEAE).....	193
FIGURE 81. TAUX DE SEDIMENTATION DU XXEME SIECLE APRES J.-C. DU LAC PUNTA SECCA, OMISALJ ET VRANA .....	198
FIGURE 82. PHOTOGRAPHIES GOOGLE EARTH DEPUIS 2005 DU LAC PUNTA SECCA .....	199
FIGURE 83. PHOTOGRAPHIES GOOGLE EARTH DEPUIS 2005 DU LAC OMISALJ .....	200
FIGURE 84. COMPARAISON DU TAUX DE SEDIMENTATION DU LAC VRANA ENTRE 1925 ET 2015 EN MG/CM <sup>2</sup> /AN (COURBE ORANGE) AVEC (A) L'EVOLUTION DU NIVEAU DU LAC VRANA ENTRE 1929 ET 2015 (COURBE NOIRE) ET LA QUANTITE D'EAU ANNUELLE POMPEE ENTRE 1967 ET 2015 (COURBE BLEU) ; (B) LES PRECIPITATIONS ANNUELLES MESUREES A LA STATION METEOROLOGIQUE DE CRES POUR LA PERIODE ENTRE 1926 ET 2015 ET (C) LES TEMPERATURES ANNUELLES MESUREES A LA STATION METEOROLOGIQUE DE CRES POUR LA PERIODE ENTRE 1948 ET 2015 .....	201
FIGURE 85. EVOLUTION DE LA VEGETATION ET DU PASTORALISME SUR L'ILE DE CRES ENTRE 1920 ET 2015 D'APRES LES DONNEES PALYNOLOGIQUES RECUEILLIES DE LA SEQUENCE VRA_2018, DE L'EVOLUTION DU NOMBRE DE MOUTONS DENOMBRES SUR L'ILE D'APRES LA CHAMBRE D'AGRICULTURE CROATE (HCS) ET DU NOMBRE D'HABITANTS SUR L'ILE DE CRES ENTRE 1921 ET 2001.....	203
TABLEAU 1. ENSEMBLE DES CAROTTAGES EFFECTUES LORS DES MISSIONS DE TERRAIN DE 2016 ET 2018 .....	67
TABLEAU 2. DESCRIPTIONS DES PRINCIPALES ERUPTIONS VOLCANIQUES EN MER ADRIATIQUE.....	77
TABLEAU 3. DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES UNITES SEDIMENTAIRES DE LA SEQUENCE VRA_2018.....	109
TABLEAU 4. RESULTATS DES DATATIONS AU RADIOCARBONE DES SEDIMENTS DU LAC DE VRANSKO JEZERO (VRA_2018). LES DATATIONS CORRIGES D'UN AGE RESERVOIR ONT ETE SURLIGNEES EN GRIS ET CELLES REJETEES SONT EN JAUNE. ....	115
TABLEAU 5. RESULTATS DES DATATIONS AU RADIOCARBONE DES SEDIMENTS DU LAC DE OMISALJ (KRK). EN JAUNE, LES DATES EXCLUES DU MODELE D'AGE/PROFONDEUR DE OMI_2018 .....	153

TABEAU 6. RESULTATS DES DATATIONS AU RADIOCARBONE DES SEDIMENTS DU LAC PUNTA SECCA ET DE OSOR (CRES). EN JAUNE, LA DATATION REJETEE DU MODELE D'AGE/PROFONDEUR DE OSOR\_2016..... 165

PHOTO 1. ARCHIPEL DU KVARNER : A. LAC VRANA, ILE DE CRES ; B. OMISALJ, ILE DE KRK ; C. OSOR, ILE DE CRES (@MARINE ROUSSEAU & SEBASTIEN BULLY) .....	33
PHOTO 2. RECHERCHE DE MACRORESTES VEGETAUX TERRESTRES DANS DES SEDIMENTS LYOPHILISES. À DROITE, UNE FEUILLE D'ARBRE ENTIERE TROUVEE SUR L'ECHANTILLON 651 (PILOTE 3_103 CM) DU LAC VRANA. POUR CE TRAVAIL, ENTRE 300 ET 350 ECHANTILLONS ONT AINSI ETE TRIES. ....	72
PHOTO 3. (A) DETECTEUR BEGE AU LABORATOIRE CHRONO-ENVIRONNEMENT (BESANÇON), (B ET C) ECHANTILLONS POUR L'ANALYSE DU PLOMB 210 ET DU CESIUM 137 (D) EXEMPLE D'UNE ACQUISITION DES RADIOELEMENTS SUR L'ECHANTILLON OMI_6-7CM_787 .....	74
PHOTO 4. ECHANTILLON DE CALIBRATION DU SUSCEPTIBILIMETRE.....	80
PHOTO 5. CAPTURE D'ECRAN DE L'INTERFACE POLYCOUNTER.....	86
PHOTO 6. MACROCHARBON DE BOIS MESURE DANS L'ECHANTILLON C325 (2A3_28 CM).....	89
PHOTO 7. ANALYSE DE PERTE AU FEU AVEC (A) PREPARATION DES ECHANTILLONS, (B) CUISSON DES ECHANTILLONS ET EN (C) REFROIDISSEMENT DANS UN DESSICCATEUR POUR CONTRER LES EFFETS DE L'HUMIDITE ATMOSPHERIQUE. ....	94
PHOTO 8. CAMPAGNE DE FORAGE SUR LE LAC OMISALJ A L'AUTOMNE 2018 .....	147
PHOTO 9. LAC DE PUNTA SECCA. ....	159



## Remerciements

Le moment est enfin arrivé ! Après 10 ans passés sur les bancs de l'université à travailler et étudier sans relâche, je vais pouvoir à mon tour rejoindre la grande famille des docteurs. C'est avec une certaine fierté que je regarde aujourd'hui mon parcours. Pouvoir sortir diplômée de l'Université de Lyon et de l'École Normale Supérieure n'était pourtant pas gagné. C'est donc avec une certaine joie que j'ai pu découvrir la Franche-Comté et son université. Mais cette réussite je la dois aussi à un certain nombre de personnes qui m'ont suivie de près ou de loin et/ou me suivent toujours.

En tout premier lieu j'aimerais adresser mes remerciements les plus chaleureux à mes deux directeurs de thèse Hervé Richard et Morana Čaušević-Bully qui ont accepté de me faire confiance pour mener à bien ce projet. Ils ont fait sans aucun doute de cette thèse une expérience inoubliable et enrichissante. Grâce à eux, j'ai pu découvrir les joies des carottages sous la pluie (qui n'a rien entaché de ma bonne humeur de pouvoir y participer !). J'ai pris beaucoup de plaisir à travailler pendant trois ans sur les lacs croates, tout en jouissant d'une grande autonomie. Merci de m'avoir laissé faire autant de colloques, formations, et écoles d'été même si l'épisode du covid19 a mis un certain frein. Ils m'ont permis de rencontrer des personnes d'horizons divers et variés.

Je tiens à remercier vivement l'ensemble des membres du jury, Christophe Petit et Vincent Lebreton, rapporteurs de cette thèse, ainsi que Giulia Boetto, Maja Gori et Philippe Sorrel.

Merci à Emilie Gauthier et Vincent Bichet pour avoir soutenu ce projet et m'avoir fait partager leurs connaissances. Merci de leurs conseils et corrections.

J'aimerais remercier particulièrement Charly Massa qui a sans aucun doute été d'un important soutien pour mener jusqu'au bout ce travail. Merci pour toutes ces longues séances d'échantillonnages rendues agréables par nos discussions, de m'avoir transmis une telle rigueur dans les analyses. Je t'avais d'ailleurs promis que je le ferais, nous avons préparé 718 échantillons, effectué 2669 pesées et fouillé  $309 \pm 50$  échantillons pour les datations  $^{14}\text{C}$  ! Merci pour ta patience et les connaissances que tu as partagées avec moi.

J'aimerais faire ensuite une dédicace spéciale à Benjamin Diètre pour avoir eu la lourde tâche de m'initier à la palynologie en un temps record ! Merci également de m'avoir fait profiter des analyses polliniques d'Osor 2016.

Parce que tout serait plus compliqué sans leur l'aide, merci à vous deux Antoine et Fanny pour toutes ces préparations palynologiques que j'ai pu vous demander. Merci

## *Chapitre I / Remerciements*

également à toi Julien pour ta bienveillance et le soin que tu as pris avec l'aide de Vincent et Hervé pour carotter les sédiments des lacs croates.

Merci aux responsables et aux personnels de la station de pompage du lac Vrana d'avoir autorisé le forage au centre du lac, merci de votre aide pour le montage de la barge et sa désinfection. Merci également à Morana et Sébastien Bully pour ces opérations de montage-démontage-transport.

Merci au laboratoire Biogéosciences de Dijon et en particulier Chrisophe Durlet pour avoir permis les analyses sur poudre de spectrométrie de fluorescence-X. Je tiens également à remercier Caroline Welte et le laboratoire de physique des faisceaux ioniques de Zurich pour les datations sur sédiment total.

Un grand merci au laboratoire Chrono-environnement qui m'a accueilli et à tous ceux avec qui j'ai pu échanger : Charles-Henri, Jean-Daniel, Agnès, Sylvie, Catherine, Isabelle, Mica, Fred, Damien, Renaud...et plein d'autres.

Merci à Christophe Mavon pour m'avoir laissé mener une partie de mes analyses des radioéléments au sous-sol du laboratoire Chrono-Environnement et à Damien Rius pour les analyses à Modane.

Cette thèse a été aussi l'occasion de rencontrer tout un tas de personnes formidables, de pouvoir partager sur des sujets vastes et variés, et de passer de bon moments ! Merci à vous Amandine, Céline, Aurore, Anne-Lise, Marion, Christelle, Charles, Jonas, Corentin, Kevin, Caroline, Valentin, Petra, Fanny, Jonathan, Milva... J'espère que je n'en aurai pas oublié !

Mais cette merveilleuse aventure n'aurait jamais vu le jour sans une rencontre en licence. Merci encore à toi Philippe ne m'avoir transmis ta passion pour la sédimentologie et l'étude des paléo-environnements. C'est toujours avec entrain que je continue à découvrir cette discipline. Mais surtout merci de continuer à m'accompagner même de loin, et de m'avoir donné cette chance d'écrire cet article avec toi. C'est donc avec une certaine émotion que j'ai appris que tu acceptais de faire partie du jury de ma thèse.

Pour finir, je ne serais certainement pas arrivée jusqu'ici sans le soutien indéfectible de mes amis (merci à toi Amandine, ma petite femme :-P et toi Johanne), ma famille, mes deux sœurs et ma mère. Merci à vous qui avez toujours cru en moi. Je clôturerais enfin ces remerciements avec toi Sam. Je te dois beaucoup. Malgré les difficultés que cela comprenait, après 11 ans passés côte à côte dans la vie privée comme professionnelle, tu as toujours été là à croire en moi, à me motiver, et à me pousser à me dépasser au quotidien.







## **Introduction**

L'un des grands enjeux du XXIème siècle pour les scientifiques comme pour les politiques est sans nul doute celui du réchauffement climatique et de son impact sur les générations actuelles et futures. L'augmentation rapide et brusque des températures moyennes de l'atmosphère induite par l'effet de serre et l'augmentation des activités industrielles depuis le XIXème siècle est maintenant largement admise. Cette modification du climat entraîne dès lors des conséquences durables sur les équilibres météorologiques et les socio-écosystèmes : sur l'agriculture (problèmes d'irrigation, diminution du rendement des cultures et de l'adaptation des espèces aux changements rapides des conditions de leur milieu), sur l'économie de la pêche avec une modification des stocks de poisson, ou encore sur les populations au sens large avec une augmentation des flux migratoires provoquée par un manque de ressources.

Depuis une vingtaine d'années, à défaut de pouvoir suffisamment endiguer les effets du réchauffement climatique par des mesures de réduction des gaz à effet de serre (e.g. accord de Paris<sup>1</sup>), des démarches d'adaptation<sup>2</sup> ont été lancées par les politiques. Celles-ci ont pour but de limiter les impacts du changement climatique et les dégâts potentiels associés sur les activités socio-économiques et sur la biodiversité. Cependant, les scientifiques estiment qu'au-delà de 2 °C de réchauffement, les solutions d'adaptation s'amenuisent. Dans un premier temps, le déplacement des cultures en latitude ou altitude avec l'introduction de nouvelles espèces est privilégiée. Par exemple, l'intégration d'espèces génétiquement modifiées adaptées à des températures plus élevées et plus résistantes aux espèces ravageuses et aux maladies. En dernier recours, la migration des populations est envisagée. Plusieurs cas déjà connus peuvent être évoqués :

- le déplacement des villages d'indigènes en Alaska suite à la fonte de la glace de mer et du pergélisol ;
- la relocalisation des habitants des îles de Carteret en Papouasie Nouvelle-Guinée en raison de l'élévation du niveau de la mer qui réduit la surface de ces atolls ;

---

<sup>1</sup> Accord visant à contenir la hausse des températures à 1,5°C d'ici 2050, pour lutter contre le réchauffement climatique. Cette accord a été signé en 2015 durant la COP21 par 197 pays à Paris.

<sup>2</sup> Processus d'ajustement d'un système face à des changements climatiques et leurs impacts.

- la communauté Phinaya installée dans les Andes péruviennes qui est menacée par la fonte et le recul rapide des glaciers provoquant l'assèchement des ruisseaux et des pâturages (Ben Orlove, 2009).

La compréhension du réchauffement climatique passe entre autre par la rétro-observation du climat à travers l'étude d'archives sédimentaires. Dans ces études, une attention particulière est également portée aux interactions hommes-milieux et de leurs conséquences sur l'environnement. Cela permet ainsi d'apporter des éléments de réponses à : Comment les sociétés ont su modifier leur environnement pour répondre à leur besoins ? Quelles ont été les solutions d'adaptation déployées par les populations passées face aux changements de conditions climatiques (froid/chaud versus sèche/humide) ?

Les sédiments lacustres fournissent d'excellentes archives naturelles (Schmidt et al., 2001 ; Sorrel et al., 2006 ; Sorrel et al., 2007 ; Jenny, 2013). Ces archives enregistrent les conditions environnementales du bassin versant comme l'érosion des sols, l'évolution du couvert forestier ou encore les changements du niveau du lac résultant de variations climatiques naturelles et/ou anthropiques. Pour ce faire, l'analyse d'un ensemble de marqueurs biogéniques (ex. macrorestes, spores et pollen, chlorophylle a, etc.) et abiotiques (ex. carbonates, éléments magnétiques, charbons, etc.) contenus dans les sédiments est nécessaire.

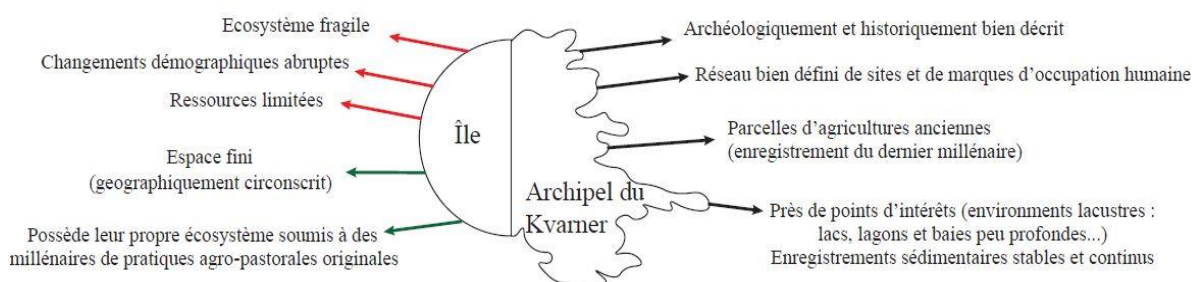
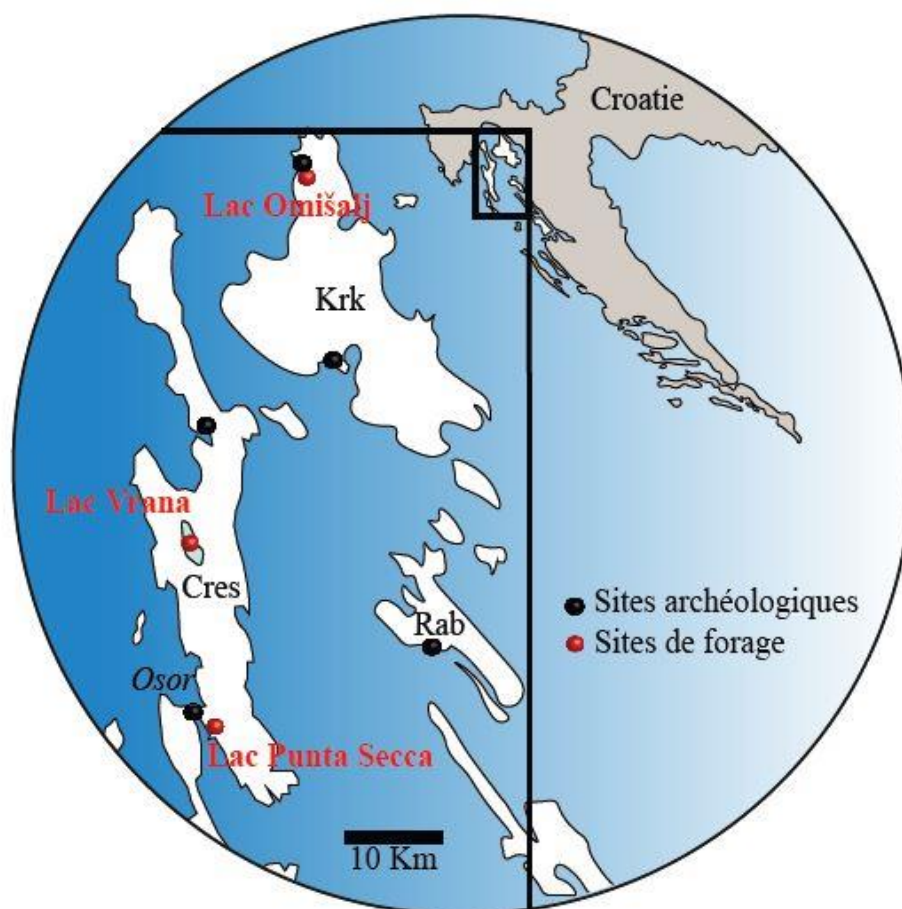


Figure 1. Fonctionnement d'un archipel

Pour mener à bien ce type d'étude paléoenvironnementale, la recherche d'une zone géographique sensible aux variations climatiques et anthropiques mais spatialement limitée est nécessaire. Dans ce sens, les îles offrent l'avantage d'être des espaces finis, géographiquement circonscrits, possédant leurs propres écosystèmes et un réseau bien défini de sites archéologiques et historiques et de marques d'occupation humaine (Figure 1). Les îles présentent aussi l'avantage de connaître des changements démographiques abruptes lors des

phases d'abandon ou de recolonisation (Bevan et Conolly, 2013) qui marquent les paysages et génèrent de nouvelles pratiques agricoles. Les îles jouent également un rôle important dans les réseaux sociaux, économiques et politiques en offrant un lieu de refuge, même temporaire, pour les exilés politiques, les réfugiés, les chasseurs, les pirates et aujourd'hui... les touristes et quelques privilégiés qui trouvent là un isolement momentané. Bien que les îles apparaissent au premier abord déconnectées du continent, cela n'est pas forcément le cas. Elles peuvent parfois être un nœud important de certains réseaux (ex. maritimes et économiques). Enfin, la zone d'étude choisie doit permettre d'obtenir suffisamment de données pour un couplage de l'archéologie et de l'histoire avec les données de l'anthropologie et des paléoenvironnements afin de préciser les liens diachroniques entre le climat, les mouvements de population, leur environnement et les sylvo-agrosystèmes successifs. Dans ce contexte, l'archipel du Kvarner (îles de Krk et de Cres) situé au nord de l'Adriatique est alors apparu comme un « laboratoire insulaire » adéquate pour ce type de recherches pluridisciplinaires (Figure 2 ; Čučković, 2017 et 2021 ; Čaušević-Bully et al., 2021).



*Figure 2. Localisation des lacs étudiés (Osor, Vrana, Punta Secca et Omišalj) et des sites archéologiques sur l'archipel du Kvarner (région Adriatique)*

### **Cadre de l'étude**

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet interdisciplinaire IATEKA (*Interdisciplinary approach to the territorial evolution of the Kvarner archipelago*, Croatie) débuté en 2018. Il est porté par Morana Čaušević-Bully et est soutenu par l'Université de Bourgogne-Franche-Comté et le laboratoire Chrono-environnement. C'est un programme d'investissement d'avenir (IDEX/I-SITE) comprenant des collaborations avec l'université de Bradford, l'Institut de recherches anthropologiques de Zagreb, l'université de Padoue, le CNRS, les UMR ArTeHiS et Biogéosciences de Dijon. Ce projet a été financé par l'I-SITE Bourgogne-Franche-Comté (allocation de thèse et analyses). Il se focalise sur l'examen à long terme des relations entre l'homme et son environnement avec un intérêt particulier porté sur la construction, la gestion et la transformation des territoires et des paysages insulaires de l'archipel du Kvarner, mais aussi aux mouvements de populations et à leur impact sur l'environnement.

Ainsi IATEKA se décline en trois grands axes méthodologiques comprenant une approche paléoenvironnementale, une approche anthropologique et une approche archéologique. Ces trois axes de recherche visent à apporter des informations sur l'histoire des paysages et des populations. Ce programme constitue un nouveau volet des recherches menées depuis 2006 dans la région dinarique avec une approche paléoenvironnementale et anthropologique affirmée. Il se focalise davantage sur les questions du peuplement et de la variabilité de l'occupation des îles en lien avec le milieu naturel. Les recherches archéologiques constituent une documentation qui permet de déterminer la matérialité des occupations humaines, les données anthropologiques et paléoenvironnementales nous renseignent à la fois sur les conditions de vie des populations anciennes, sur leurs origines et sur leur interaction avec le milieu naturel dans lequel elles ont évolué.

Par exemple, les premiers résultats des études anthropologiques ciblées sur l'Antiquité tardive permettent de mieux connaître l'état sanitaire et les conditions de vie (nutrition, efforts physiques quotidiens des habitants des sites tardo-antiques et médiévaux des sites de Mirine, Martinšćica et Osor). Nous savons notamment que les habitants de Mirine vivaient dans des conditions difficiles et que leurs activités étaient majoritairement tournées vers la mer ; mais paradoxalement les résultats obtenus sur les isotopes stables nous apprennent qu'ils consommaient plutôt de la viande que du poisson et des fruits de mer, et du millet plutôt que

du blé. En outre, les premiers résultats des analyses d'ADN anciens indiquent que ces habitants ne semblent pas être originaires des îles, mais plutôt d'Italie, ce qui démontre qu'une partie du peuplement de l'île de Krk (sinon des îles de l'archipel) résulte d'une mobilité des populations dans l'Antiquité tardive.

### **Objectifs**

Cette thèse cherche à décrire l'évolution générale du climat et de la végétation au cours des trente mille dernières années environ sur l'archipel du Kvarner, particulièrement sur les îles de Krk et Cres, à partir de quatre enregistrements sédimentaires lacustres (lac Vrana, Osor, Punta Secca et Omišalj ; **Figure 2**). L'ensemble de ces archives sédimentaires proviennent de lacs carbonatés formés à partir d'anciennes dolines et comprenant un bassin versant souvent escarpé et/ou difficilement accessible. Une attention particulière a été portée sur les 10 000 dernières années et la haute résolution des données nous permet de décrire avec précision l'histoire des populations et de leur impact sur leur environnement. Ces travaux cherchent ainsi à répondre à plusieurs grandes questions. Comment a évolué la couverture forestière depuis la fin du Pléistocène ? Quelle agriculture s'est développée ? Quelle a été la part du pastoralisme ? Quel a été l'impact de l'utilisation des terres par l'homme (apports de nutriments, érosion des sols, etc.) ? Quel type de terre a été exploité ? Est-ce que l'installation de nouvelles populations ou des changements de pouvoir ont pu entraîner une modification des activités agropastorales ? ou encore, est-ce que les fluctuations climatiques pluriséculaires des derniers millénaires ont eu un impact sur ces sociétés agricoles ?

L'évolution du couvert végétal et la dynamique des flux sédimentaires sont appréhendées à partir de l'étude multi-paramètre des enregistrements sédimentaires des quatre sites explorés dans le cadre de cette thèse et permettent de préciser les principales réponses éco-géo-systémiques aux changements climatiques, au développement des occupations humaines et à l'impact des pratiques agricoles.

Plus tard, dans le travail de synthèse du programme IATEKA, nous espérons que les conclusions de l'archéologie spatiale (étude diachronique des très riches traces de cadastres anciens) viendront compléter ces informations paléoenvironnementales en précisant les différentes étapes de structuration des territoires de ces îles.

### **Organisation du manuscrit**

Pour répondre aux objectifs fixés par le projet et répondre aux questions définies, le manuscrit est articulé suivant quatre parties distinctes :

- la première partie est consacrée à la présentation et à la description du cadre régional de l'étude (l'archipel du Kvarner) autant du point de vue de la géographie et du climat, que de l'histoire et des découvertes archéologiques ;

- la seconde partie présente l'intérêt d'une approche multi-paramètre, les forages et la stratégie d'échantillonnage ainsi que les différentes analyses menées sur les séquences lacustres de cette étude ;

- la troisième partie s'attache à décrire les quatre sites d'études (lac Vrana, Osor, Omišalj et Punta Secca) et expose les résultats obtenus des marqueurs sédimentaires, géochimiques, palynologiques et isotopiques ;

- enfin, la quatrième partie est consacrée à l'interprétation et à la discussion des résultats de l'analyse multi-paramètre. Les différents enregistrements sédimentaires sont alors comparés entre eux en terme de reconstruction environnementale et d'anthropisation du milieu afin de discerner d'éventuelles similitudes dans leur évolution respective. On propose également de replacer ces séquences lacustres dans le contexte climatique global et les événements socio-économiques des 10 000 dernières années environ de la région nord-adriatique.

Ce manuscrit se termine par une conclusion générale synthétisant les différents résultats méthodologiques et paléo-environnementaux obtenus, ainsi que des perspectives futures.

*Remarque : dans un souci de compréhension et surtout d'utilisation de ces données par les archéologues et les historiens, les âges sont exprimés dans ce manuscrit en « Before Christ (BC) vs. Anno Domini (AD) ». Les âges en « Before present (BP) » sont donnés entre parenthèses.*

*Les mots suivis d'un \* renvoient quant à eux au glossaire situé en fin de ce manuscrit.*

# I. : Contexte historique et cadre géographique de l'archipel du Kvarner



*Le village d'Osor d'après mélodie.rousseau©*

## I.1 Partie 1 : Contexte géographique, géologique et géomorphologique

### I.1.1 Le Kvarner, un système karstique

L'archipel du Kvarner se situe dans une baie semi-fermée au nord de la mer Adriatique entre la péninsule Istrienne (ouest), la Croatie centrale (nord) et la Dalmatie (sud). Elle est protégée par les Alpes Dinariques constituées de plusieurs massifs montagneux (e.g. Učka au nord, Gorski Kotar, Velika Kapela et Snežnik-Risnjak à l'est, Velebit au sud-est) (**Figure 3**). Le golfe du Kvarner comprend cinq îles principales (Cres, Krk, Pag, Rab et Lošinj) et une dizaine d'îlots disséminés qui représentent au total une superficie de 1 044,27 km<sup>2</sup>.

La géomorphologie de cette région se compose d'un ensemble de structures caractéristiques des systèmes karstiques. Depuis plusieurs années, cette zone a fait l'objet de nombreuses études géologiques notamment sur l'évolution structurelle et orogénique de l'Adriatique (**Vlahović et al., 2005 ; Korbar, 2009**), sur la dynamique de formation des cavités souterraines karstiques (**Otoničar, 2007 et 2010**), sur l'origine et l'évolution des sources côtières et sous-marines (**Benac et al., 2003**), ou encore sur l'évolution du niveau marin depuis le Pléistocène (**Surić et al., 2002 ; Benac et al., 2004 ; Surić et al., 2009**).

Un vocabulaire spécifique est utilisé pour caractériser les karsts (**Figure 4**). On ne citera ici que les principaux dont les dolines (*dolina, dol* ou *dolac* en croate) qui sont des dépressions fermées circulaires de quelques mètres à plusieurs kilomètres de diamètre et de profondeur, formées à la suite d'une dissolution du calcaire par les précipitations et provoquant l'affaissement du sol – l'Aven (ou *ponor*) est un puits naturel vertical creusé par les eaux souterraines – le *Polje* est une dépression à fond plat fermée par des versants plus ou moins escarpés et dont les cours d'eau se perdent dans des *ponors* – l'Uvala forme une « vallée » à la suite de la coalescence de dolines – les *Hum* sont des collines de calcaires plus ou moins coniques se situant sur le fond plat des *polje* à la suite d'une érosion karstique.

Très tôt les systèmes karstiques ont présenté un grand intérêt pour l'Homme. En effet, en milieu insulaire ils permettent une fois aménagés d'alimenter en eaux douces les populations autochtones et d'irriguer les cultures. Bien que morphologiquement contraignant, ces systèmes peuvent permettre le développement d'une agriculture spécifique en raison de la fertilité de leurs sols en particulier au niveau des fonds de dolines et de *poljés*. Ce sont les morphologies





Figure 3. Localisation du golfe du Kvarner et des îles qui le composent (Cres, Krk, Pag, Rab et Lošinj). Les points jaunes correspondent aux sites de forage.

des dépressions qui définissent le type d'activités agricoles et/ou le type de cultures menées. L'ensemble de l'espace d'une doline ou d'un poljé est utilisé (pentes, fond). Les champs souvent de forme circulaire sont donc plus nombreux mais plus petits que traditionnellement. Ce type d'environnement donne ainsi lieu à un paysage et un parcellaire spécifique. Bien qu'il soit possible de mettre en culture ces espaces, ils sont plus généralement exploités pour l'élevage et l'exploitation des forêts. Parmi quelques exemples très connus, on retrouve les dolines de Didyme (Grèce) qui ont été aménagées pour le pacage du bétail. Les falaises les encerclant jouant ainsi le rôle de clôture.

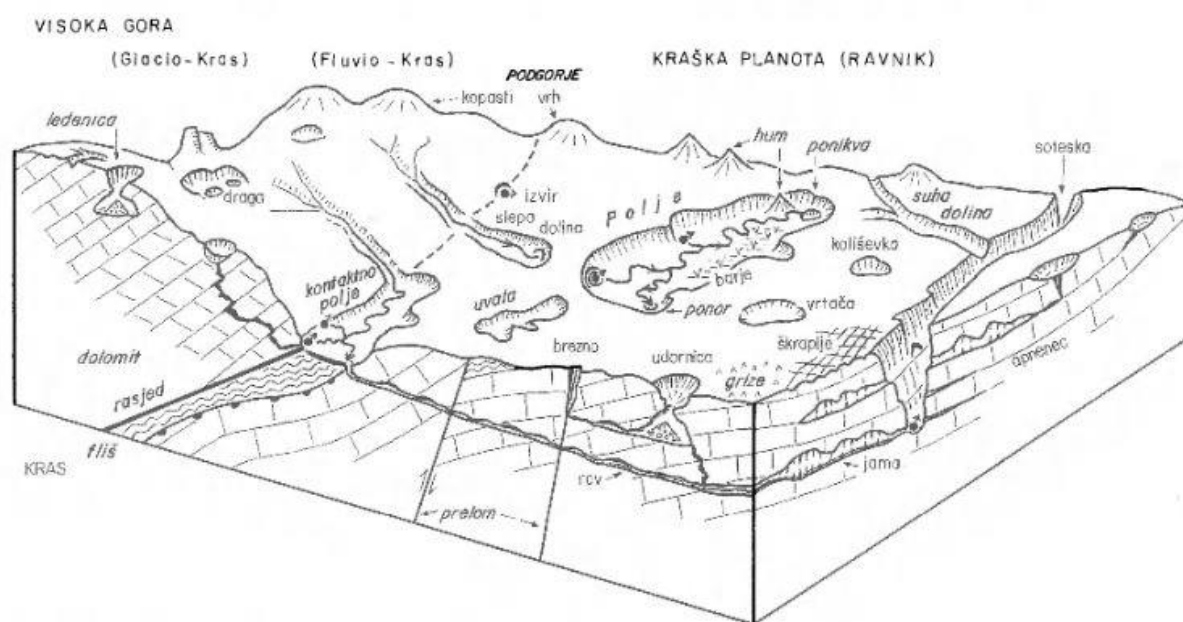


Figure 4. Description et fonctionnement d'un système karstique. Illustration obtenue de [Nicod \(2003\)](#)

Ces dernières années les systèmes karstiques subissent la menace du réchauffement climatique et de leur exploitation. Actuellement, l'élévation ininterrompue du niveau marin provoque des infiltrations récurrentes d'eau de mer dans les réservoirs d'eau douce (ex. du lac Vrana en Dalmatie – [Katalinić et al., 2013](#) ; [Rubinić et al., 2010 et 2014](#)), le pâturage intensif dégrade les pentes et accentue l'érosion des sols. Enfin, le pompage excessif des réservoirs souterrains assèche le sol multipliant le nombre de dolines. Régulièrement les médias font état de l'apparition de « gouffres géants » dans les zones agricoles et urbaines (les derniers exemples se situent en Turquie et au Mexique) et alertent la population sur ces dangers invisibles. Ces « hotspots » pour l'agriculture présentent donc un grand intérêt pour la recherche paléo-environnementale et archéologique puisqu'ils renferment des milliers d'années d'histoire agropastorale et climatique.

Situé au nord-ouest de la plate-forme de carbonate adriatique (**Vlahović et al., 2005**), le substratum de la baie du Kvarner est donc principalement composé de séries calcaires et dolomitiques du mésozoïque (Crétacé), chevauchant des synclinaux de flyschs\* paléogène (**Figure 5**). Des calcaires foraminiféraux d'âges paléocènes-éocènes se sont également sporadiquement déposés sur les carbonates du Crétacé. Enfin, de plus jeunes dépôts d'âge pléistocène ont recouvert ponctuellement les substrats carbonatés et siliclastiques (**Babić, 2003**).

Pour l'île de Krk, on retrouve ainsi dans la partie ouest et sud-ouest des calcaires dolomitiques du crétacé inférieur (Albien) formant le centre de grands anticlinaux (**Benac et al., 2013**). Dans les zones plus étroites se sont déposées des dolomites d'âge albien-cénomaniens (**Mamužić et al., 1969 ; Šikić et al., 1969 ; Šušnjar et al., 1970**). Des calcaires du crétacé supérieur (Cénomaniens) et de l'argile en couches minces se sont ajoutés, intercalés avec des dépôts béchiques, dolomitiques, de stromatolites\* ou encore de rudistes\*. L'ensemble de ces dépôts ont très souvent été dolomitisés au cours de la diagenèse. À cela se superposent dans la partie centrale de l'île de Krk, des calcaires paléogènes à foraminifères et des roches silicoclastiques. De la baie d'Omišalj à la vallée de Baška se sont des flyschs éocènes qui se sont formés. Ils se composent pour l'essentiel de marnes et de grès. Dans la partie sud-ouest de l'île, des brèches carbonatées oligocène-miocènes ont recouvert les roches du crétacé et du paléogène. Enfin, des dépôts quaternaires récents ont comblé quelques dépressions notamment au sud de l'île.

L'île de Cres est beaucoup plus homogène avec la présence uniquement de calcaires et de dolomites du Crétacé superposés ponctuellement par des carbonates paléogènes.

Ainsi, l'archipel du Kvarner n'est pas géologiquement uniforme avec de nombreux synclinaux, anticlinaux et des failles dont l'orientation est globalement NO-SE à NNO-SSE (**Figure 5**). Pendant le pliocène, la plupart des failles ont fortement perturbé les structures tectoniques. La configuration structurale et tectonique de la région est notamment à l'origine de nombreux séismes dont les principaux au cours des derniers millénaires ont été enregistrés en 1323, 1750, 1776, 1838, 1870, 1904, 1916 et 1949 AD (**Herak et al., 2005 ; Korbar et al., 2020**).

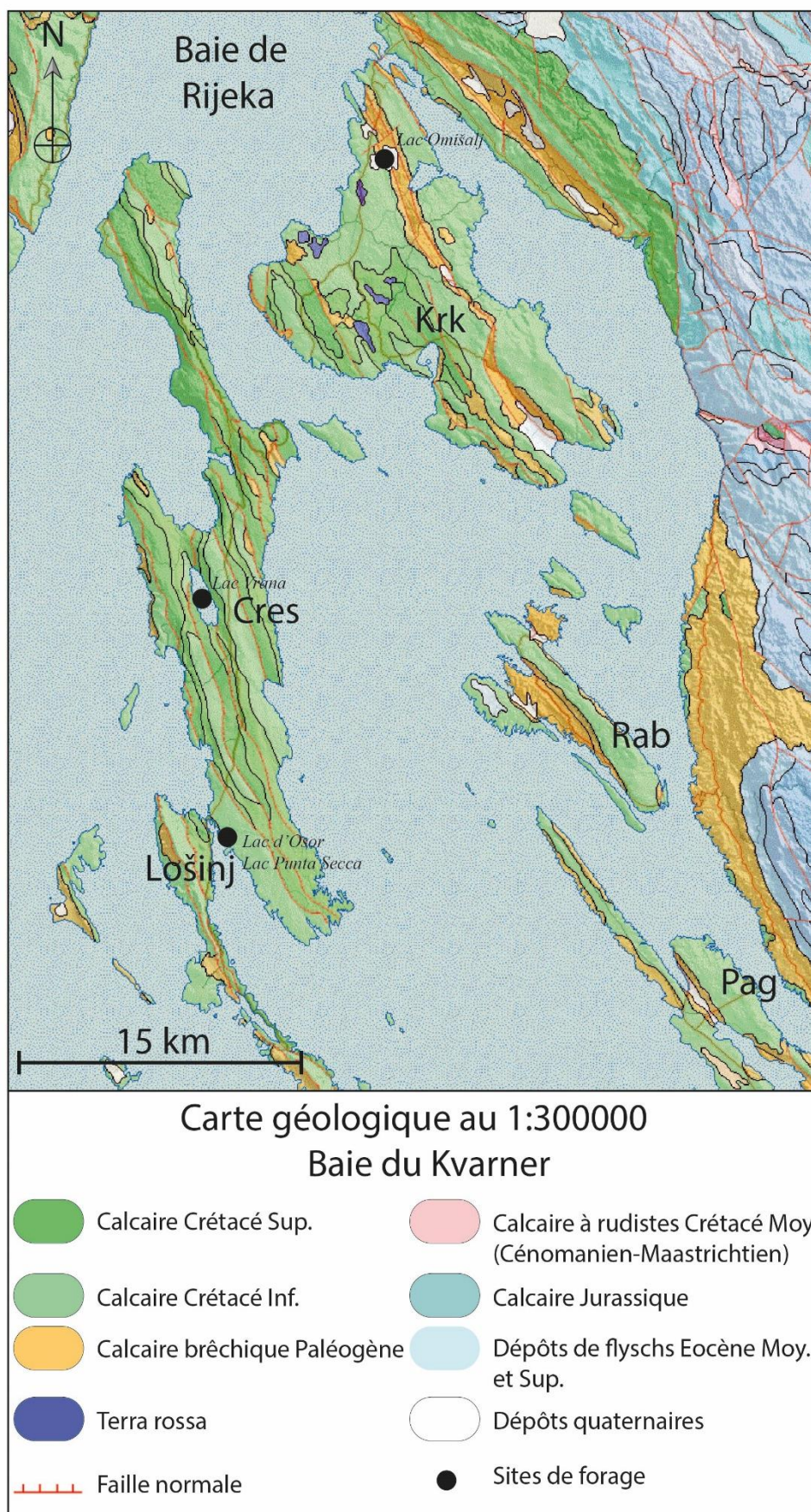


Figure 5. Carte géologique du golfe du Kvarner obtenue de l'Institut géologique Croate (<http://webgis.hgi-cgs.hr/gk300/default.aspx>)

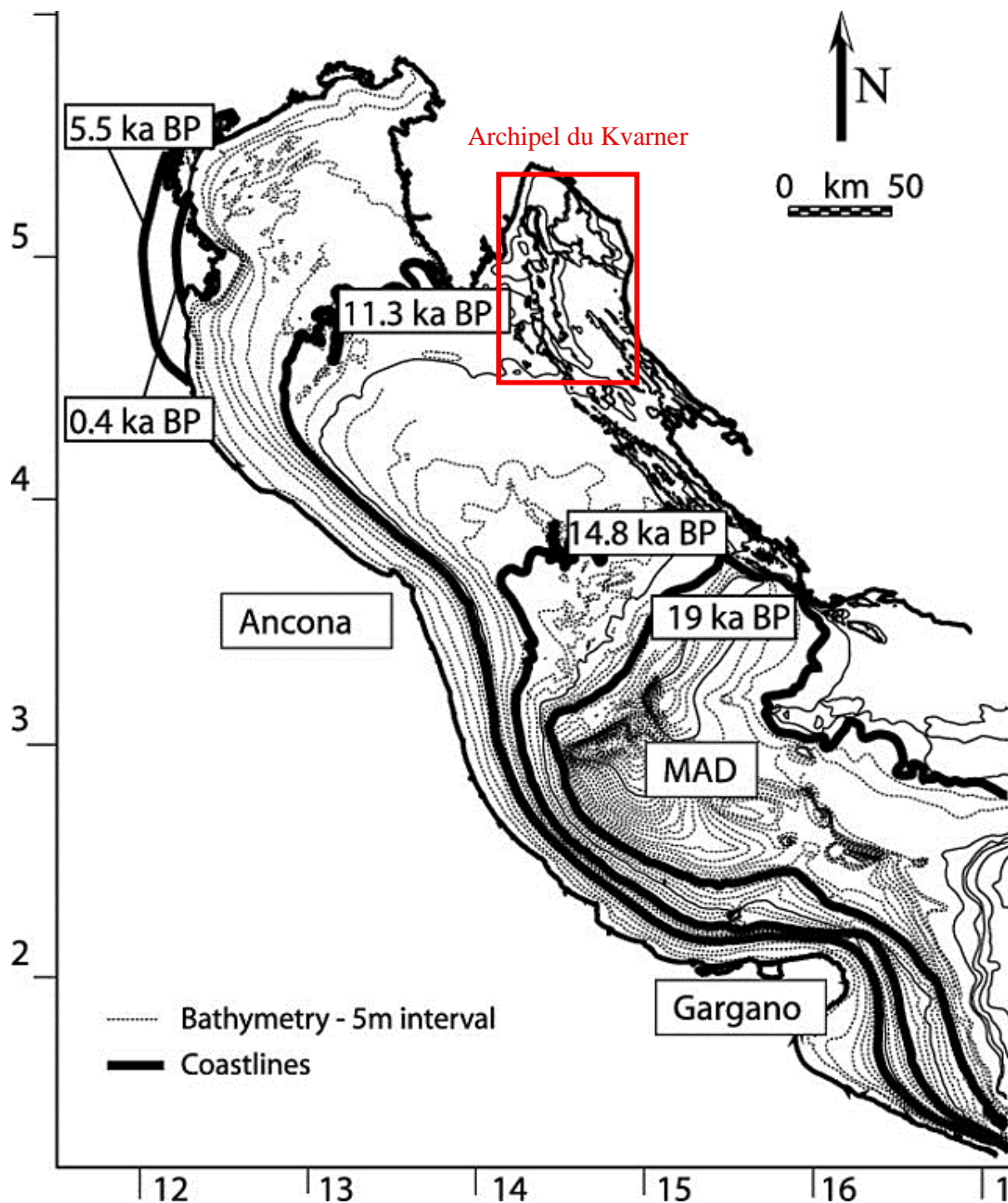


Figure 6. Formation de la mer Adriatique Nord à la transition Pléistocène-Holocène (Brommer et al., 2009).

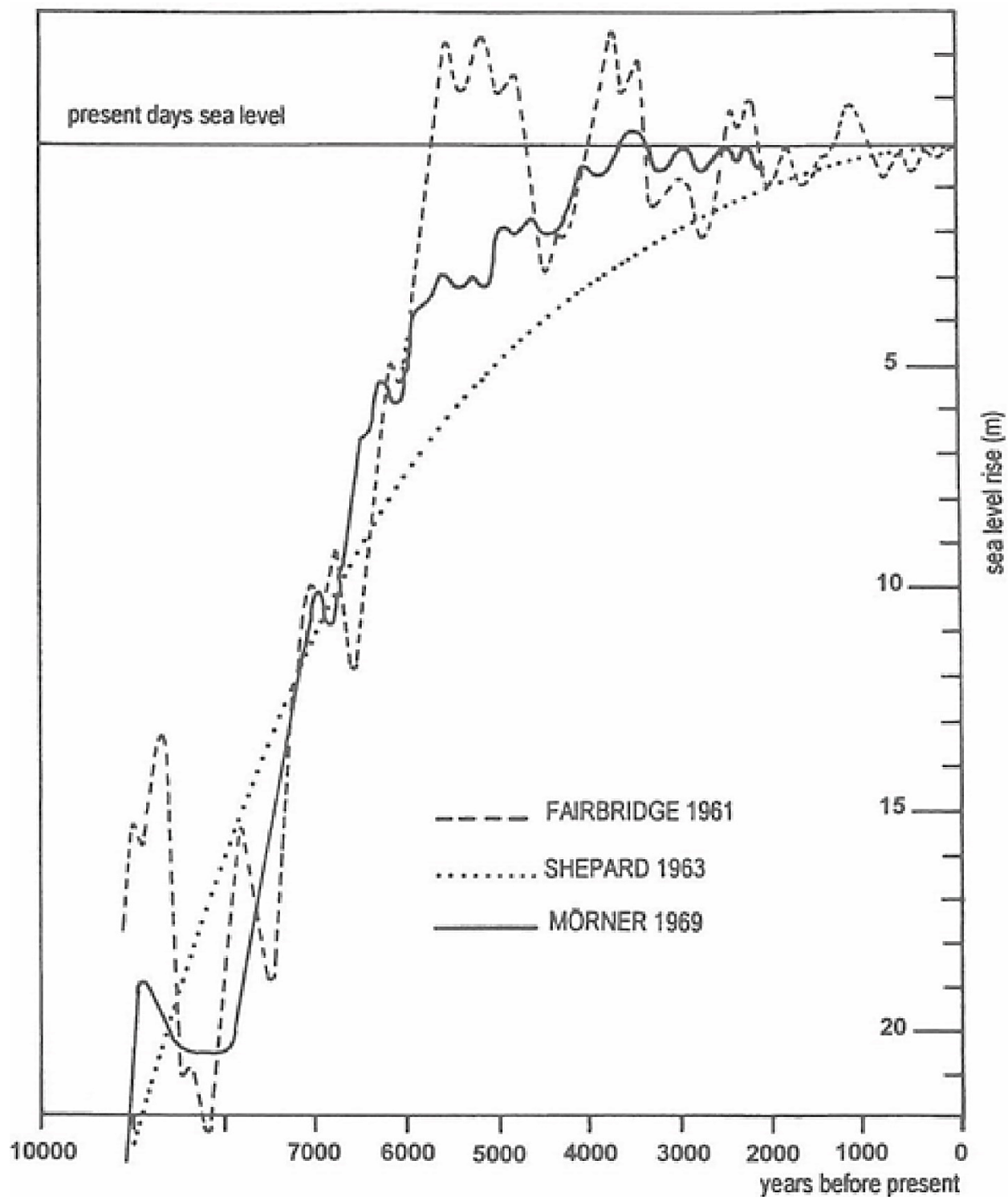


Figure 7. Evolution du niveau marin de l'Adriatique nord à l'Holocène en accord avec différents auteurs (Fairbridge, 1961 ; Shepard, 1963 ; Morner, 1969). Illustration obtenue de Gambolati et al., 1998.

## **I.1.2 Élévation du niveau marin depuis la fin du Pléistocène**

Un facteur à prendre en considération dans l'étude des sites de l'adriatique est l'évolution du niveau marin qui a largement fluctué depuis le dernier maximum glaciaire (LGM). Au cours du Pléistocène (Stade Isotopique 2, 3, 4 et 5 a-d), le plateau continental nord-adriatique est une vaste plaine fluvio-lacustre comprenant de nombreuses rivières alpines et apennines, fleuves dont le « Pô » et zones humides (marécages, tourbières, etc.). La mer nord Adriatique est un bassin semi-fermé épicontinental<sup>3</sup> formé seulement à la fin du Quaternaire (18 000 BP) (**Figure 6 et 7 – Fairbanks, 1989 ; Trincardi et al., 1994 ; Bard et al., 1996 ; Correggiari et al., 1996a ; Cattaneo et Trincardi, 1999 ; Storm et al., 2008**). Durant cet épisode, les dépôts continentaux sont continuellement remaniés et un fort apport sédimentaire du Pô et des affluents alpins et apennins est enregistré (**Cattaneo et Trincardi, 1999 ; Kubo et al., 2006 ; Storm et al., 2008**). L'augmentation moyenne du niveau marin a été estimée à 120 m correspondant à une vitesse moyenne d'environ 10 m tous les 1000 ans. L'archipel du Kvarner est formé vers 10 000 BP environ et le maximum de l'avancée de la mer dans le bassin adriatique est atteint autour de 5000 – 5500 BP (**Figure 6 et 7 – Correggiari et al., 1996a**).

---

<sup>3</sup> Mer ou océan qui recouvre une partie d'une plateforme continentale.

## I.2 Partie 2 : Climat de la région du Kvarner

### I.2.1 Vents et précipitations

L'archipel du Kvarner se trouve dans une configuration climatique particulière puisqu'il se situe à cheval entre deux types de climat. L'île de Krk et la partie nord-nord-est de l'île de Cres sont sous un climat de type méditerranéen (Csa<sup>4</sup>) alors que l'ouest et le sud de l'île de Cres se trouve sous un climat subméditerranéen (Cfa<sup>5</sup>) (Horvatić, 1957 ; Filipčić, 2000). Le climat du tiers nord de Cres est donc un peu plus frais et pluvieux que les autres parties de l'île. Cet effet est renforcé par la présence de sommets de plus de 600 m a.s.l créant des microclimats dans cette zone protégée.

Les vents qui frappent l'archipel diffèrent au cours de l'année suivant les conditions météorologiques. Ainsi, trois types de vent prédominent dans cette région de l'Adriatique (**Figure 8**) :

- la Bora<sup>6</sup> est un vent violent froid et sec provenant du nord-est de l'Europe, soufflant jusqu'à des valeurs de 12 BO (> 118 km/h) sur l'échelle de Beaufort<sup>7</sup>. C'est un vent catabatique plus fréquent en hiver et prenant son origine au niveau de l'anticyclone sibérien. Il provoque une baisse du niveau de la mer et une augmentation de la pression atmosphérique ;

- le Jugo, est un vent chaud et humide qui souffle depuis le sud-est jusqu'à des valeurs de 6 BO (39 à 49 km/h). Il est fréquent en automne et amène souvent avec lui, les orages ;

- le Maestral est un vent estival de faible vitesse qui souffle de manière constante du sud-est au nord-ouest. Il est formé par la différence de température entre la côte et la mer. La chaleur se dissipe ensuite le long de la côte.

L'humidité annuelle de l'air fluctue entre environ 60 % à la station de Rijeka-Omišalj et 64 % à la station de Mali Lošinj. Les précipitations oscillent entre 700 et 1000 mm/an avec un maximum de 994,5 mm enregistré entre 1999 et 2011 à la station de Rab et un minimum de 703,8 mm relevé entre 1997 et 2011 à la station de Mali Lošinj. Le maximum de jour de pluie est de 113,4 par an à la station de Rijeka-Omišalj et le minimum se situe à 98,4 à la station de Rab.

---

<sup>4</sup> Dans la classification de Koppen-Geiger, Csa correspond à un climat tempéré chaud avec saison sèche.

<sup>5</sup> Dans la classification de Koppen-Geiger, Cfa correspond à un climat tempéré chaud sans saison sèche.

<sup>6</sup> Bura en croate

<sup>7</sup> Echelle de mesure empirique de la vitesse moyenne du vent durant dix minutes, s'échelonnant de 0 à 12 (0 BO : calme ; 12 BO : ouragan).



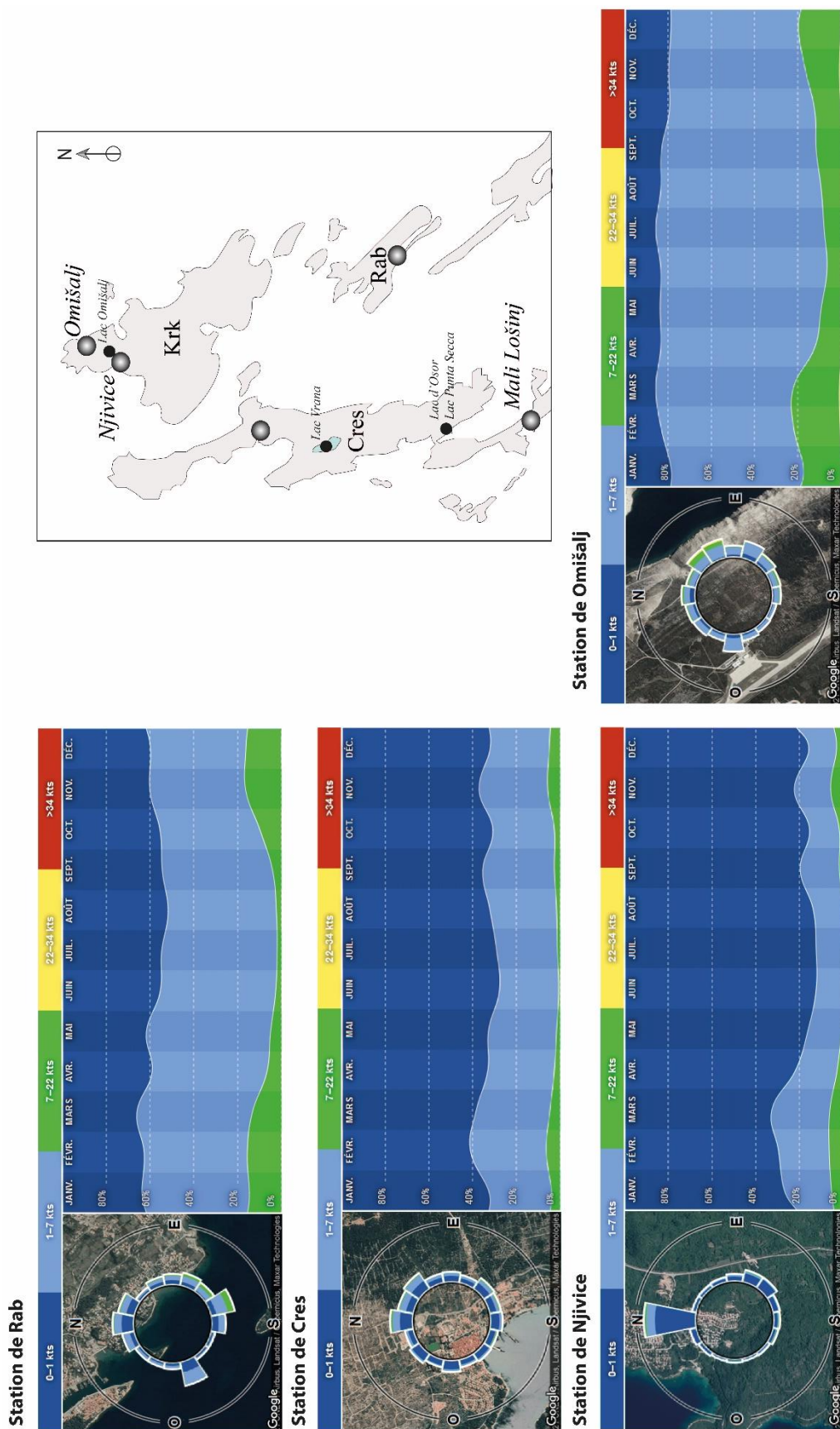


Figure 8. Direction et vitesse des vents au cours de l'année dans différentes stations météorologiques de la baie du Kvarner : Rijeka-Omisalj (île de Krk ; 85 m a.s.l), Cres (île de Cres ; 11 m a.s.l), Rab (île de Rab ; 20 m a.s.l) ; Njivice (île de Krk ; 69 m a.s.l)

## I.2.2 Températures

Les températures annuelles varient quant à elles entre 32 °C (été) et 5 °C (hiver) avec une moyenne annuelle autour de 14,8°C à Cres (**Figure 9**). La température de l'eau de mer environnante peut atteindre 26 °C en été.

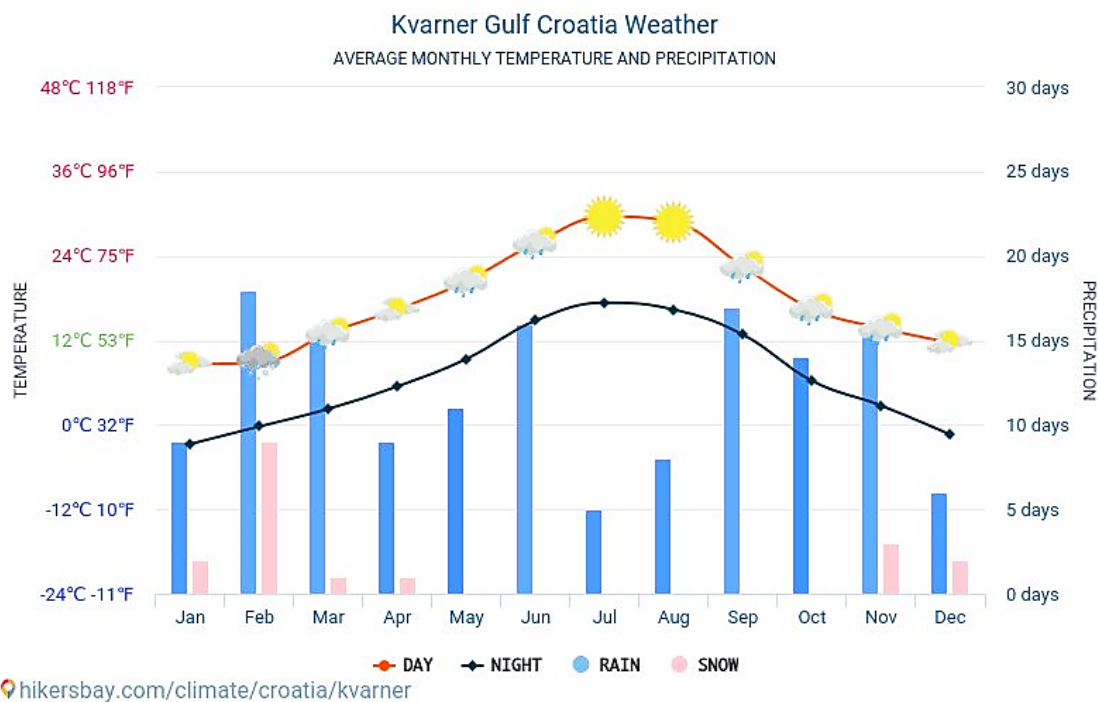


Figure 9. Diagramme ombrothermique entre 2015 et 2021 pour la baie du Kvarner (hikersbay.com)

## I.3 Partie 3 : Caractérisation des sols et de la végétation

### I.3.1 Les sols

Actuellement, l'archipel du Kvarner est principalement dominé par des sols de type « *cambisols* », « *leptosols* » et de « *luvisols* » pour l'île de Krk (**Figure 10**).

Les *cambisols* (ou sols bruns) sont bien structurés. Ils contiennent une concentration élevée en minéraux, retiennent bien les eaux et sont bien drainés. Ils sont de bonnes terres agricoles, et peuvent être utilisés pour le pâturage ou les cultures pérennes.

Les *leptosols* (ou lithosols) sont peu attractifs en raison de leur incapacité à retenir l'eau. Ils sont parfois utilisés pour les cultures arboricoles ou le pâturage extensif. Ils sont soumis à une importante érosion induite notamment par leur exploitation et à la forte pression démographique (tourisme ; **Brabant, 2008** ; **Akkari et al., 2022**). Depuis plusieurs années, les activités anthropiques sont à l'origine d'une détérioration croissante des forêts et des *leptosols* de ces îles (**Bašić, 2013**).

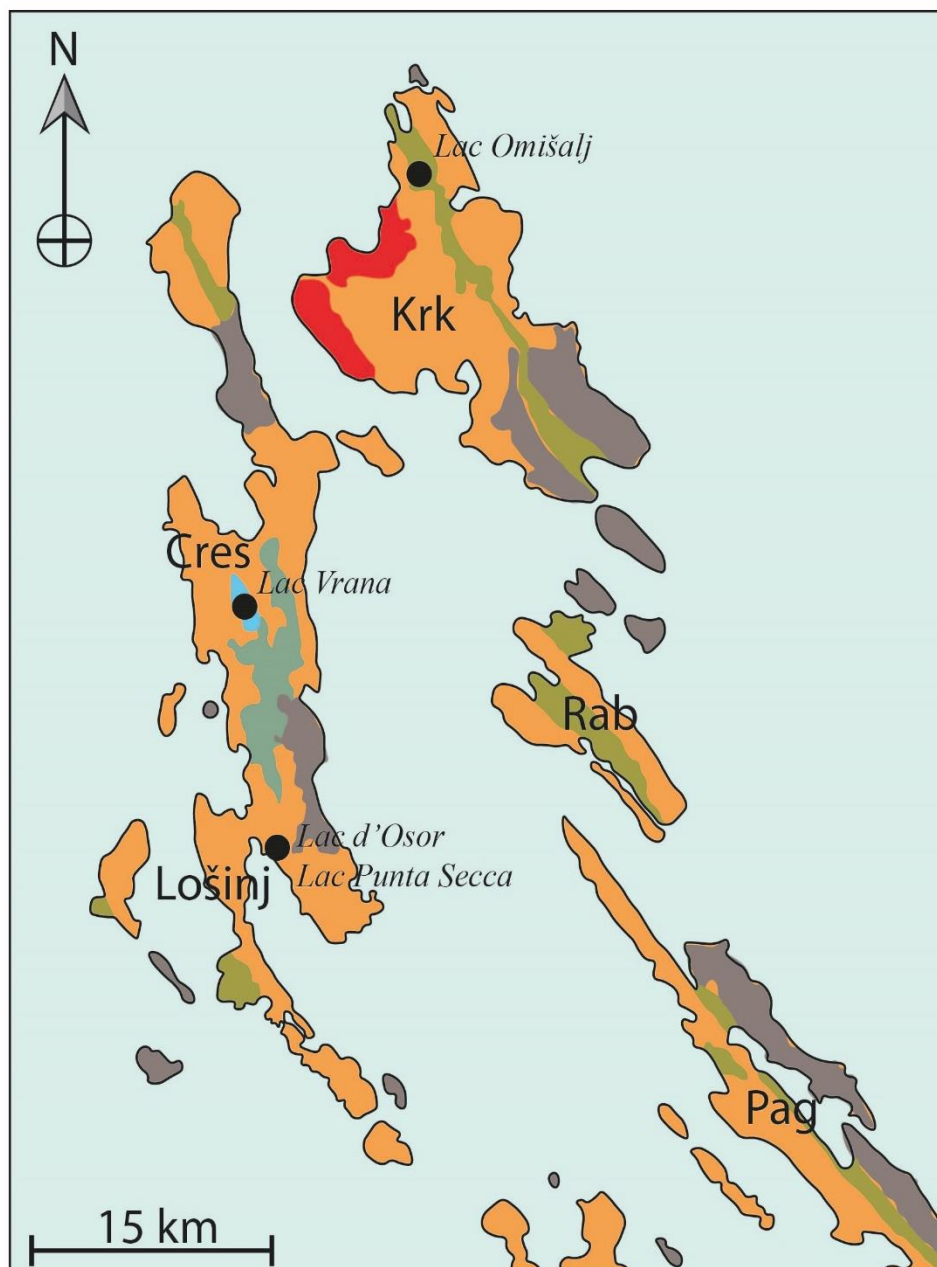
Enfin, les *luvisols* se composent d'agrégats d'argiles et d'autres matières minérales et/ou organiques du sol et se développent généralement sur des surfaces planes ou en pente douce. En raison d'un bon drainage, une altération modérée et d'une bonne fertilité, ils sont adaptés à plusieurs types d'utilisations agricoles. En région méditerranéenne, les *luvisols chromiques*<sup>8</sup> sont généralement présents dans les dépôts colluviaux\* d'altération calcaire. Les pentes inférieures de ces dépôts sont cultivées (blé et/ou de la betterave à sucre) tandis que les pentes supérieures sont utilisées pour le pâturage extensif ou pour l'arboriculture.

### I.3.2 Distribution de la végétation et des surfaces agricoles

La distribution irrégulière de la végétation sur l'archipel du Kvarner est en partie causée par la « Bora » qui tend à inhiber la croissance des arbres (**Figure 10** ; **Photo 1**). Ce vent violent endommage et diminue la couverture végétale par son action mécanique et l'apport d'embruns qui salinisent les sols. Cet effet est d'autant plus accentué sur les espaces ouverts par les déforestations successives antérieures. À noter que le vent est également un facteur important de la dissémination du pollen à une plus grande distance.

---

<sup>8</sup> Appeler également *Terra Rossa*



Classification des sols du Kvarner  
(Bogunovic et al., 1996)

- |  |   |
|--|---|
|  Leptosols lithic         |  Cambisols chromic |
|  Leptosols rendzic        |  Luvisols chromic  |
|  Leptosols mollic rendzic |  Sites de forage   |

Figure 10. Carte des sols dans la baie du Kvarner retracer d'après la carte de [Bogunovic et al., 1996](#).

L'île de Cres est caractérisée par des paysages karstiques comprenant des cultures permanentes (e.g. citronnier, olivier, vigne, etc.) et des pâturages rocheux au nord. Des zones boisées et semi-naturelles sont présentes sur le reste de l'île (forêts de conifères, forêts mixtes, prairies naturelles, etc. **Figure 11, Photo 1**).

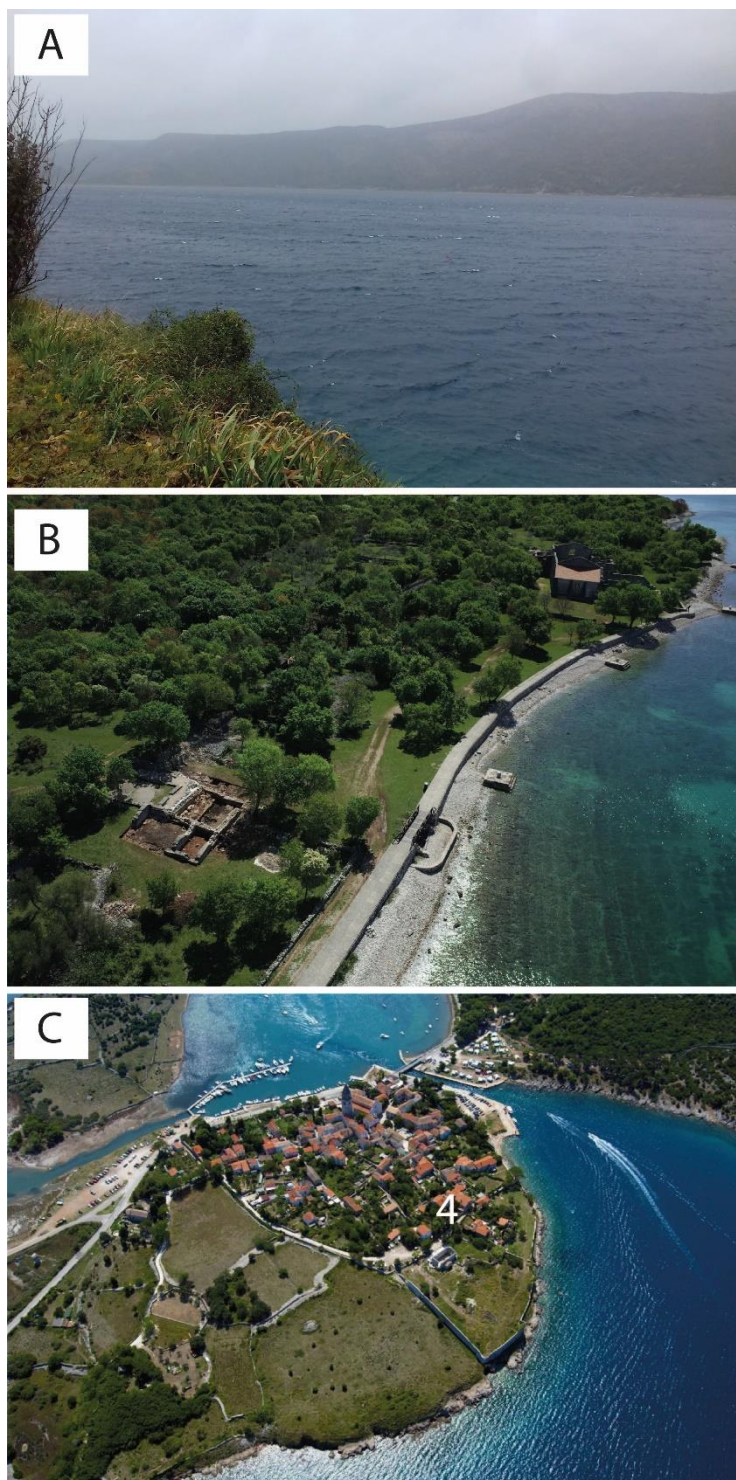
La différence de climat entre le nord et le sud de l'île de Cres s'exprime visiblement par la répartition de la végétation. Le sud de l'île est dominé par une végétation méditerranéenne à feuilles caduques, notamment le chêne vert (*Quercus ilex*). Le nord présente de nombreuses espèces forestières montagnarde mésophiles\* en raison des conditions plus fraîches et venteuses propices à leurs établissements.

Ainsi, le nord de l'île est majoritairement dominé par le chêne lombard (*Quercus cerris*), le chêne pubescent (*Quercus pubescens*), le charme (*Carpinus orientalis*), le charme-houblon (*Ostrya carpinifolia*), le châtaignier (*Castanea sativa*) et le merisier (*Prunus avium*) (**Mavrović, 1994**). Dans la strate herbacée, on retrouve également l'anémone sylvie (*Anemone nemorosa*), l'anémone fausse renoncule (*Anemone ranunculoides*), la campanule gantelée (*Campanula trachelium* L.), le crocus (*Crocus vittatus*), la cyclamen des Alpes (*Cyclamen purpurascens*), la digitale girafe (*Digitalis laevigata*), la dent de chien (*Erythronium dens-canis*), l'euphorbe des bois (*Euphorbia amygdaloides*), la potentille à petites fleurs (*Potentilla micrantha*), la primevère des jardins (*Primula vulgaris* Huds.), l'épiaire des bois (*Stachys sylvatica* L.), ou encore la véronique petit-chêne (*Veronica chamaedrys* L.)...

Au total, plus de 1300 espèces de plantes sont répertoriées sur l'île de Cres dont certaines sont endémiques à cette région (e.g. clochette d'Istrie (*Campanula istriaca*), jacée de Raguse (*Centaurea ragusina*) (**Bonacci, 2018**).

L'île de Krk est davantage anthropisée comprenant dans les plaines du nord de nombreuses zones industrielles et artificielles. Des terrains rocheux, des terrasses, des pâturages et des champs labourés complètent le paysage. La partie centrale plus en relief est composée de sols fertiles qui ont permis le développement intensif des activités agricoles. Les autres zones qui n'ont pas été cultivées, ont été envahies par la forêt ou sont restées des terres nues. L'ouest de l'île est couvert de forêts de chênes pubescents et de charmes-houblons avec un liseré côtier de chênes verts. Le sud de l'île est relativement inhospitalier avec des espaces ouverts où il n'y a pas ou peu de végétation (plages, dunes et reliefs escarpés). Cette partie de l'île plus

montagneuse est principalement composée du *polje*<sup>9</sup> de Basko utilisés pour les activités agricoles. Les plateaux karstiques entre 300 et 400 m a.s.l qui bordent ce *polje* sont utilisés comme pâturages. Ils se composent exclusivement de landes et de garrigues.



*Photo 1. Archipel du Kvarner : A. Lac Vrana, île de Cres ; B. Omišalj, Ile de Krk ; C. Osor, île de Cres (©Marine Rousseau & Sébastien Bully)*

<sup>9</sup> Champ karstique à fond plat.

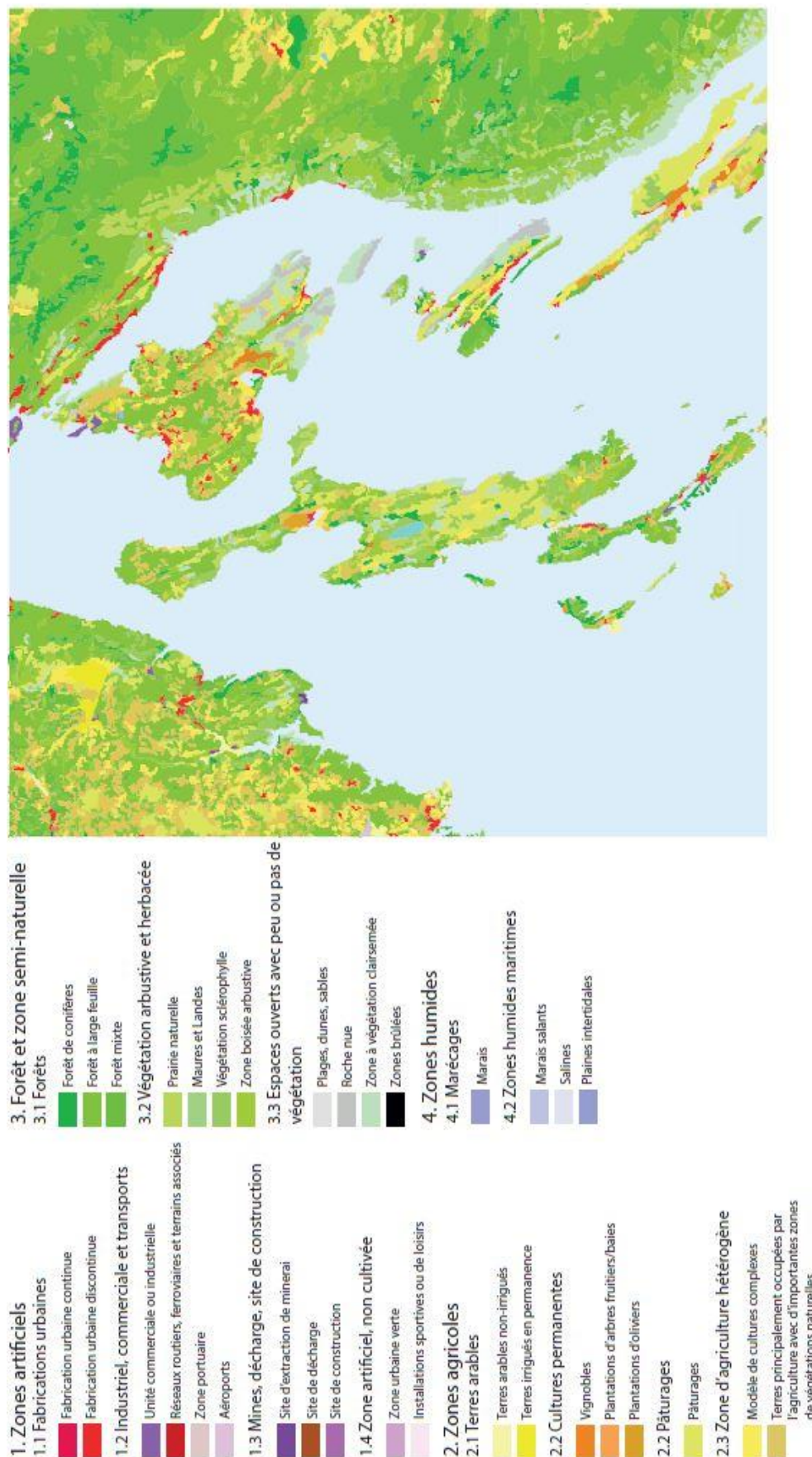


Figure 11. Carte de l'utilisation des terres sur l'archipel du Kvarner (CORINE programme 2000)

### **I.3.3 Agriculture, arboriculture et pastoralisme actuels**

De tout temps, l'espace donné à l'agriculture et à l'élevage a été fortement conditionné par la géographie des îles. L'agropastoralisme\* a dû s'adapter à la géomorphologie des terres modelant ainsi les paysages. La présence de reliefs accidentés et de sols légers rend les pentes très sensibles à l'érosion par le ruissellement. Ajouter au climat méditerranéen, cela impose aux agriculteurs, la construction de terrasses régulières où irrégulières pour maintenir les sols et installer des vignobles, oliveraies et des cultures permanentes (e.g. citronnier, figuier, et autres arbres fruitiers ; **Figure 12, 13 et 14**). Cette technique leur permet ainsi d'augmenter les surfaces cultivables.

Les terrasses régulières sont de forme rectangulaire et sont mises en place sur des sols peu pentus entre 5 à 12°, peu profonds mais fertiles. Ces terrasses sont construites à partir des pierres retirées des sols à proximité. Elles forment des paysages dit « en boîte » (**Gams, 1991**). Les terrasses irrégulières sont légèrement différentes puisqu'elles sont délimitées par des murs en pierre sèche et sont construites sur des pentes douces entre 0 et 2° afin de favoriser la culture de plantes ligneuses (e.g. olivier, vigne). Des terrasses ovales en pierre ont également été construites, formées dans des dolines sèches et ceinturées par des murs. Bien qu'encore utilisées, les terrasses ovales sont développées dans les zones de torrents, et restent peu accessibles et peu arables pour l'agriculture.

Les petites dolines naturelles sont quant à elles délimitées par des murs en pierres sèches et leur fond est formé d'une épaisse couche de sol fertile qui les rend propices à la mise en culture. Elles sont adaptées à un usage agraire à long terme.

Dès le XIIème siècle, sont mentionnées par **Kranjc et al., 2009** des phases de reforestation des karsts dinariques mais deux phases réellement importantes de reforestation par des espèces de pins noirs ont été menées au milieu du XIX et au XXème siècle.

Au XIXème siècle certains vignobles du Kvarner et notamment ceux de Cres sont ravagés par le phylloxera.

Depuis le milieu du XXème siècle, suite à l'exode d'après-guerre et à l'afflux croissant de touristes, une diminution drastique des surfaces agricoles a été enregistrée sur l'ensemble de



l'archipel du Kvarner (Nicod, 1990). Les terres agricoles ont été mises à profit pour la construction d'espaces de loisirs, de centres commerciaux, etc.

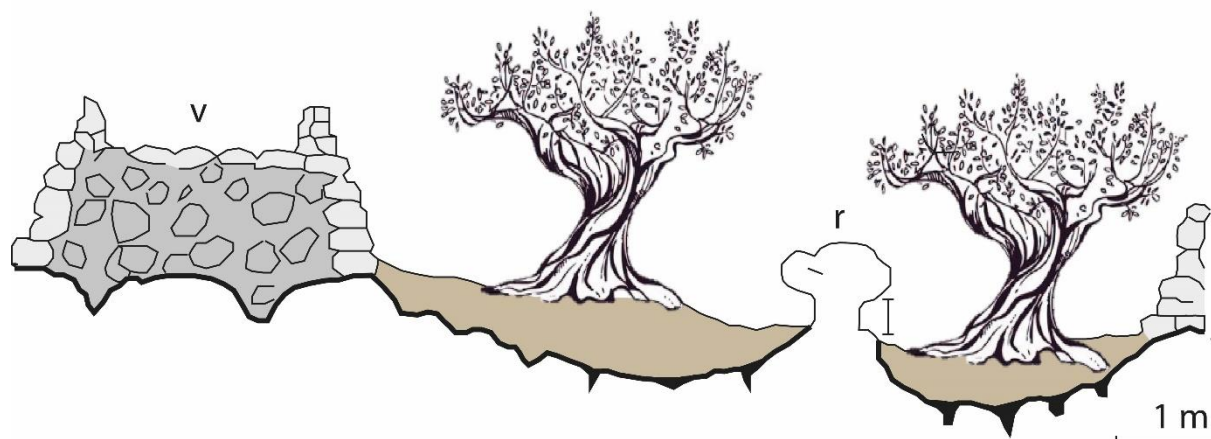


Figure 12. Coupe à travers une vieille olivette de Punat sur l'île de Krk (Illustration redessinée de Nicod, 1990). V – varvakan, murs d'épierrement surmontés de murettes déterminant un chemin de transhumance (draille) ; r – rocher, à encoche de corrosion permettant d'évaluer l'érosion du sol

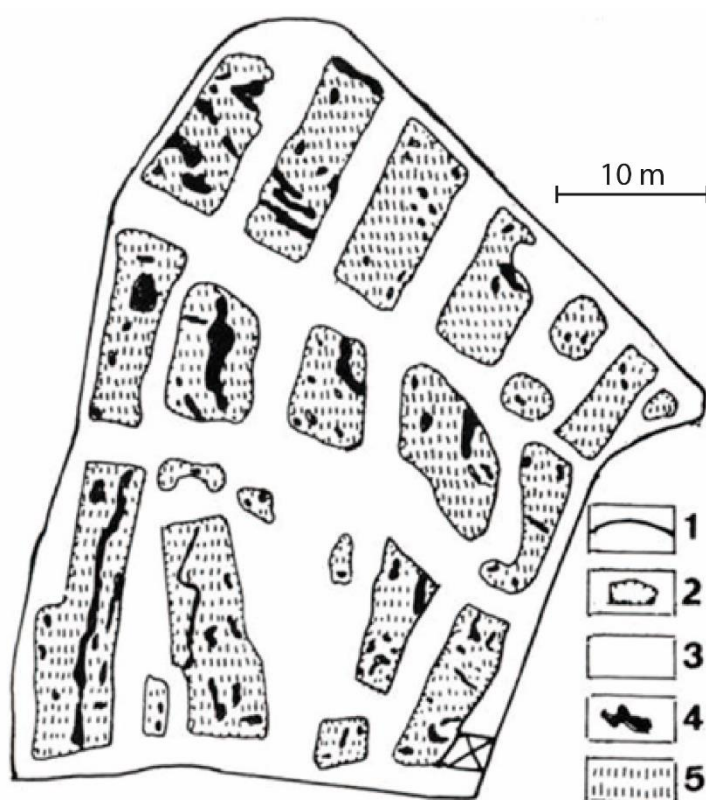


Figure 13 Aménagements anciens à Punat sur l'île de Krk (Gams, 1991a). Types de murs : 1. Enclos ; 2. Soutènement ; 3. Amas de pierre ; 4. Rochers ; 5. Parcelles de vigne

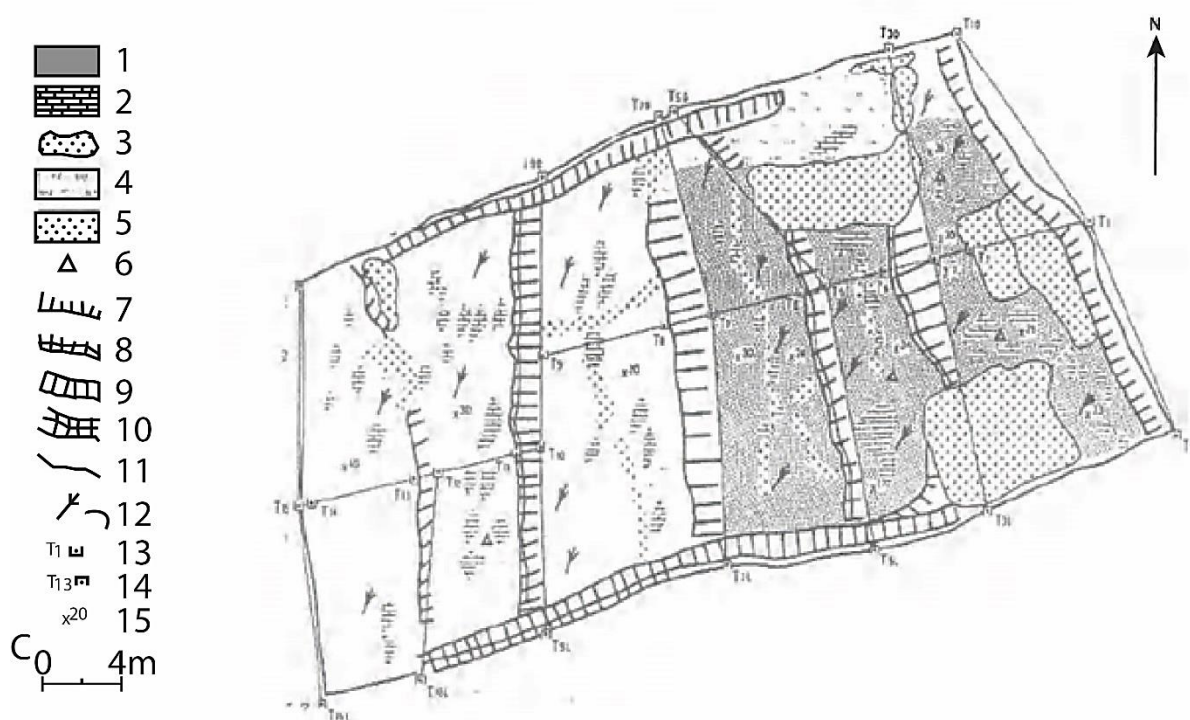


Figure 14. Verger sur des terrasses de cultures au nord de Punat sur l'île de Krk (Gams, 1991a). 1 – Sol nettoyé. 2 - Affleurement rocheux. 3 - Rangée de blocs accumulés. 4 - Buissons. 5 - Grand amas de bloc. 6 - Station de mesure. 7 - Escarpement. 8 - Escarpement rocheux. 9 - Varvakan. 10 - Varvakan avec ajout d'une rangée. 11 - Mur simple. 12 - Olivier. 13 - Station de mesure principale. 14 - Station de mesure supplémentaire. 15 - profondeur (en m).

Par ailleurs, la région du Kvarner est réputée dans tout le bassin méditerranéen pour ses fromages et sa viande d'agneau. Dès le XVI<sup>ème</sup> siècle, les agneaux des îles dalmates et istriennes sont recherchés pour leur viande parfumée spéciale puisqu'ils broutent dans les pâturages un grand nombre de plantes aromatiques (marjolaine, thym, sauge, etc.) recouvertes de sels marins apportés par les vents. De 1850 à 1950, la population des îles du Kvarner augmente fortement (Lončarić et al., 2011) et entraîne un accroissement des activités pastorales (e.g. augmentation du nombre de troupeaux et de moutons). L'activité économique autour de la laine, du fromage, du lait et de la viande s'intensifie. Les pâturages sont installés en hauteur, dans les endroits souvent inaptes aux cultures. Un certain nombre d'enclos pastoraux en pierres sèches (*mrgàri*) de parcelles forestières (*drumns*) et de pâturages (*torses*) vestiges de ces activités pastorales sont encore visibles dans les paysages du Kvarner et dont certains sont encore en fonctionnement (Vinscak et al., 1991 ; Anićić et al., 2004). Les *mrgàri* sont des édifices en pierres sèches connus et étudiés sur plusieurs sites de Dalmatie et d'Istrie de l'âge du Fer (Chapman, Shiel et Batović 1987 ; Sirovica 2015). Ils permettent de

rassembler les troupeaux après les périodes de pâturage (au moins 2 fois par an) et de trier les moutons pour la tonte, la traite, les soins (ex. les ovins et caprins sont régulièrement huilés pour les protéger des tiques), etc. Le reste de l'année, les moutons et les chèvres pâturent en toute liberté. Les *mrgari* peuvent avoir différentes formes mais là plus réputée est celle dite « *Veli mrgar* ». Cet enclos circulaire ressemble à une fleur de pierre (**Figure 15**). Il se compose d'une salle centrale (*sala*) entourée par de plus petites salles (*mrgarići*), chacune ayant une entrée et une sortie séparée. L'entrée à la forme d'un entonnoir (**Vinščak, 1999**). Ces enclos peuvent parfois être abandonnés et réutilisés pour mettre des vignes.

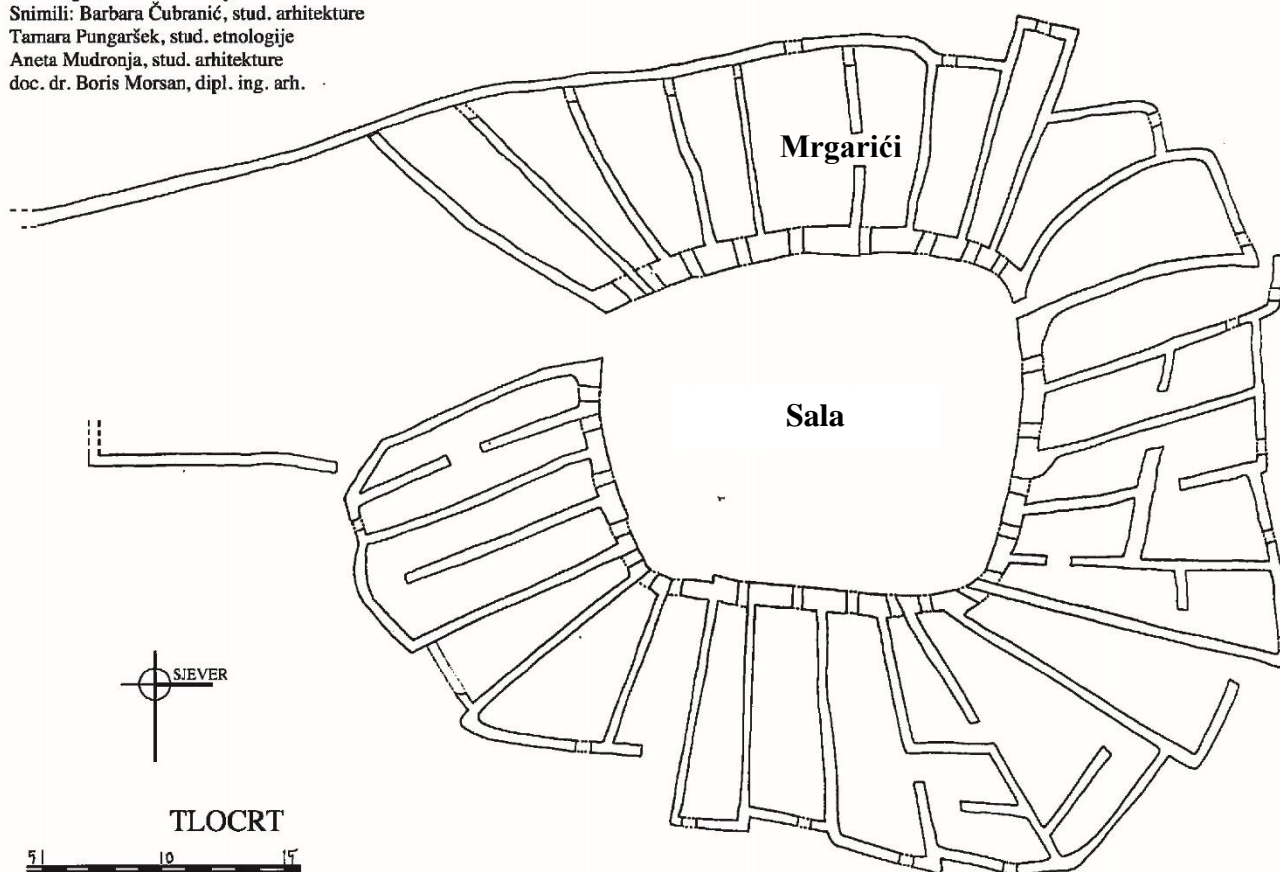
Veli mrgar, o. Krk. Svibanj, 1994.

Snimili: Barbara Čubranić, stud. arhitekture

Tamara Pungaršek, stud. etnologije

Aneta Mudronja, stud. arhitekture

doc. dr. Boris Morsan, dipl. ing. arh.



*Figure 15. Veli mrgar sur l'île de Krk.*

Les torsos sont des pâturages comprenant des murs en pierres pour protéger le bétail des vents violents. Enfin, les *drumns* sont des parcelles forestières utilisées pour la production de bois et pour abriter les troupeaux des aléas météorologiques. De plus, à certaines périodes de l'année, les moutons peuvent être parqués plusieurs nuits dans les oliveraies afin de brouter les tapis d'herbacées et le genévrier permettant une régénération plus rapide des oliviers et donc une augmentation des rendements. Ils sont également utilisés sur certaines parcelles pour fumer les terres. Dans les milieux insulaires, l'élevage, l'exploitation forestière et l'agriculture sont donc trois activités étroitement associées.

Entre 1797 et 1813, Napoléon Ier établit la « *komunada*<sup>10</sup> », pendant trois brèves périodes d'annexion des provinces illyriennes à la France. L'appareil d'Etat est réorganisé et met à disposition des populations autochtones des terres appartenant au clergé. Les *komunades* étaient utilisés pour le pâturage des moutons par les familles qui ne possédaient pas assez de terres. L'utilisation de ces pâturages impliquait une obligation d'entretien (réparation des murs, tonte...). Ces pâturages communaux apparaissent dans le paysage comme une parcelle non-structurée et irrégulière, séparés des pâturages aménagés voisins privés, des *komunadas* des autres administrations, ou des petits trous karstiques clôturés. Des étangs (*Lavrogne*) pour abreuver le bétail été également créés en comblant de débris des cavités karstiques.

Depuis 1950, le nombre de troupeaux ayant chuté, ces enclos et pâturages sont peu à peu abandonnés et sans entretien ils se dégradent rapidement. Pour exemple, l'île de Cres dont l'espèce de mouton Tramuntana est endémique, comptait encore 40 000 moutons en 1900, il n'en reste environ que 15 000 actuellement. L'une des principales raisons de cet effondrement est l'introduction de sangliers et l'exode des familles d'agriculteurs. Depuis, les pâturages sont peu à peu envahis par le genévrier et une végétation buissonnante épineuse au détriment des herbes et fleurs sauvages.

---

<sup>10</sup> Pâturages communautaires.

## I.4 Partie 4 : Contexte Préhistorique et Historique

### I.4.1 Préhistoire

Janez Vajkard Valvasor est le premier érudit au XVII<sup>ème</sup> siècle, à rédiger des écrits archéologiques pour l'archipel du Kvarner (**Kavur, 2014**). Jusqu'au milieu du XX<sup>ème</sup> siècle, la plupart des fouilles sont menées par des passionnés d'archéologie ou des commissaires de musées. Un grand nombre de vestiges ne sont ainsi pas répertoriés et/ou perdus dans des collections privées et des réserves de musées. Ces dernières années, un travail de fond est mené par des équipes d'archéologues et d'historiens afin de documenter, référencer et publier ces découvertes anciennes (**Kavur, 2014**).

Dans la littérature disponible, il est régulièrement attesté que l'homme de Néandertal s'est très bien acclimaté aux environnements continentaux et méditerranéens de l'actuelle Croatie mais très peu de sites paléolithiques ont été découverts le long de la côte dalmate. Au Pléistocène, les grandes plaines de l'Adriatique nord sont salines (**Mussi, 2001**) mais abritent d'importantes ressources en eau, en gibier et matériaux lithiques (**Van Andel, 1989 ; Bailey et Gamble, 1990 ; Miracle, 1995**). Les rares sites de grottes du Pléistocène inférieur à moyen sont ceux de *Šandalja II* près de Pula, *Bukovac pećina*, *Velika pećina* (Kličevica), *Veli Rat* sur l'île de Dugi, *Vindija*, *Kaštel Štafilić*, *Krapina*, *Pupićina*, *Velika pećina* (Klicerica), et *Mujina pećina* (**Figure 16 ; Karavanić et al., 2003 ; Karavanić & Janković, 2007 ; Frayer et al. 2007 ; Janković et al. 2011**). Ces sites sont très souvent pauvres en mobilier archéologique ou très peu étudiés particulièrement pour ceux de la côte adriatique. Pour exemple, le site de *Šandalja II* a permis de mettre au jour quelques restes fauniques, un racloir et un percuteur vraisemblablement utilisé pour l'industrie lithique (**Malez, 1974 et 1975**).

À la transition Pléistocène – Holocène, la hausse rapide du niveau marin provoque l'inondation des grandes plaines de basse altitude (plaine du Pô) et ainsi la formation de la partie nord de la mer Adriatique (**Figure 16**). Ces changements hydrologiques ont d'importantes conséquences sur les populations de chasseurs-cueilleurs du Mésolithique.

Actuellement, aucune preuve archéobotanique n'a été découverte pour permettre de connaître le régime alimentaire des hommes du Mésolithique en Croatie. Les premières traces de sédentarisation sont détectées à la transition entre le Mésolithique et le Néolithique

(Forenbaher and Kaiser, 2005 ; Šoštarić, 2005 ; Andrić, 2007 ; Lightfoot et al., 2011 ; Forenbaher et al., 2013 ; Reed, 2015).

En région adriatique, le Néolithique débute vers 6000 cal. BC (7950 cal. BP). Les sites de grottes découverts en altitude se situent en Istrie à *Pupićina*, *Sebrn Abri* et *Nugljanska*, et en Dalmatie du sud à *Vela Spila* (Figure 17 ; Birch et al., 2017). Les preuves archéologiques découverts sur les sites de *Pupićina* (Miracle 2001 et 2002) et d'*Abri Sebrn* (Miracle et al., 2000) permettent d'attester que les communautés vivaient préférentiellement de la chasse (cerf, daim, chevreuil, sanglier, lièvre, etc.), de la pêche (dont le thon et le dauphin) et de la cueillette (mollusques marins et terrestres).



Figure 16. Sites importants du Paléolithique en Croatie : 1. Šandalja, 2. Vindija, 3. Velika pećina, 4. Krapina, 5. Bukovac pećina, 6. Pupićina, 7. Velika pećina, Klicerica, 8. Kaštel Štafilić, 9. Mujina pećina, 10. Veli Rat (île de Dugi). Illustration modifiée de la publication de Karavanić, 2003.

Sur l'archipel du Kvarner, plusieurs grottes ont été habitées (**Falkenstein, 2013**). Les prospections archéologiques ont ainsi référencé les cavernes de *Vela Špilja* (**Figure 17**) et de *Vela Jama* près de Lošinj dont les premières activités humaines ont été datées pour cette dernière au radiocarbone à 6050 – 5990 BC (**Mirosavljević, 1968 ; Batovič, 1979 ; Muller, 1994**), *Jama na Sredi* et *Grmozaj* sur l'île de Cres (**Mirosavljević, 1959, 1962, 1971 ; Batovič, 1979 ; Muller, 1994**), *Vogranska peć* sur l'île de Krk (**Mirosavljević, 1962 ; Batovič, 1979**), et *Špilja Kopačina* sur l'île de Brač. *Vela Špilja*, l'un des uniques sites fouillés, a permis la découverte de trois restes d'enfants au fond de la grotte, de céramiques et de restes de moutons et chèvres domestiqués. Les niveaux du début du Néolithique se recourent avec ceux du Mésolithique suggérant que ces grottes ont été utilisées pendant la transition Mésolithique-Néolithique (**Čečuk et Radić, 2005**).

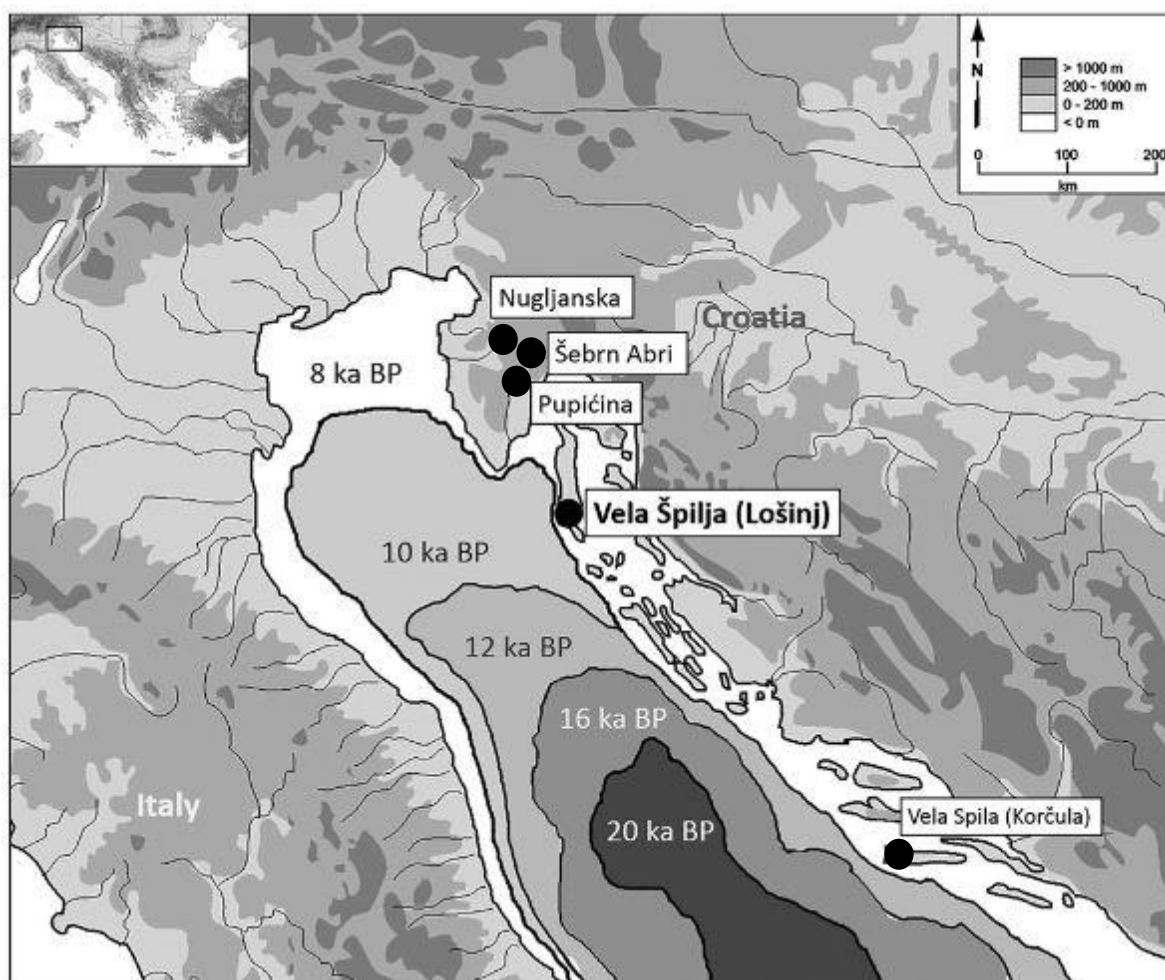


Figure 17. Carte de la formation de la mer nord adriatique à la transition Pléistocène-Holocène et localisation des sites de peuplement datés de la transition Mésolithique-Néolithique d'après **Birch & Miracle, 2017**.

Dès 5650 cal. BC environ (7600 cal. BP), les habitats en plein air apparaissent de manière synchrone le long de la côte Adriatique. Des sites ouverts à Lopari et sur l'île de Rab sont mis au jour. En Croatie, le pastoralisme semble débiter vers environ 5050 BC (7000 BP), certaines grottes sont alors spécifiquement utilisées comme bergeries (**Forenbaher & Miracle, 2005**). L'agriculture a probablement été diffusée par cabotage le long de la côte et des îles de la péninsule istrienne et dalmate (**Forenbaher et Kaiser, 2005 ; Kačar, 2021 ; Figure 18**). Des céramiques et des datations sur l'île de Lošinj confirment en partie que les îles adriatiques orientales ont été précocement occupées par des agriculteurs-cueilleurs (**Forenbaher et al., 2013**). Les changements démographiques telles que les migrations ont pu également jouer un rôle majeur dans la transition vers l'agriculture (**Biagi, 2003**). Dès le Néolithique, la diversité des céramiques retrouvées sur le continent et en zone côtière (culture de Starčevo, de Sopot, de Hvar, etc.) suggère que l'agriculture était déjà diversifiée (**Reed, 2015**). Certaines études tendent d'ailleurs à démontrer que le mode de vie était principalement centré sur les activités agricoles avec la culture de céréales (petit épeautre, blé amidonnier, etc.) et de légumineuses ainsi que de l'élevage (moutons, chèvres, bovins, porcs ; **Jurić et al., 2001 ; Obelić et al., 2004**). La cueillette de glands, de baies de genévrier, d'amandes ou même de coquillages ainsi que la chasse devaient également prendre une part importante dans les moyens de subsistance. L'ensemble de ces changements sociétaux ont alors au cours du temps entraîné une augmentation graduelle de la pression humaine sur les écosystèmes et la transformation lente de l'environnement. Pour le Néolithique, l'impact des activités humaines restent cependant très faible par rapport aux périodes plus récentes. Elles sont discernées dans les diagrammes polliniques par de faibles proportions de céréales (1 à 2 % ; **Schmidt et al., 2000 ; Beug, 1967 ; Jahns et van den Bogaard, 1998 ; Brande, 1973**).

Le Chalcolithique est compris en Istrie entre 4500 et 2200 BC environ soit entre 6450 et 4150 BP environ. Dans le bassin des Carpates et jusqu'au nord de l'Italie un changement net du mode de subsistance comprenant le développement d'une agriculture végétale plus diversifiée est observé (**Kaniewski et al., 2018 ; Rottoli et al., 2008**). Les cultures du petit épeautre (*Triticum monococcum*), du blé amidonnier (*Triticum turgidum ssp. dicoccum*) ou encore de l'orge (*Hordeum vulgare ssp. vulgare*) deviennent dominantes (**Reed, 2017 ; Kaniewski et al., 2018**). Cependant, malgré ces preuves solides de l'augmentation des pratiques agricoles au Chalcolithique, aucune anthropisation majeure n'a été mise en évidence avant ~ 3000 cal BC sur la dynamique de végétation dans les reconstructions environnementales (**Jahns et Van den Bogaard, 1998 ; Šoštarić, 2005**). Cependant, **Kaniewski et al., 2018**



démontrent que l'impact anthropique pouvait tout de même être déjà important en Istrie et suggèrent l'intégration des oliviers sauvages (*Olea europaea subsp. europaea var. sylvestris*) à l'agriculture dès la fin du Chalcolithique.

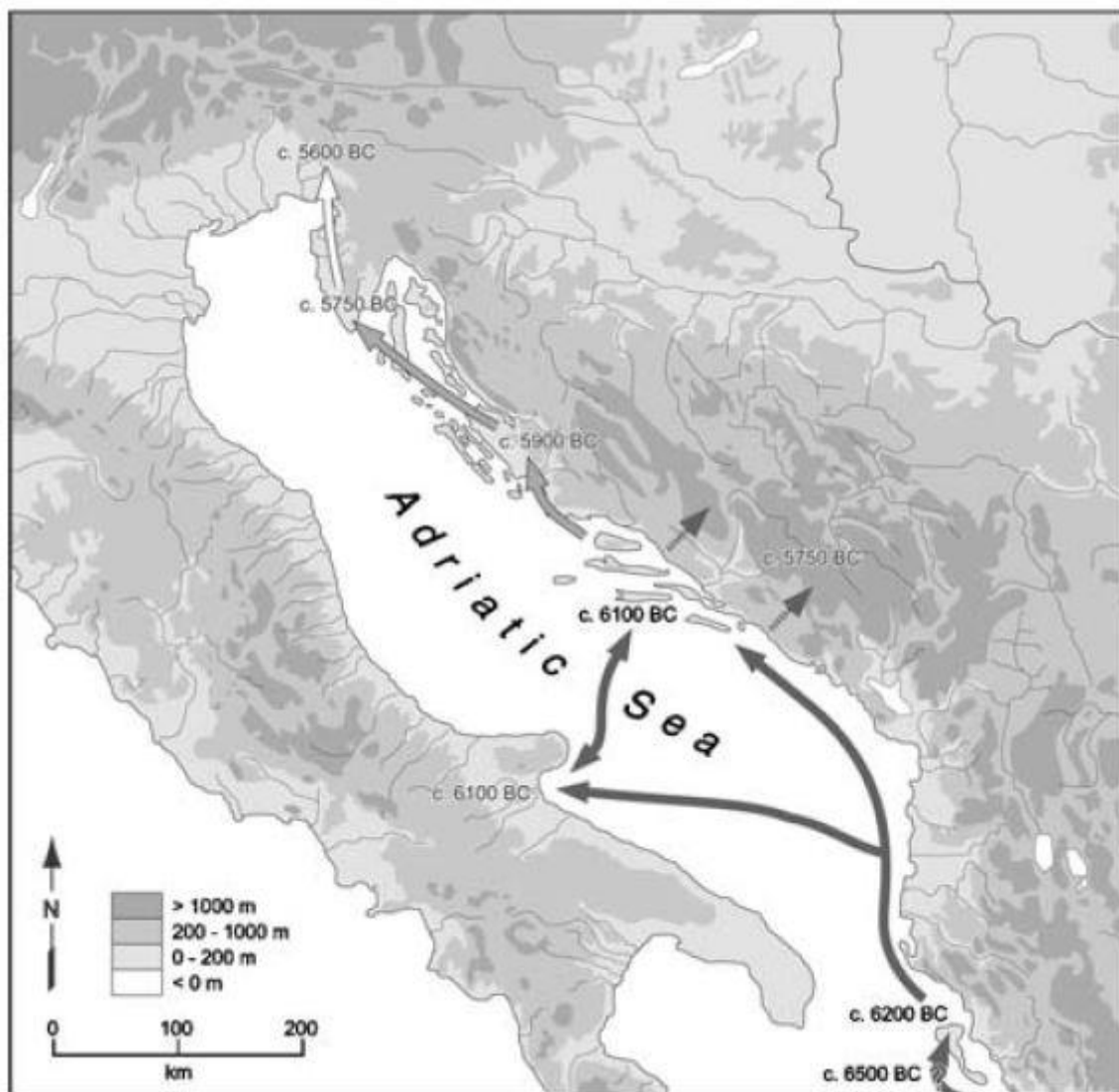


Figure 18. Carte des phases de développement de l'agriculture dans le bassin Adriatique d'après [Forenbaher et al., 2005](#). Les flèches noires correspondent à la première phase rapide de la colonisation par « saute-mouton » associée au courant Impressa. Les lignes grises correspondent à la seconde phase « d'expansion agropastorale ». Enfin, les lignes blanches correspondent à la troisième phase « d'expansion agropastorale » associée aux poteries Danilo/Vlaska.

#### I.4.2 Protohistoire

Dès l'âge du Bronze (environ de 2200 – 900 BC soit 4150 – 2850 BP), des sites fortifiés perchés sont édifiés (*castellieri* ou *gradine*). On dénombre ainsi 1000 sites fortifiés sur la

péninsule dont 19 attestés sur les lignes de crêtes de l'île de Cres (**Čučković, 2017** ; **Figure 19 et 20**). L'utilisation et la fonction de ces sites sont difficiles à définir du fait de la rareté des recherches et des fouilles archéologiques. Ces lieux n'étaient vraisemblablement pas centraux et n'étaient pas fréquentés en permanence. Une hypothèse régulièrement admise et argumentée de preuves archéologiques, est que ces sites fermés et visibles étaient le lieu d'activités pastorales (**Stapsak, 1995**). La présence d'un pastoralisme spécialisé ou intensif au cours de ces périodes a déjà pu être démontrée (e.g. site fortifié de Rat sur l'île de Brač, grotte de *Pupićina* en Istrie ; **Forenbaher et Miracle 2006** ; **Gaastra, Cristiani et Barbarić, 2014**).

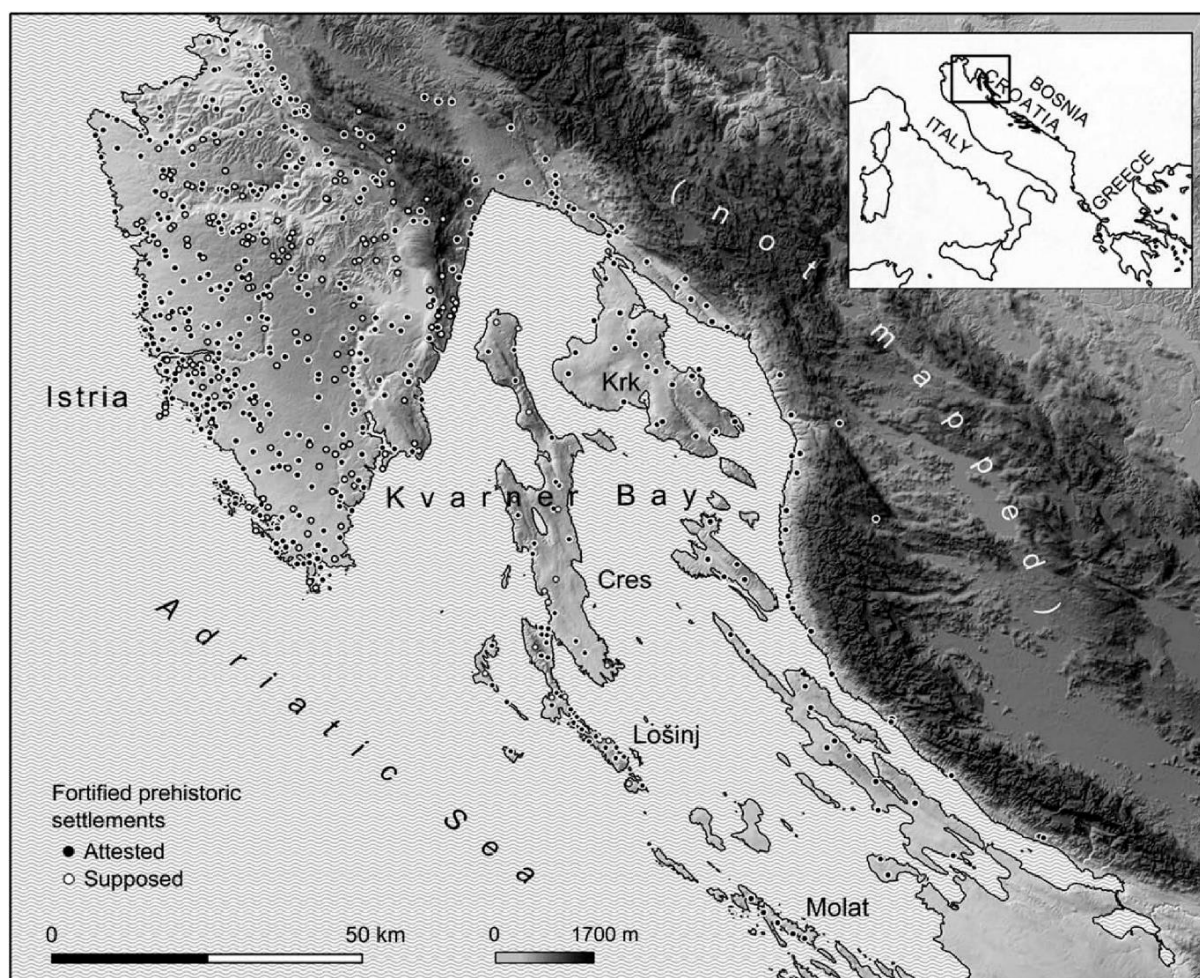


Figure 19. Carte des sites de l'âge du Bronze et du Fer dans la région de l'Istrie et du Kvarner d'après la publication de **Čučković (2017)** dont les données ont été obtenues de **Marchesetti (1903, 1924)**, **Mirosavljević (1974)**, **Batović (1977)** et **Buršić-Matijašić (2007)**.

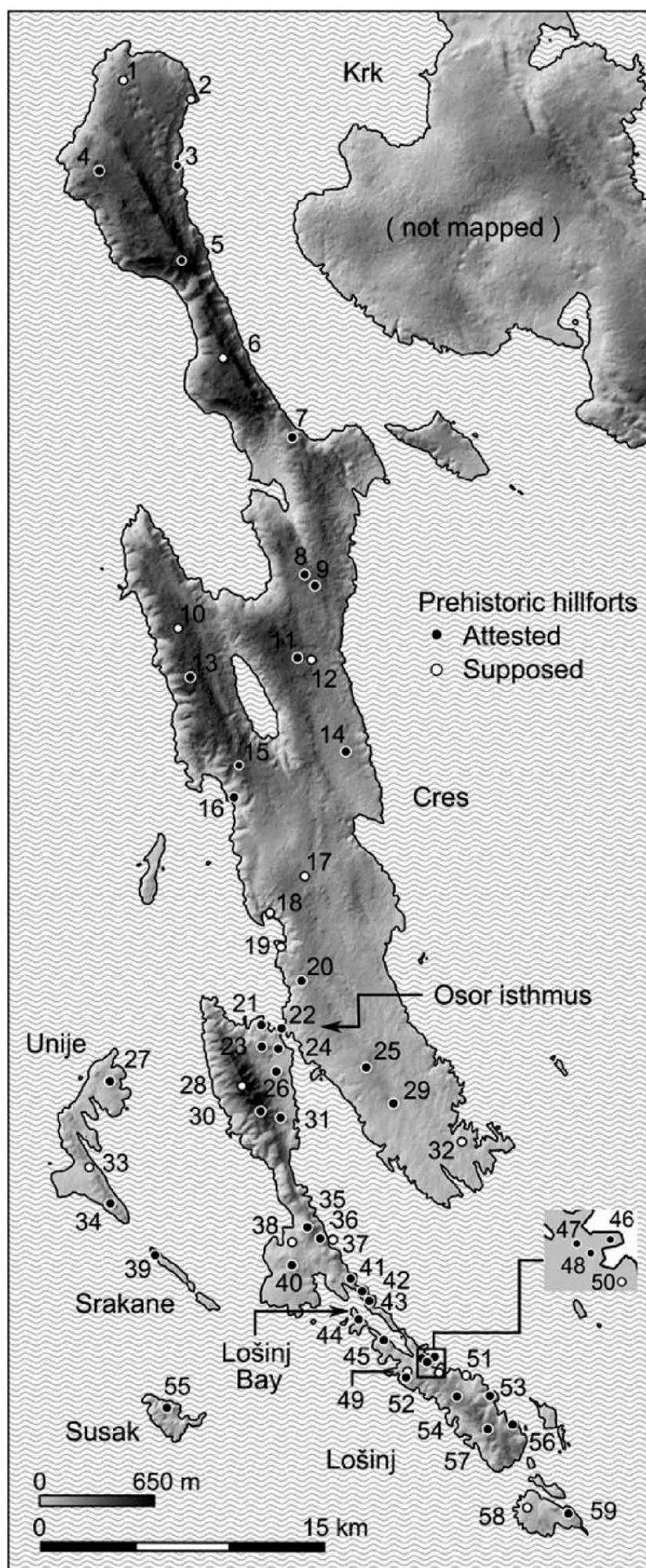


Figure 20. Carte de répartition des sites fortifiés sur l'île de Cres et de Lošinj (Čučković, 2017)

Ces sites fortifiés en hauteur ont également pu avoir un rôle de surveillance des voies maritimes (Čučković, 2017). En raison de leur taille, seul des populations très restreintes ont pu y habiter. En plus de ces constructions fortifiées, les territoires comportent un ensemble d'édifices en pierres sèches (*mrgàri*<sup>11</sup>) afin de délimiter des champs et des pâturages comme ceux découverts sur d'autres sites de Dalmatie et d'Istrie (Chapman, Shiel et Batović 1987 ; Sirovica 2015). À noter également que les populations commencent le défrichement des forêts de chêne autour de 1000 BC soit 3000 BP environ (Schmidt et al., 2001 ; Kranjc, 2009).

À l'âge du Fer (environ 900 – 178 BC soit 2850 – 2127 BP) une partie des *castellieri* sont désertés (Cardarelli, 1983). Les populations se rapprochent alors des sites côtiers comme c'est le cas également notamment de Osor qui devient un véritable pôle maritime. Quelques vestiges de l'âge du Fer sont découverts dans le village de l'actuel Osor dont des objets en ambre, du matériel militaire, et des seaux en Bronze (situles) qui témoignent du développement d'un centre commercial et politique local (Blečić-Kavur, 2015). Sur les autres sites, les découvertes de l'âge du Fer sont relativement faibles.

Il faut attendre environ 300 BC (2250 BP) pour que les premières colonies illyriennes (Grecs) soient fondées en Croatie sur les îles de Hvar et de Vis (Adriatique centrale) et sur le littoral à Epidauron (= Cavlat, près de Dubrovnik) (Kirigin, 2006 ; Ilkić et al., 2017). Bien qu'aucune colonie grecques ne se soit réellement implantée en Adriatique Nord y compris sur l'île de Cres, leur présence au sein des populations autochtones pour le commerce et la navigation est largement admise. L'implantation des Grecs va permettre le développement de la polyculture dont la vigne et l'olivier. Cette période est également caractérisée par une extension des pâturages et du défrichement (Nicod, 2003).

### I.4.3 Époque romaine

Dès le III<sup>ème</sup> siècle avant J.-C, ont lieu sur la côte Adriatique les premiers contacts avec Rome. Ces contacts s'accompagnent de l'implantation de quelques colonies romaines notamment à Pula, Poreč, Split, Zadar et Čitluk. Un grand nombre de vestiges archéologiques de l'époque romaine dont des carrières, étangs à poisson, citernes, ports antiques, structures religieuses, pressoirs à huile et vin sont découverts le long de la côte (Fouache et al., 2003 ;

---

<sup>11</sup> Édifices utilisés pour regrouper les troupeaux à certaines périodes de l'année (tonte, traite, soins, etc.).

**Essert et al., 2018 ; Čaušević-Bully, 2013 et 2014 ; Machut et al., 2020 ; Kopáčková, 2020).**

En Istrie, le début de la colonisation romaine démarre en 178 BC par la fondation de la colonie romaine de Pula. C'est sous la domination romaine qu'une organisation du territoire s'instaure, elle restera en place jusqu'à l'époque Byzantine. Cette organisation apparaît dans les paysages istriens et insulaires par l'instauration de centuriations<sup>12</sup> et la construction de plusieurs *Villae* maritimes (**Nicod, 2003**). La province Dalmate ne se met en place que sous le règne d'Auguste. La province romaine perdure jusqu'au VI<sup>ème</sup> siècle après J.-C.

La côte Adriatique est ponctuée de cités où se développent les installations économiques qui participent au développement des cultures et des différentes productions comme par exemple :

- l'île de Unije qui est incluse dans le système économique et romain à la suite de la visite du consul G.S Tuditan en Liburnie en 129 BC permettant par la suite le développement de l'agriculture intensive sur l'île (oliveraies, vignes et cultures de céréales, **Magaš et al., 2006**).

- le site de Loron en Istrie comprend une vaste *Villa* maritime et un grand atelier de production d'amphores à huile fondé ex. *nihilo* vers 10 après J.C par le sénateur Sisenna Statilius Taurus (Consul en 16 après J.-C.). La *Villa* de Santa Marina était un grand complexe résidentiel en bord de mer (5000 m<sup>2</sup>) comprenant d'importants bâtiments de services et d'une grande huilerie. Les recherches menées sur la *Villae* ne sont pas terminées et les fouilles futures cibleront notamment l'équipement oléicole (**Baldini et al., 1995 ; Carre et al., 2018 ; Machut et al., 2020**).

- sur l'île de Lastovo (Dalmatie du Sud), les découvertes archéologiques menées sur plusieurs sites dans les années 1970 (e.g. Ubli moderne) ont permis de démontrer l'existence d'une colonie rurale romaine menant des activités de production agricole dont l'exploitation de la vigne et de l'olivier. Une série d'unités architecturales dont plusieurs contenaient des restes de pressoirs à vin ou à huile d'olive ont été excavées. Des bâtiments interprétés comme un ensemble résidentiel étaient également juxtaposés (**Jeličić-Radonić, 2001**).

---

<sup>12</sup> Correspond à un schéma géométrique du plan d'une ville et d'un territoire agricole.

- le site de *Banjace*, dont les techniques de constructions sont radicalement différentes, a une architecture composée principalement de murs en pierre sèche (**Ožanić Roguljić, 2018**). Ces emplacements étaient liés à des communautés d'éleveurs et d'agriculteurs (**Katić, 2018**).

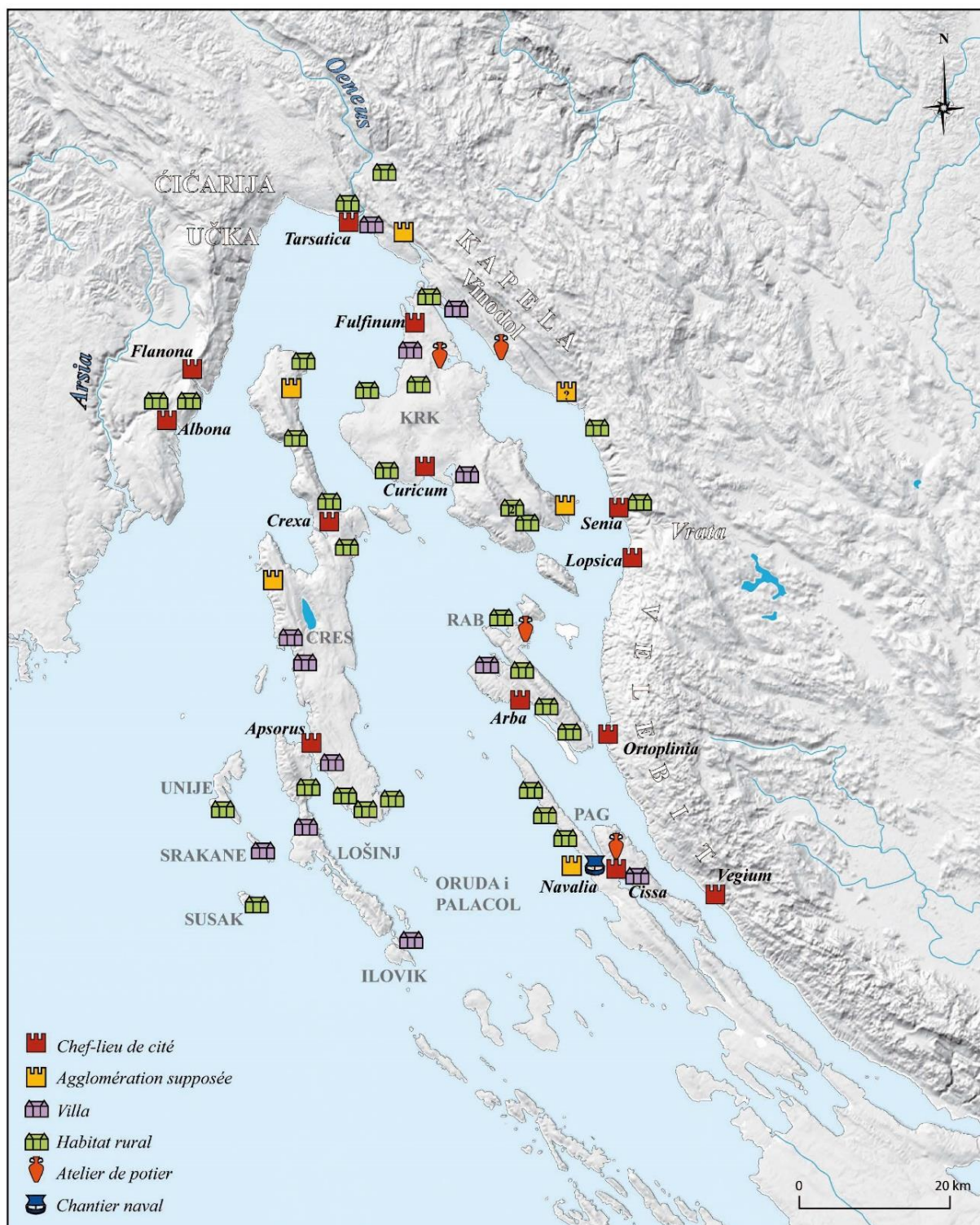


Figure 21. Carte des principaux sites ruraux sur l'archipel du Kvarner entre Ier et le IVème siècle après J.-C obtenu des travaux de thèse de Čaušević-Bully 2013

Pour l'archipel du Kvarner, ces îles sont intégrées officiellement dans la province dalmate au début du règne d'Auguste (27 avant J.-C.) bien que des liens forts préexistaient entre la population autochtone et le pouvoir romain dès le milieu du Ier siècle avant J.-C. Un grand nombre de sites ruraux datés de l'époque romaine témoignent d'une occupation insulaire intense (**Figure 21**). Ces sites insulaires semblent avoir suivi le même développement au Ier siècle après J.-C. que sur le reste de la côte (**Čaušević-Bully 2013**).

Dès le Ier siècle après J.-C., un accroissement des occupations romaines et de l'exploitation des ressources marines est attesté sur l'île de Rab par l'exhumation dans certaines habitations de grandes quantités de restes coquillés (**Welc et al., 2019 ; Skelaac et Radić Rossi, 2005 ; Rizner 2012 ; Jurković, 2012 ; Čaušević-Bully et Bully, 2015**). Les différentes études menées attestent d'un pic de développement de la ville de Rab dans la seconde partie du IIème et IIIème siècle après J.-C. (**Jurković, 2019**)

Pour l'île de Pag (site de Lun), la culture initiale des oliviers est liée au commerce prospère identifié à partir du Ier siècle après J.-C. lorsqu'une énorme quantité de produits manufacturés a été importée du Nord de l'Italie vers Salona et les petites villes et garnisons. Les traces archéologiques tendent à indiquer une agriculture soutenue de l'olivier jusqu'au IIème siècle après J.-C. lorsque la production provinciale était arrivée à maturité (**Kale, 2016**). Sur la même île, la baie de Caska tient également dès le début de l'empire romain une place importante dans l'économie romaine (**Boetto et al., 2015**). Sa position stratégique sur les axes maritimes, la fertilité des terres alentours et l'abondance de la faune marine ont largement contribué à son développement économique. Les vestiges d'un ancien port antique et de trois navires ont notamment été découverts (**Radic Rossi et Boetto, 2010, 2011 ; Boetto et Radic Rossi, 2012, 2014**). Ces navires ont d'ailleurs été construits à partir de plusieurs essences d'arbres dont le chêne, l'olivier, le sapin et du hêtre (**Boetto et al. 2015**).

Sur l'île de Brač (site de Bunje), des fouilles ont mis au jour pour l'Antiquité un bassin pour le stockage pour l'huile d'olive ou le vin ainsi que d'un moulin à olives (**Botte et al., 2016, 2019, 2020, 2022**).

Enfin pour l'île de Cres, quatre *castellieri* de l'âge du Bronze (situés à des points stratégiques) et la grotte de *Jama na Sredi* continuent d'être habités jusqu'au Moyen Âge (**Mirosavljević, 1959 ; Čučković, 2017, Figure 22 et 23**). Pour les populations des îles du

Kvarner, l'élevage d'ovins a toujours été d'une grande importance (Pavić, 1997). Certains oppida maritimes (Osor, Krk et Rab pour l'archipel du Kvarner) deviennent à l'époque romaine des centres urbains où l'agriculture et l'élevage traditionnels deviennent la base des moyens de subsistance. Osor (Asporu) et Cres (Crexi) sont les seules à devenir des municipes romain – chef-lieux de cités.

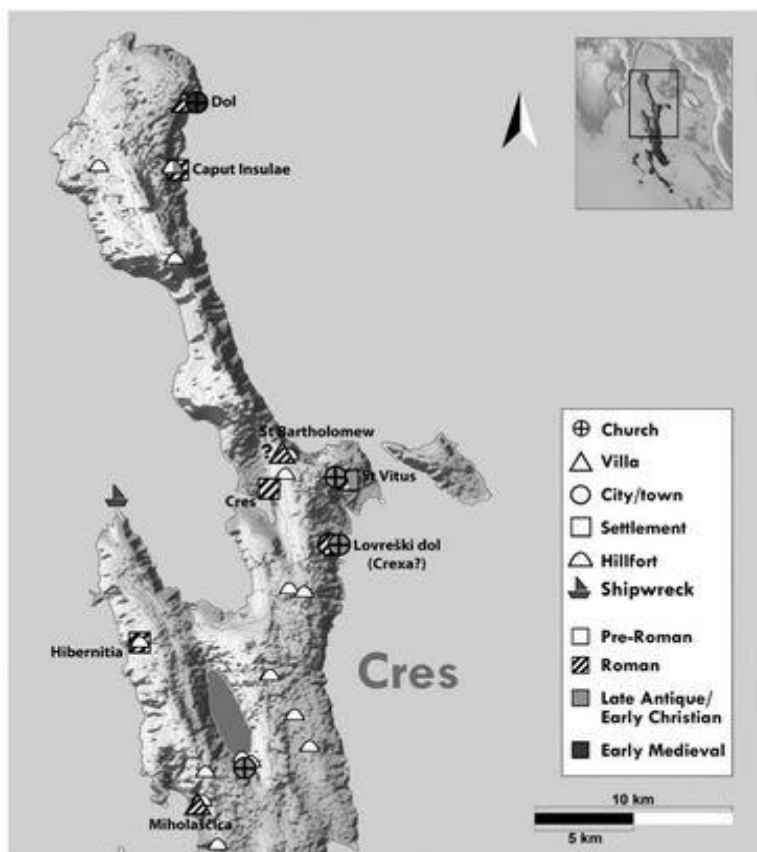


Figure 23. Répartition des sites occupés au nord de l'île de Cres de l'Antiquité au début du Moyen Âge (Jurković, 2019)

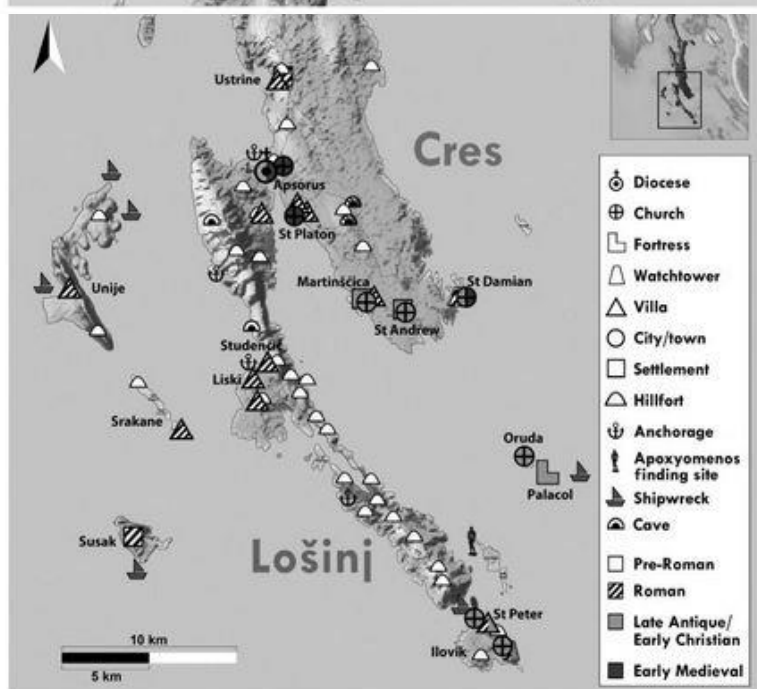
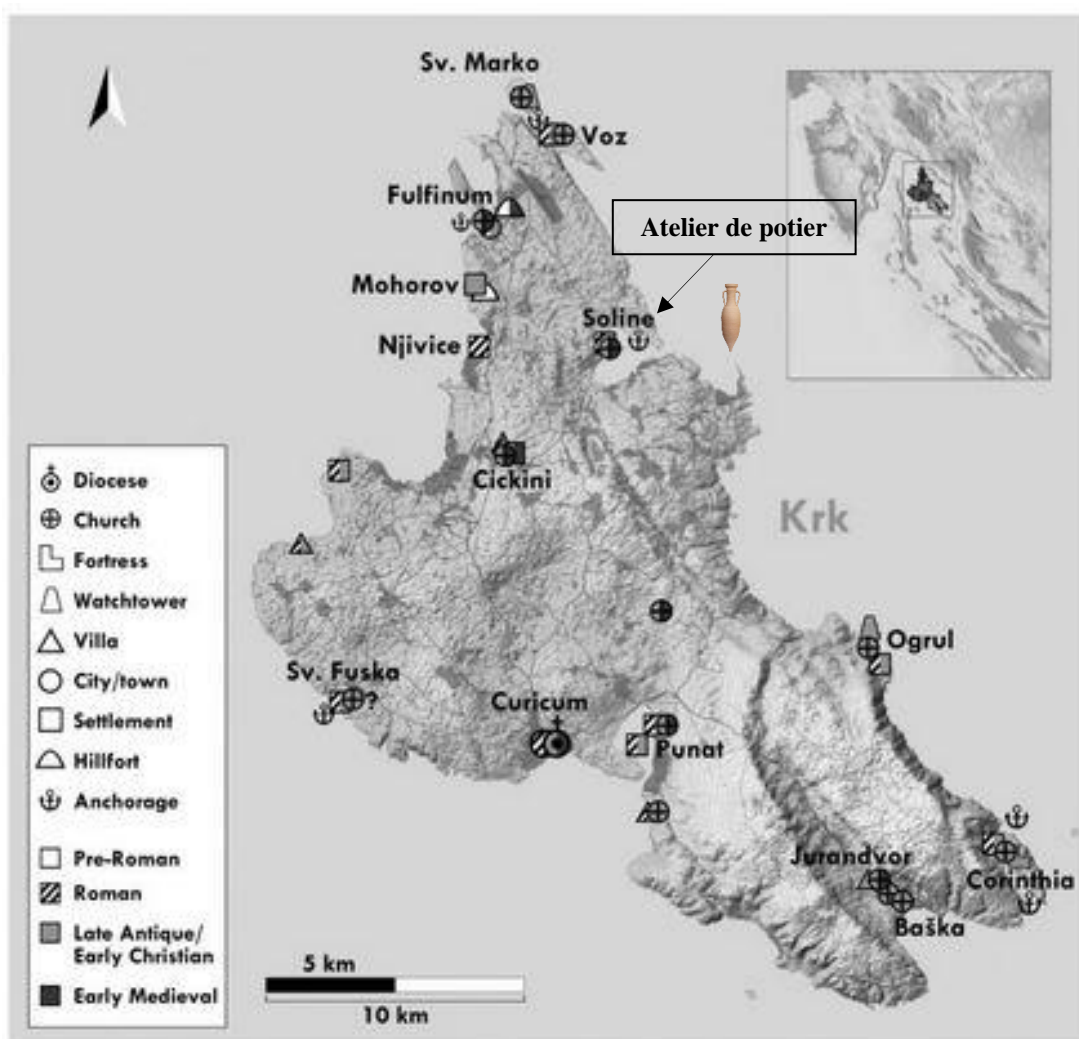


Figure 23. Répartition des sites occupés au sud de l'île de Cres de l'Antiquité au début du Moyen Âge (Jurković, 2019)



Certains chefs-lieux de l'île de Krk semblent avoir quant à eux évolués différemment des autres des îles de la baie en raison de leur faible distance au continent qui les rendent plus vulnérables aux événements politiques. Plusieurs sites romains sont visibles le long de la côte (Njivice, Soline, Ogrul, etc) et au centre des terres de l'île (Cickini ; **Figure 24**). À l'époque romaine, les sites d'Omišalj (*Fulfinum*) au nord et de Krk (*Curicum*) au sud sont les deux seules chefs-lieux de cités (villes). Bien que tous deux se développent les siècles suivants, *Fulfinum* est abandonné à la fin de l'Antiquité tardive entre le Vème et VIIème siècle après J.-C. (**Čaušević-Bully et Valent, 2015**). Les recherches menées ces dernières années ont permis de mettre en évidence des productions locales à l'époque romaine d'amphores (atelier de potier près de Soline ; **Figure 24**) et d'activités d'oléiculture. Dans une ancienne structure chrétienne près d'Omišalj sur le site de Mirine, un bassin de décantation pour l'huile a été excavé (**Čaušević-Bully et al., 2019 ; Kopáčková, 2020**).



*Figure 24. Répartition des sites occupés sur l'île de Krk de l'Antiquité au début du moyen-âge (Jurković, 2019)*



Figure 25. Carte des axes maritimes principaux et secondaires reliant l'archipel du Kvarner au continent à l'Antiquité (Travaux de thèse de Čaušević-Bully, 2013)

Dès le II<sup>ème</sup> siècle après J.-C, une réorganisation du territoire a lieu. Le Kvarner se retrouve au centre d'un large trafic maritime où de nombreuses voies maritimes principales et secondaires le relient au continent (**Figure 25**). Un important commerce se développe autour du vin, de l'huile d'olive, etc. Les fouilles menées sur différents sites portuaires antiques de l'Adriatique dont celui de Pula, de Zaton près de Nin (III<sup>ème</sup> siècle après J.-C.), de la baie de Caska (île de Pag, I et II<sup>ème</sup> siècle après J.-C.), ou encore celui de la baie de Verige (*Veli Brijuni*, V<sup>ème</sup> siècle après J.-C.) démontrent une uniformité de l'alimentation (**Šoštarić et Kuster, 2001 ; Glušćević et al., 2006 ; Krajačić, 2009 ; Essert et al., 2018**). Le régime alimentaire était composé principalement d'huile d'olive, de vin, de produits et sauces à base de poisson, de fruits (e.g. figues notamment), de légumes, de céréales et d'autres produits (ex. pin – *Pinus pinea*). L'ensemble de ces aliments était transporté dans des amphores dans toute la région méditerranéenne et probablement consommé par les populations locales. Dans le dernier quart du II<sup>ème</sup> et la première moitié du III<sup>ème</sup> après J.-C., ont eu lieu la distribution des aliments en Liburnie. Puis, la fin du II<sup>ème</sup> siècle – III<sup>ème</sup> siècle après J.-C., est marquée par la mise en place d'une nouvelle voirie qui accompagne une nouvelle dynamique régionale.

La période suivante (III<sup>ème</sup> siècle après J.-C. et jusqu'à la première partie du VI<sup>ème</sup> siècle après J.-C.) connaît une croissance remarquable. Les données archéologiques et épigraphiques régionales montrent notamment une intensification de l'occurrence des *Villae*. À partir de la fin du IV<sup>ème</sup> siècle après J.-C., ce n'est pas moins de 75 lieux de cultes chrétiens qui sont comptabilisés dans la région, témoins d'un peuplement dynamique (**Čaušević-Bully et al., 2012**).

Au VI<sup>ème</sup> siècle après J.-C, les cultures dans le bassin méditerranéen sont brusquement abandonnées ce qui entraîne un regain généralisé des espaces forestiers (**Pons, 1984**). Ces changements sont en lien avec les transformations politiques, économiques et sociales de l'Antiquité tardive. En effet, jusqu'à probablement le milieu du VI<sup>ème</sup>, la région du Kvarner est sous le contrôle Ostrogothique (**Čaušević-Bully, 2013**). Cependant, les Ostrogoths n'ont pas gardé très longtemps le nord de l'Adriatique. Ils perdent définitivement cette région au plus tard vers 552 lorsque Totila, le dernier roi des Ostrogoths fut vaincu (**Čaušević-Bully, 2013**). La région du Kvarner est alors reprise par l'empereur Justinien et passe sous le pouvoir Byzantin (Ravenne). La région restera alors marquée sur bien des aspects par les vingt années environ de guerres gothiques (**Goldstein, 2005**).

#### I.4.4 Moyen Âge

Dès le Vème après J.-C., ont lieu de nombreux mouvements de population notamment de Goths, Avars et de Slaves au début du VIIème après J.-C (Nicod, 2003). Cependant, les îles du nord de l'Adriatique semblent très peu affectées par ces incursions par rapport à celles du centre de la Dalmatie (Jurković, 2019). Le Moyen Âge débute en Croatie à la fin du VIIIème siècle après J.-C. lors de la confrontation entre l'empire Byzantin et l'empire Carolingien (Negrelli, 2009 ; Štih, 2010 ; Jurković, 2019). En 812 AD, le traité d'Aix-la-chapelle officialise le partage des territoires entre l'Occident, les Carolingiens et Byzance. Les villes côtières (Split, Dubrovnik, Kotor, Zadar et Trogir) et les îles (Krk, Rab, Cres) sont alors officiellement placées sous le pouvoir byzantin.

Les siècles suivants enregistrent une hausse des défrichements dans les karsts balkaniques qui entraîne une augmentation de l'érosion des pentes et des dépôts dans les cavités. Les déboisements sont particulièrement menés à proximité immédiate des *poljés* ce qui provoque le comblement de leurs *ponors* (Kranjc 1979 et 1981). L'écobuage ou brulis pastoraux étaient les pratiques les plus utilisées (e.g. pour la Slovénie : grotte Rupa I près de la vallée Savinja et cavité *Babja jama* près de Most na Soči).

L'époque médiévale est marquée par un ralentissement de l'agriculture et par une faible densité de la population (Coralic et Novosel, 2014). En cause, l'expansion des maladies dont la malaria (paludisme) qui incite les populations à prendre certaines mesures, par exemple le comblement vers la fin du Moyen Âge des zones humides autour de la cité d'Osor afin de limiter la propagation des épidémies (Draganits, 2019).

À partir du XIème siècle après J.-C., la République de Venise réussit en partie à établir une règle sur ces terres (Boric, 2002 ; Brusic, 2015). L'administration met alors en place une relation féodale et débute la subdivision systématique des murs en pierres sèches de la région du Kvarner. Cette organisation permet notamment de faciliter les pratiques agricoles, de se protéger de la *Bura* ainsi que d'aider à la passation d'héritage.

La féodalisation de l'île de Cres s'achève au XIIème siècle après J.-C., elle entraîne la construction d'un certain nombre de chapelles réparties dans chaque domaine féodale (Protić, 2014 et 2015). Un domaine féodal sur l'île comprenant toujours au minimum une chapelle, des

bâtiments résidentiels (appelés également complexes architecturaux) et agricoles, des vignobles, des zones cultivées, des forêts et des pâturages. Une « maison de campagne<sup>13</sup> » destinée aux séjours occasionnels du propriétaire du domaine était également toujours présente. Des habitations de bergers complétaient l'organisation du territoire. Jusqu'alors utilisées saisonnièrement, elles se transformèrent progressivement en résidences permanentes.

Au XIII<sup>ème</sup> siècle, sous la domination de Venise, les populations du littoral mais aussi des îles cherchent à augmenter le rendement des productions de céréales, d'huile d'olive et de vin (Nicod, 2003). Les îles de Krk, Rab et Cres doivent désormais payer les taxes (tributum) au doge de Venise, avant cela, elles les payaient au roi croate comme un ordre au nom de l'empereur byzantin (Basilius, 867-886 ; Vežić & Josipović, 2020). Dès 1018, l'île de Krk paie ainsi avec 30 peaux de "kuna" (hermine), Cres avec 15 peaux, Osor avec 40 peaux et Rab paie 10 avec livres de soie (Vežić & Josipović, 2020).

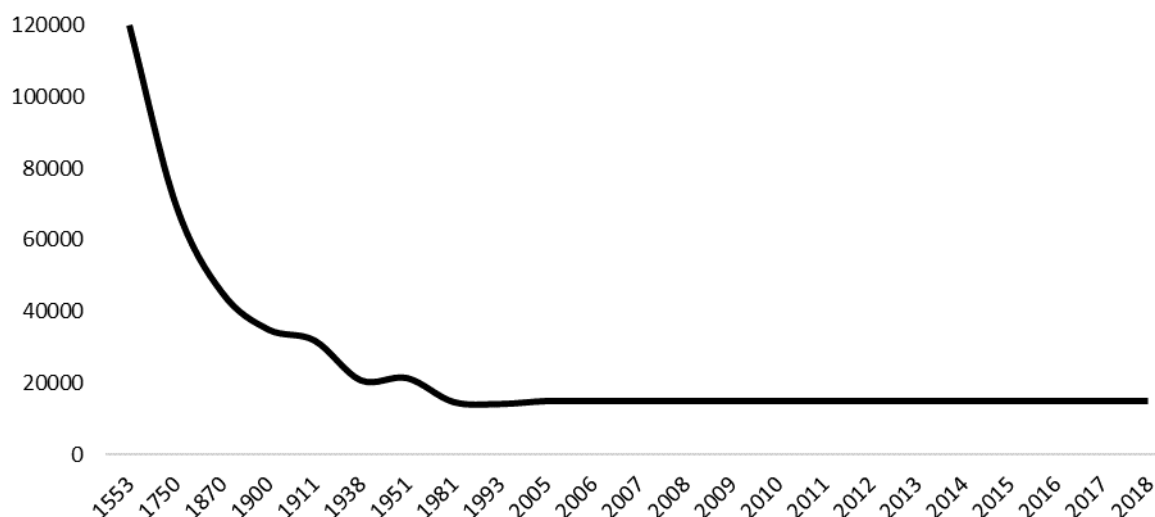


Figure 26. Évolution du nombre de moutons répertoriés sur l'île de Cres d'après les données de la chambre d'agriculture Croate (HCS)

La première preuve écrite d'un commerce d'agneaux entre Venise et l'île de Cres est datée du 2 Janvier 1513. Un document du 10 Novembre 1519, relate que de nouvelles taxes sur les moutons et les agneaux sont mises en place. Des mesures contestés par les communautés d'éleveurs dont souligne Pavić (1997) « *The community should protest, represented by appropriate man who speaks fluently, because of the new tax on lambs shipped and sold in*

<sup>13</sup> Palac en Croatie

*Venise* ». Il est également stipuler qu'une forte mortalité touche les agneaux « *Elected in four-member council to take care of spreading terrible disease among lambs, that threatens by destroying the households, and by, that also the incomes from pastures by what taxes to the Republic are paid* ». Grâce à la chambre d'agriculture Croate (HCS), des relevés du nombre de troupeaux et de moutons sur l'île de Cres sont disponibles depuis le milieu du XVI<sup>ème</sup> siècle après J.-C. (**Figure 26**). Ainsi, depuis 1553, le nombre de moutons sur l'île ne cesse de décroître en passant de 120 000 à seulement 15 000 moutons en 1981.

La fin du Moyen Âge sur l'archipel du Kvarner (XV<sup>ème</sup> siècle après J.-C.), est marquée par la chute importante de sa population causée par une épidémie de peste. L'apparition du premier cas sur l'île de Cres est enregistrée en 1348 AD (**Cabanes, 2016**).

#### I.4.5 Époque moderne et contemporaine

Au XVI<sup>ème</sup> siècle, la guerre de Turquie entraîne de nouvelles migrations de réfugiés en Croatie. Cette période correspond à la construction sur l'île de Cres de nombreuses habitations de bergers afin d'accueillir les nouveaux fermiers. Dans le même laps de temps et ce jusqu'au XVIII<sup>ème</sup> siècle, sont aménagées un ensemble de terrasses pour les cultures (**Kremenčić et al., 2021**).

Les premières données recueillies sur l'évolution des populations de l'archipel du Kvarner datent du milieu XIX<sup>ème</sup> siècle. (**Figure 27**). Début 1800, l'épidémie de choléra provoque une nouvelle diminution de la population. Entre 1850 et 1950, la population des îles du Kvarner augmente de nouveau fortement (**Lončarić et al., 2011**) et entraîne le regain des activités pastorales (e.g. augmentation du nombre de troupeaux et de moutons) et de l'activité économique autour de la laine, du fromage, du lait et de la viande. Dès la seconde moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle, les activités agricoles se spécialisent et permettent, grâce à la culture de l'olivier, de compenser la grave crise viticole du début du XX<sup>ème</sup> siècle.

Dès la fin de la seconde guerre mondiale, l'île de Cres est intégrée au territoire Yougoslave, les familles ont alors peu à peu abandonné les habitations. La pression agropastorale sur les terres a diminué. L'élevage de moutons est alors devenu une source minoritaire de l'activité économique. Enfin, une seconde reforestation de l'île de Cres

vraisemblablement de pins noirs (comme sur l'île de Rab) a été menée (Thomas, 1978 ; Kranjc, 2009).

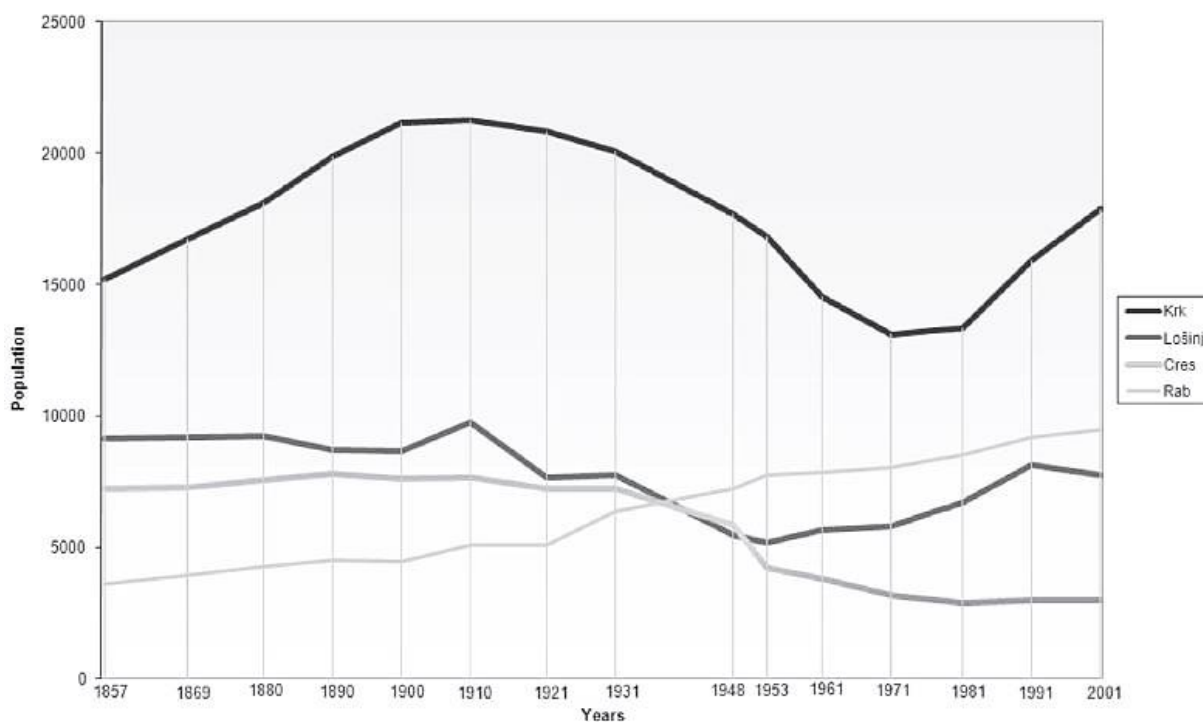


Figure 27. Evolution de la population de 1857 à 2001 pour les îles de Cres, Krk, Rab et Lošinj.





## II. : Méthodes



*Vignoble d'après mélodie.rousseau©*

## **II.1 Partie 1 : Reconstruction des paléoenvironnements**

### **II.1.1 Approche multi-paramètre et impact sur l'environnement**

Une approche dite multi-paramètre a été menée sur les sédiments lacustres afin de d'obtenir une réponse univoque de l'interprétation des données. L'anthropisation du milieu est multifactorielle (climatique, politique, écologique, etc.) et peut jouer plus ou moins fortement sur l'érosion des sols. L'utilisation d'un ensemble d'analyses complémentaires permet ainsi d'obtenir des données les plus justes possible concernant l'évolution des différents compartiments composant le système (e.g. bassin versant, bassin hydrique).

L'impact des pratiques agricoles se traduit de nombreuses manières dans l'environnement : l'impact environnementale lié aux cultures, l'impact des troupeaux sur les sols et la végétation ainsi que l'impact paysager (parcellaire agricole) (**Harfouche R., 2005**).

L'étude des relations de l'homme avec son environnement nécessite de croiser un ensemble de faisceaux sédimentaires géochimiques et paléobotaniques. Dans les sédiments lacustres, les activités agropastorales peuvent être retracer à l'aide de l'analyse combinée :

1/ *Des flux sédimentaires*. La pression pastorale entraîne en effet l'augmentation de l'érosion des sols (**David et al., 2014 ; Figure 28**).

En l'absence de toute activité humaine et d'espaces forestiers, l'environnement est soumis principalement aux actions du climat. Ainsi, lorsque le climat est sec, l'érosion dans le bassin versant est peu intense. Les particules détritiques formées seront alors exclusivement des sédiments fins (carbonates lacustres).

Si le climat devient plus humide, les pluies et autres évènements météorologiques draineront les pentes et entraîneront avec elles dans les réservoirs lacustres des particules détritiques plus grossières.

Dans le cas maintenant de la présence d'un couvert forestier, la végétation va maintenir les sols en place limitant ainsi l'érosion. À l'inverse, l'agriculture et l'élevage où le piétinement, les labours, les terrassements, etc. qui sont récurrents favorisent la formation de particules détritiques argileuses sur les pentes du bassin versant.

Enfin, la distinction des flux sédimentaires détritiques peut être rendue parfois compliquée par la présence de flux dit authigéniques (ex. formation de carbonates authigéniques par la productivité primaire).

2/ *De leur composition chimique.* En effet, certaines activités humaines peuvent entraîner des pollutions et perturbations diverses dans le bassin versant (Davies et al., 2015 ; Arnaud et al., 2012 ; Simonneau et al., 2013) : le transport et les exploitations minières (e.g. plomb, cuivre, etc.), l'agriculture (e.g. apports de fertilisants, naturels et/ou artificiels, qui peuvent mener à terme à un changement d'état trophique des milieux aquatiques) ;

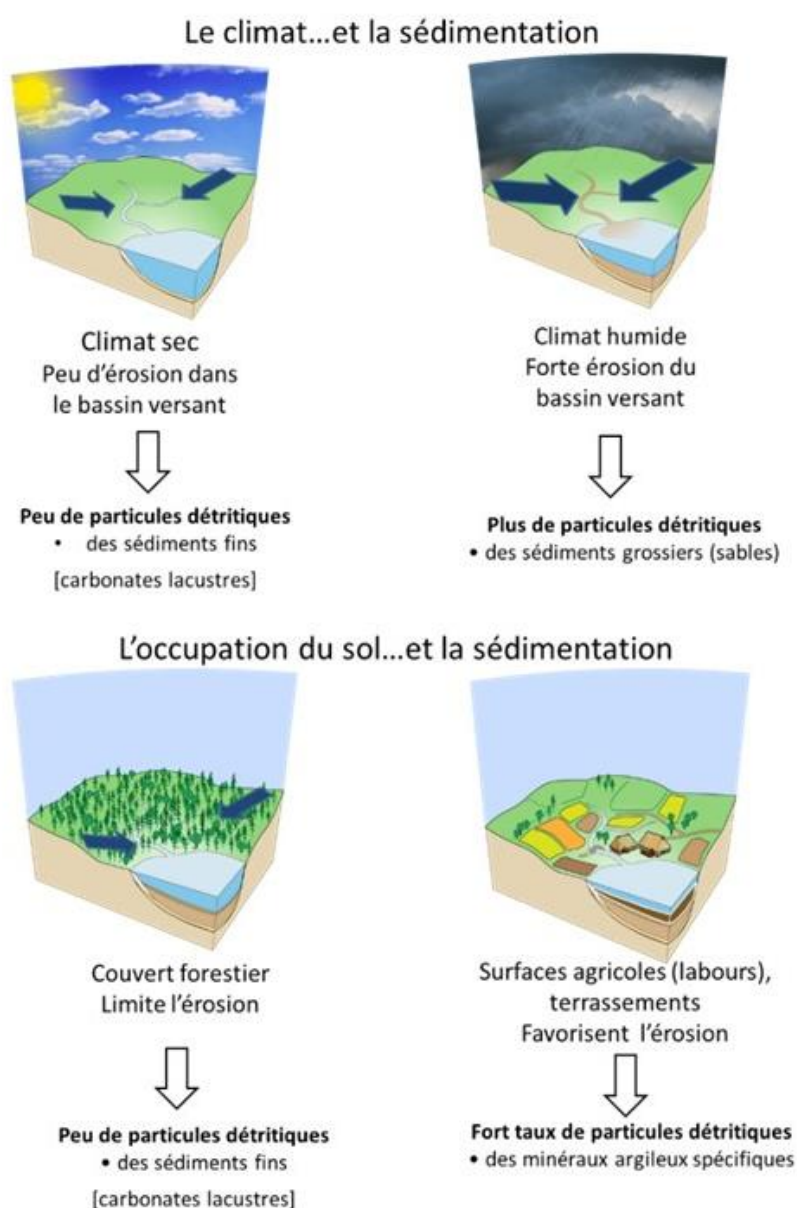


Figure 28. Les différents types de sédimentation suivant différents contextes climatiques, de couverture végétale et d'anthropisation. Illustration de Bichet. V.

3/ *De la composition floristique.* L'une des premières activités menées par l'homme est le défrichage. La chute des proportions de pollens d'arbres (e.g. chêne) en faveur des herbacées héliophiles\* et essences pionnières de milieux ouverts (e.g. genévrier, noisetier, bouleau, etc.) peut être un bon indicateur. Dans l'analyse pollinique, l'utilisation du rapport AP/NAP (pollen d'arbres et arbustes sur la somme de pollens non-arboréens) peut être utilisé pour mieux discerner les changements. Cependant, il est important de nuancer car ces changements peuvent être une réponse possible de la végétation aux aléas climatiques et/ou aux incendies d'origine naturelle.

La variation des proportions de certains pollens d'arbres et arbustes peut être également reliée à une exploitation faite par l'homme. C'est le cas notamment pour les pollens de certains arbres fruitiers (figuier, citronnier, olivier, châtaignier, noyer, etc.) et arbustes (vigne, parfois genévrier) notamment sur le pourtour méditerranéen ([Amouretti et Brun, 1993](#) ; [Conedera et al., 2004](#) ; [Jouffroy-Bapicot et al., 2016](#) ; [Poljak et al., 2016](#) ; [Kopáčková et al., 2020](#)).

4/ *Des « indicateurs polliniques d'anthropisation (IPA) »* signant la présence de l'homme et de son impact. Plusieurs inventaires ont été menés depuis de nombreuses années ([Behre, 1981 et 1988](#) ; [Richard, 1983 et 1997b](#) ; [Gaillard, 1984](#) ; [Barbier et al., 2001](#) ; [Gauthier, 2001a](#) ; [Galop et al., 2003](#) ; [Brun, 2007](#) ; [Jouffroy-Bapicot, 2010](#) ; [Gauthier et al., 2011](#) ; [Gauthier et al., 2012](#) ; [Murgia, 2016](#)). Les pollens appartenant aux IPA peuvent varier suivant la période étudiée et la localisation du site d'étude (ex. les cannabacées peuvent refléter la culture de chanvre en particulier au Moyen Âge). Ils regroupent ainsi les plantes introduites par l'homme dites cultivées (e.g. céréales), ainsi que les espèces natives se développant à la suite de la présence de l'homme comprenant les rudérales (oseille, armoise, plantains, etc.) et les plantes adventices et messicoles (coquelicot, bleuet, etc.). La présence d'un unique IPA n'est toutefois pas suffisante pour confirmer le développement d'activités humaines à l'échelle locale ou régionale.

5/ *Des microfossiles non-polliniques* d'une grande diversité peuvent permettre de caractériser certains contextes sédimentaires (tourbe et lacustre) et/ou archéologiques ([Van Geel et al., 1980, 1983a, 1983b, 1986, 1989](#) ; [Pals et al., 1980](#) ; [Van der Wiel, 1983](#) ; [Garneau, 1987](#) ; [Cugny, 2011](#) ; [Gauthier et Jouffroy-Bapicot, 2021](#)). Plus spécifiquement, les spores de champignons coprophiles telles que *Sporormiella* (*HdV-113*) ou *Sordaria* (*HdV-55*) peuvent être utilisées comme des indicateurs de la présence de grands herbivores à

proximité immédiate des sites d'études (bovins, caprins, ovins, etc...) pouvant ainsi refléter d'éventuelles pratiques d'activités pastorales dans le bassin versant (**Raper & Bush, 2009 ; Etienne et al., 2013**). Attention cependant, parfois la présence de troupeaux de faune sauvage peut être identifiée par ces mêmes spores (**Davis et al., 2006 ; Wood et al., 2011**).

En conclusion, ces cinq indicateurs pris séparément ne peuvent justifier de la présence d'activités humaines dans le bassin versant à une période donnée. Il est ainsi essentiel de recouper les résultats entre eux afin d'être au plus proche de la réalité de l'environnement à une époque donnée.

Les sites d'études choisis dans le cadre de ce projet de thèse, ont été sélectionnés en raison de leur proximité aux sites archéologiques. Le but était d'obtenir un signal d'anthropisation bien distinct dans la sédimentation lacustre. La dimension des bassins hydrographiques et versants des lacs a également été un critère pour leur sélection. En effet, leur taille peut largement influencer leur réponse face aux changements du climat et/ou anthropiques (échelle locale vs. régionale). Le choix a donc été fait de carotter des systèmes lacustres de taille très variables afin de capter différentes réponses sédimentaires.

### **II.1.2 Technique de carottage**

Les séquences sédimentaires profondes ont été prélevées en utilisant une plateforme légère de forage et un carottier à piston UWITEC (**Figure 29**). Ce type de matériel permet de prélever des carottes non perturbées d'une longueur maximale de 20 m par tronçons successifs de 3 m. Afin d'éviter un gap dans l'enregistrement sédimentaire entre deux tronçons, un second carottage est effectué à environ un mètre d'écart du premier site de prélèvement. Cette seconde série de carottes est échantillonnée avec un décalage vertical d'environ un mètre permettant d'assurer un recouvrement complet et éviter ainsi les possibles problèmes d'enregistrement dus au passage des différents tronçons de carotte. Les tronçons de 3 m sont ensuite coupés en deux à trois parties de longueurs égales.

Un carottier à piston est composé d'un tube en acier terminé dans notre cas par un « *core catcher métallique* » qui bloquera le sédiment à la base de la carotte lors de l'arrachement du carottier et de sa remontée à la surface. Le carottier est connecté avec 3 câbles et un treuil à une tour à trois pieds, située sur la barge de forage : un câble assure sa descente, un actionne le

piston et le troisième le marteau. Un tube en PVC qui reçoit la carotte de sédiment est placé dans le tube en acier. La chemise PVC a un diamètre de 63 mm. L'ensemble du dispositif est descendu jusqu'à l'interface eau/sédiment. Le piston est verrouillé jusqu'à la cote de début de forage. Il permet la pénétration de l'échantillon durant la phase de fonçage et bloque la chute de la carotte lors de la remontée. Un poids couissant (ou marteau), par à-coups répétés permet la pénétration de la tête du carottier et ainsi des sédiments dans le tube PVC. Le câble relié au carottier est mesuré afin de suivre l'enfoncement du tube carottier dans le sédiment. Après 3 mètres d'enfoncement, le matériel est remonté en surface. L'opération est répétée jusqu'à la profondeur désirée.

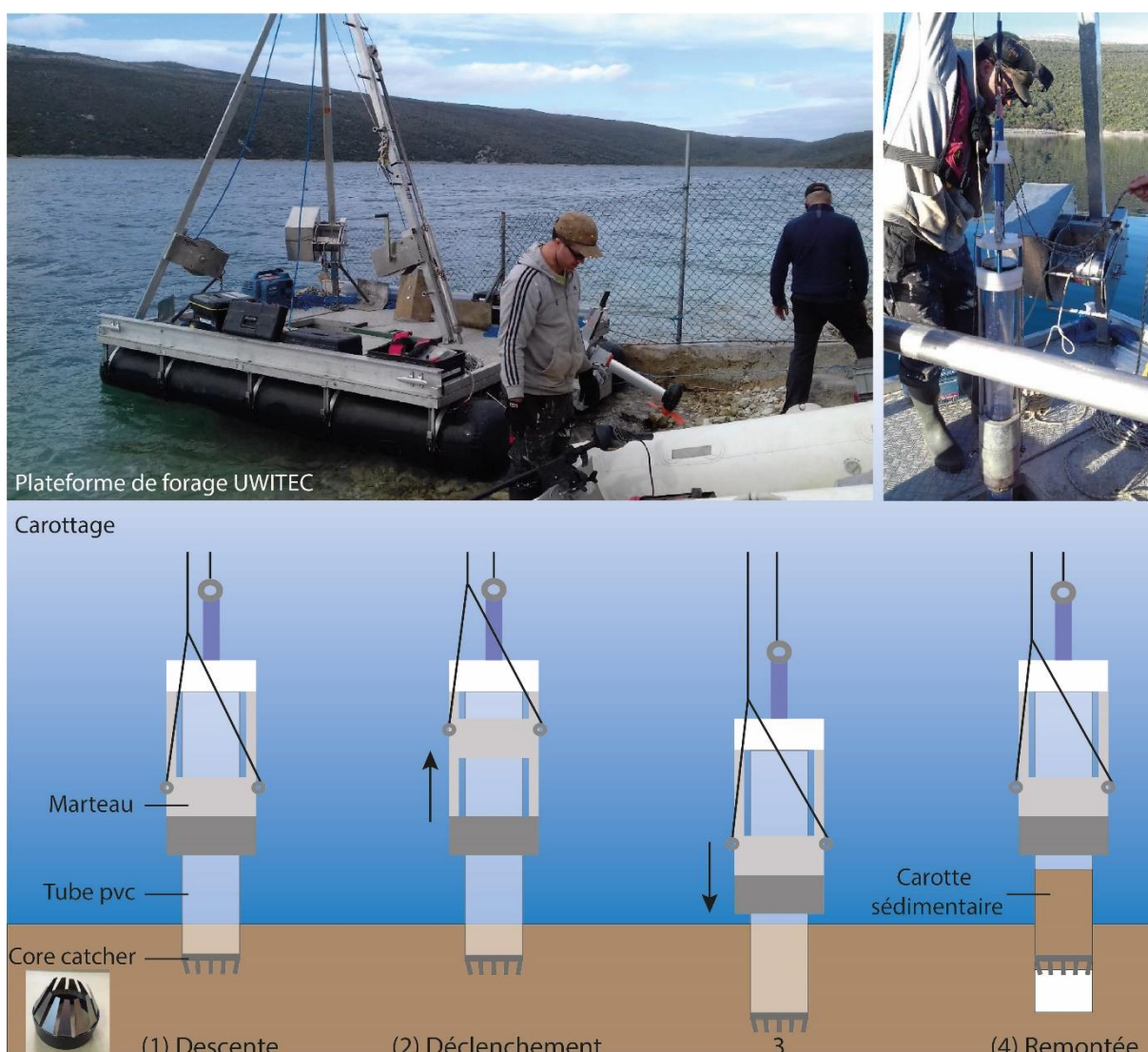


Figure 29. Matériel et étapes de prélèvement des carottes sédimentaires

Les carottes courtes ou d'interface (inf. à 1 m) ont été échantillonnées à l'aide d'un carottier gravitaire UWITEC. Le carottier et le tube PVC d'un diamètre de 90 mm sont enfoncés

dans le sédiment meuble sous l'action de la gravité puis retiré. La carotte renferme l'interface eau/sédiment. Elle est ensuite fermée des deux côtés par des bouchons.

Les carottes sont ensuite conditionnées et stockées en chambre froide en laboratoire. L'ensemble des séquences prélevées lors des missions de 2016 et 2018 du projet IATEKA sont résumées sur le **Tableau 1**. Neuf carottes courtes et cinq longues ont été prélevées.

### II.1.3 Carotte composite

Au laboratoire, les différentes carottes ont été coupées et ouvertes longitudinalement. Chaque moitié est séparée au moyen d'une plaque de cuivre. Une demi-section est archivée et l'autre utilisée pour une description détaillée.

La première étape d'une étude paléolimnologique est la description visuelle, la prise de photographies puis l'analyse non-destructive des carottes sédimentaires. Le sédiment est recouvert d'une fine feuille de plastique et placé sur un banc de diagraphie géophysique Geotek® afin d'obtenir la densité du sédiment humide par densitométrie gamma, la susceptibilité magnétique et l'analyse spectrale de la couleur des sédiments. Une estimation semi-quantitative de la composition chimique des sédiments a été ensuite réalisée avec un banc de diagraphie XRF Avaatech au laboratoire EDYTEM (Chambéry, France).

Bien que l'on connaisse approximativement la position de chaque tronçon, il est essentiel de les corrélérer précisément entre eux afin d'établir une « série composite » continue. Ces corrélations ont été réalisées:

1. visuellement grâce à la description de niveaux repères (laminations, changements de couleurs ou de granulométrie, etc.) ;
2. avec les données des analyses non-destructives : susceptibilité magnétique, XRF et paramètres de couleur du sédiment ( $L^*a^*b^*$  CIE).

Les « sauts » entre chaque tronçon ont été minimisés et les carottes présentant une dilatation du signal plus importante ont été privilégiées.

### II.1.4 Stratégie d'échantillonnage

La seconde étape est le choix d'une stratégie d'échantillonnage suivant la résolution souhaitée. L'objectif du projet IATEKA était d'obtenir une haute résolution sur les 9000 dern-

Lacs	Nom carotte	Cote de l'interface Eau/Sed (m)	Section (cm)	Diamètre liner PVC (mm)	Matériel de carottage	Date	Coordonnées GPS		Site Archéologique proche	Altitude (m a.s.l)	Analyses réalisées
							Lat.	Long.			
Vrana (VRA_2018)	VRA_2018_P	58	141	Ø 90 mm	Plateforme UWITEC, carottier à piston et gravitaire	31/10/18	44°51'18.20" N	14°23'09.66" E		13	MSCL, XRF, Pollen & MNP, Macrocharbon, Isotopie (C & N), Perte au Feu, <sup>14</sup> C, <sup>137</sup> Cs, <sup>241</sup> Am, <sup>210</sup> Pb
	VRA_2018_P3		102,5								
	VRA_2018_1A		260.5	Ø 63 mm							
	VRA_2018_2A		273.2								
	VRA_2018_1B		288.3								
	VRA_2018_2B		160.2								
Omislj (OMI_2018)	OMI_2018_P1	8	144	Ø 90 mm	Plateforme UWITEC, carottier à piston et gravitaire	02/11/18	45°10'12.13 " N	14°33'51.14" E	Mirine-fulfinum	1,5	MSCL, XRF, Pollen & MNP, Perte au Feu, <sup>14</sup> C, <sup>137</sup> Cs, <sup>210</sup> Pb
	OMI_2018_P2	1	99								
	OMI_2018_1	8	291	Ø 63 mm							
	OMI_2016_P1	8	120	Ø 90 mm							
Punta Secca (PS_2018)	OMI_2016_P2	8	130,5		Carottier gravitaire	18/04/16					MSCL, XRF
	PS_2018_A	0.8	75	Ø 90 mm	Carottier gravitaire	29/10/18	44°40'34.10" N	14°24'58.77" E	Osor	0	MSCL, XRF, Pollen & MNP, Perte au feu, <sup>14</sup> C, <sup>210</sup> Pb
	PS_2018_B		63								MSCL
Osor	Osor_2016_1	1 ?	115,5	Ø 90 mm	Carottier gravitaire	20/04/16	44°40'42.38"N	14°24'30.54"E	Osor	0	MSCL, XRF, Pollen & MNP, Macrocharbon, <sup>14</sup> C

Tableau 1. Ensemble des carottages effectués lors des missions de terrain de 2016 et 2018



nières années environ. Afin d'obtenir les résultats les plus représentatifs et les plus fiables possibles, l'échantillonnage a été effectué en une seule fois et un unique échantillon homogène à chaque profondeur a servi pour l'ensemble des analyses destructives (14C, isotopie, palynologie, macrocharbons de bois et perte au feu, **Figure 30**).

Chaque échantillon a ensuite été pesé, congelé à -80°C, lyophilisé et homogénéisé. La teneur en eau a été déterminée par perte de masse après lyophilisation. Le calcul de la densité apparente sèche ( $D_a$ ) a été fait à partir de la teneur en eau et de la densité apparente du sédiment humide. Les flux de matières (en  $\text{g.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$ ) et de particules (en  $\text{n.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$ ) sont calculés à partir de la formule suivant :

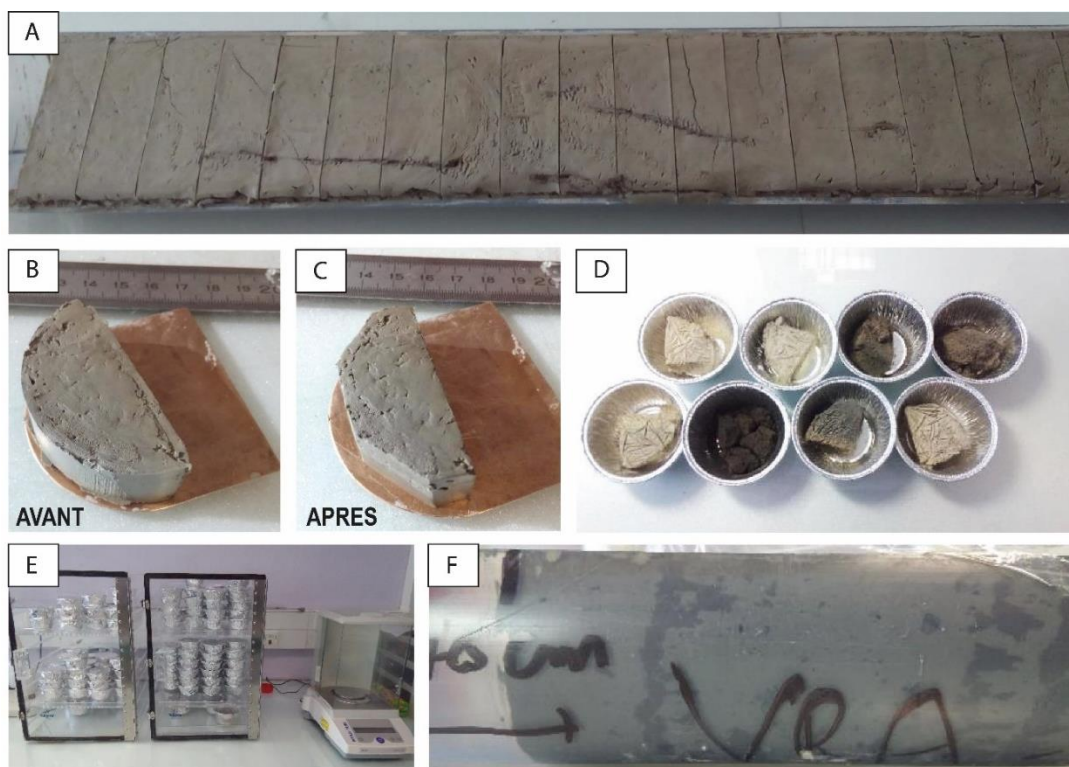
$$\text{Flux} = D_a \times [c] \times \text{Sed}$$

avec,

**Da** : la densité apparente sèche (en  $\text{g.cm}^{-3}$ ),

**[c]** : la concentration massique de la matière ( $\text{g.g}^{-1}$ ) ou des particules considérées ( $\text{n.g}^{-1}$ )

**Sed** : le taux de sédimentation (en  $\text{cm.an}^{-1}$ )



*Figure 30. Echantillonnage des séquences sédimentaires avec (A) une section de carotte pré-découpée, (B et C) retrait des sédiments en contact avec la chemise PVC afin d'éviter des contaminations éventuelles, (D) échantillons après lyophilisation, (E) les échantillons après lyophilisation sont maintenus le temps de la pesée dans un dessiccateur afin d'éviter qu'ils absorbent de l'humidité ambiante, (F) sédiment avant ouverture dans la chemise PVC.*

L'analyse en continu des archives sédimentaires lacustres permet une reconstruction détaillée des conditions environnementales passées. Une variété de méthodes biologiques, abiotiques et géochimiques sont couramment appliquées lors d'études pluridisciplinaires pour compenser les déficits des approches analytiques individuelles. Chaque méthode nécessite l'analyse d'échantillons de petite taille, de quelques grammes ou cm<sup>3</sup>, ce qui limite l'application de techniques multiples sur un échantillon discret et pose la question de leur représentativité (**Heiri et Lotter, 2001**).

L'analyse d'échantillons de sédiments archivés après lyophilisation permet de réduire considérablement le temps de préparation de sous-échantillons et de déterminer de multiples paramètres sur un seul gros volume de sédiments homogénéisés, représentant une demi-section complète. Cette méthode réduit considérablement l'erreur d'échantillonnage et renforce la représentativité des données dans le cadre d'une interprétation multi-paramètre.

De plus, le stockage à long terme en chambre frigorifique entraîne un assèchement lent des sédiments et/ou la dégradation microbienne de la matière organique et le développement de moisissures à la surface et à l'intérieur des carottes, pouvant biaiser les datations au radiocarbone et le contenu en palynomorphes non-polliniques (**Enevold et al., 2019**). La lyophilisation est donc préférable pour le stockage à long terme des carottes de sédiments car elle garantit les analyses futures et, en outre, réduit la consommation d'énergie.

Pour ce travail de thèse, la lyophilisation a également permis de trouver la totalité des fossiles végétaux terrestres adaptés à la datation au radiocarbone, contenus dans une demi-section de carotte sédimentaire. Pour Vrana seulement, 40 fossiles végétaux terrestres ont été trouvés, ce qui contraste avec les études antérieures n'ayant produit que 3 (**Schmidt et al., 2001**) ou 5 datations fiables (**Ilijanić, 2014**).

### *Pollen*

**Tirlea et al (2015)** ont évalué la préservation du pollen contenu dans des sédiments lacustres conservés au congélateur ou soumis à la lyophilisation. Aucune différence statistiquement significative dans la détérioration du pollen n'a été détectée entre les deux méthodes de stockage pour les taxons et groupes de pollen identifiés. Il n'y avait pas non plus de différences significatives entre les échantillons lyophilisés et congelés pour leur somme pollinique

moyenne, le nombre de grains de pollen indéterminables et le nombre de taxons détectés par échantillon. De plus, des analyses effectuées cette année au laboratoire Chrono-environnement montrent que les grains de pollen, spores et palynomorphes non-polliniques sont parfaitement préservés dans des sédiments lacustres lyophilisés, et ce même après 10 ans de stockage à température ambiante.

### *Charbon*

Même si la lyophilisation peut avoir causé quelques cassures des particules, **Mensing et al. (1999)** ont montré que l'allure des courbes et les pics d'accumulation de charbons de bois correspondaient bien à ceux trouvés dans une étude antérieure utilisant du sédiment frais. La technique de lyophilisation est également couramment utilisée avant le comptage de particules de charbon sur lames minces de sédiments imprégnés de résine époxy (**Clark, 1988**).

### *Géochimie*

**De Lecea et al. (2011)** et **Kim et al. (2016)** ont rapporté que le séchage à l'étuve donnait des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  plus élevées que lyophilisation car le chauffage entraîne la volatilisation de composés contenant de l'azote et du carbone tels que les lipides, les acides aminés, l'urée et l'acide urique.

Il est démontré également qu'il est préférable d'utiliser des échantillons lyophilisés, plutôt que des sédiments séchés à l'air, pour préserver la concentration sédimentaire des biomarqueurs (alkenones, n-alkanes, etc.) ainsi que leur composition (**McClymont et al., 2007**). En revanche, les sédiments lyophilisés doivent être tout de même congelés à  $-20^{\circ}\text{C}$  car le stockage à température ambiante pendant une période prolongée diminue considérablement la concentration en biomarqueurs fragiles, comme les pigments (**Reuss et Conley, 2005**).

Bien que la lyophilisation évite les pertes d'éléments volatiles, comme le mercure (**Hojdová et al., 2015**), elle ne permet pas de préserver la spéciation chimique des éléments majeurs, des métaux traces, du phosphore et du soufre des sédiments (**Bordas et Bourg, 1998, Hjorth, 2004**). L'étude de la spéciation chimique des éléments sensibles au potentiel d'oxydo-réduction (i.e. type de liaison chimique) n'est pas prévue pour le lac de Vrana.

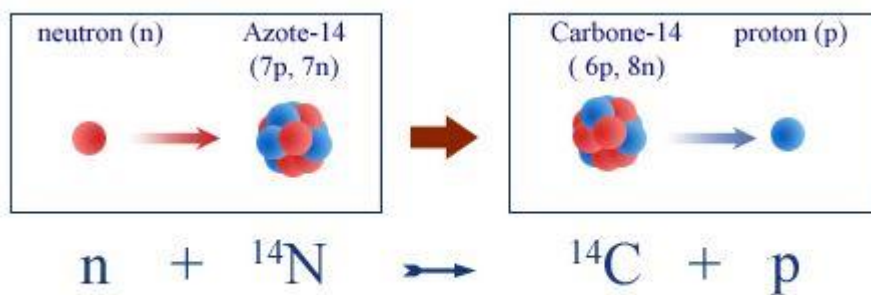
## II.2 Partie 2 : Description des méthodes

### II.2.1 Datations radiométriques

Dès lors que l'on souhaite reconstruire les changements environnementaux passés et comparer des données paléoclimatiques et/ou paléolimnologiques avec des données instrumentales et/ou historiques et archéologiques, il devient nécessaire d'obtenir une chronologie fiable et très précise. D'autant plus si l'on souhaite étudier des phénomènes s'inscrivant dans de courtes périodes (quelques centaines d'années). De plus, pour comprendre la formation des dépôts sédimentaires, la mesure précise des taux de sédimentation est indispensable. Une multiplication des datations et des méthodes a donc été menée sur les différentes séquences lacustres.

#### II.2.1.1 Radiocarbone $^{14}\text{C}$

La datation par le radiocarbone permet d'obtenir des âges relatifs jusqu'à 50 000 ans environ sur des échantillons de nature variée. Cette méthode se fonde sur la désintégration de l'isotope du carbone. Cet isotope est formé dans la haute atmosphère à partir du bombardement des rayonnements cosmiques (composés de neutrons) avec des noyaux d'azote.



Formation du carbone 14 à partir de l'azote de l'air  
©IN2P3

Le carbone 14 se combine ensuite avec l'oxygène et forme le  $\text{CO}_2$  atmosphérique. La majorité est dissoute dans les eaux superficielles océaniques puis assimilée par les organismes vivants tout au long de leur vie (respiration, alimentation, etc.). Le principe consiste à comparer le rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  de l'échantillon avec celui de l'atmosphère actuelle. On considère qu'il n'y a pas de fractionnements isotopiques importants et que le rapport du carbone 12 au carbone 14 est conservé lorsque l'organisme échange son carbone avec l'atmosphère. Cependant, à la mort

de l'organisme, le carbone 14 n'est pas renouvelé. Le système est alors considéré comme clos, le carbone 14 va se désintégrer avec une période de demi-vie de 5730 ans.

*Remarque : La datation au carbone 14 des sédiments de lacs carbonatés peut être biaisée par la présence d'un « effet de réservoir lacustre » (appelé également « carbone mort » ou « carbone ancien »), et plus particulièrement dans les régions arides où la couverture végétale du bassin versant est faible (M. A. Geyh et al., 1997 ; Mischke et al., 2013). Cet « effet réservoir » semble généralement moins important au centre des lacs et augmente vers les rives. Afin de pallier en partie ce problème, les séquences sédimentaires doivent être préférentiellement prélevées au point le plus profond des lacs et seuls les macrorestes végétaux d'origine terrestre doivent être sélectionnés (Wohllfarth et al., 1998).*

Comme de nombreux lacs des régions chaudes et sèches, les sédiments des lacs Omišalj, Vrana et Punta Secca sont pauvres en macrofossiles végétaux. Ainsi, la stratégie choisie pour la recherche de macrofossiles a reposé sur un tri systématique des sédiments préalablement lyophilisés (**Photo 2 ; Annexe 1, 2 et 3**).



*Photo 2. Recherche de macrorestes végétaux terrestres dans des sédiments lyophilisés. À droite, une feuille d'arbre entière trouvée sur l'échantillon 651 (Pilote 3\_103 cm) du lac Vrana. Pour ce travail, entre 300 et 350 échantillons ont ainsi été triés.*

### *II.2.1.2 Radioéléments du $^{210}\text{Pb}$ , $^{137}\text{Cs}$ et $^{241}\text{Am}$*

La mesure de l'activité des isotopes radioactifs du plomb-210 (spectrométrie alpha) et du césium-137 a permis de dater les 100 – 150 dernières années environ de sédimentation

(Goldberg, 1963 ; Krishnaswamy et al., 1971 ; Appleby et Oldfield, 1978 ; Pennington et al., 1976).

Le plomb 210 est un isotope radioactif naturel de la chaîne de désintégration de l'uranium 238. La méthode de datation repose sur la mesure de la décroissance du plomb 210 en fonction de la profondeur. La loi de désintégration radioactive est notée  $N(x) = N_0 e^{-\lambda t}$  où  $N_0$  correspond au plomb 210 initial déposé à l'interface eau/sédiment,  $N(x)$  est le  $^{210}\text{Pb}$  mesuré dans le sédiment et  $\lambda$  la constante de désintégration du plomb 210 ( $0,0311 \text{ an}^{-1}$ ). Le plomb 210 est issu de la désintégration de deux sources (**Figure 31**) :

- du radon 222 émis par la croûte terrestre sous la forme d'émanations atmosphériques et qui se désintègre en plomb 210 dans l'atmosphère après une période de quelques jours. Ce plomb 210 dit « non-supporté » ou « en excès » se dépose ensuite dans les sédiments lors des épisodes de précipitations et décroît avec une période de 22,3 ans ;
- de l'érosion du bassin versant. Le radium 226 des continents se désintègre dans les sédiments lacustres en radon 222 puis en plomb 210 dit « supporté ».

Ainsi, le plomb 210 dans les sédiments correspond à la somme de ces deux sources. La valeur mesurée est donc corrigée par soustraction du plomb 210 supporté. Ce dernier est estimé en mesurant l'activité du radium 226 (isotope père du plomb 210) car il est à l'équilibre à l'échelle séculaire. Enfin, cette méthode de datation suppose que les sédiments n'ont pas été mélangés et que le plomb n'a pas été diffusé dans la colonne de sédiment.

Un modèle dit CRS (Constant Rate of Supply) considérant un taux de sédimentation et une compaction variable mais avec un flux constant de  $^{210}\text{Pb}$  non-supporté à l'interface eau-sédiment a été utilisé (Appleby & Oldfield, 1978). Ce modèle basé sur le principe de décroissance radioactive permet d'exprimer l'âge avec la formule suivante :

$$t = \left( \frac{t_{1/2}}{\ln(2)} \right) * \left( \ln \left( \frac{N_0}{N(x)} \right) \right)$$

avec,

$N_0$  correspond à la somme du  $^{210}\text{Pb}$  non-supportée ( $\text{Bq/m}^2$ ) mesuré dans toute la carotte.

$N(x)$  correspond au  $^{210}\text{Pb}$  non-supporté cumulé sous les sédiments de profondeur  $x$ .

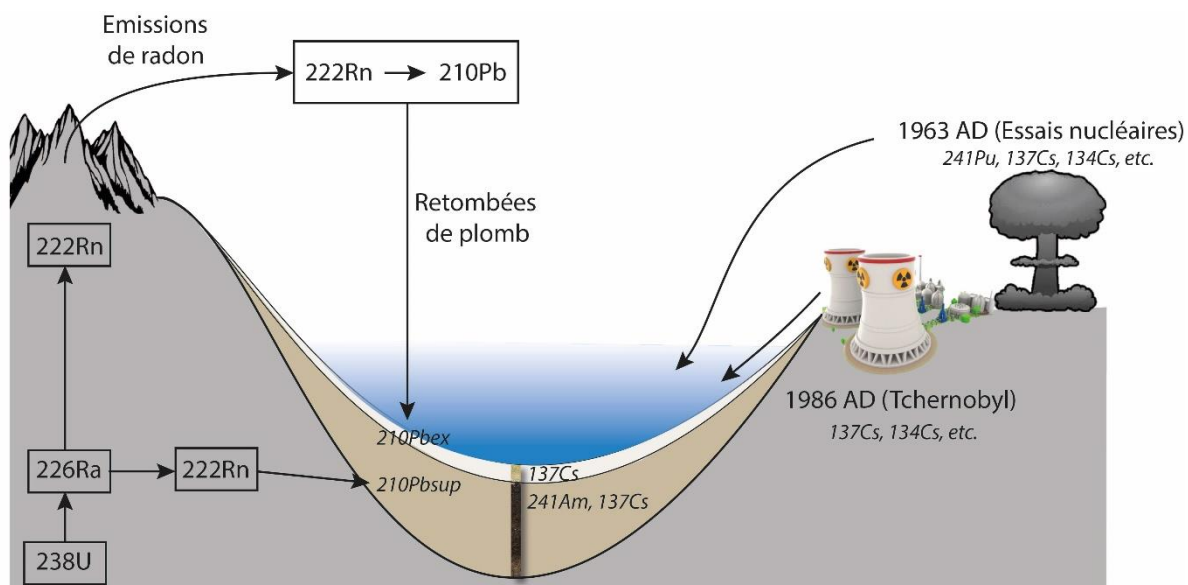


Figure 31. Transfert et dépôt du plomb 210 et des radionucléides dans les sédiments lacustres

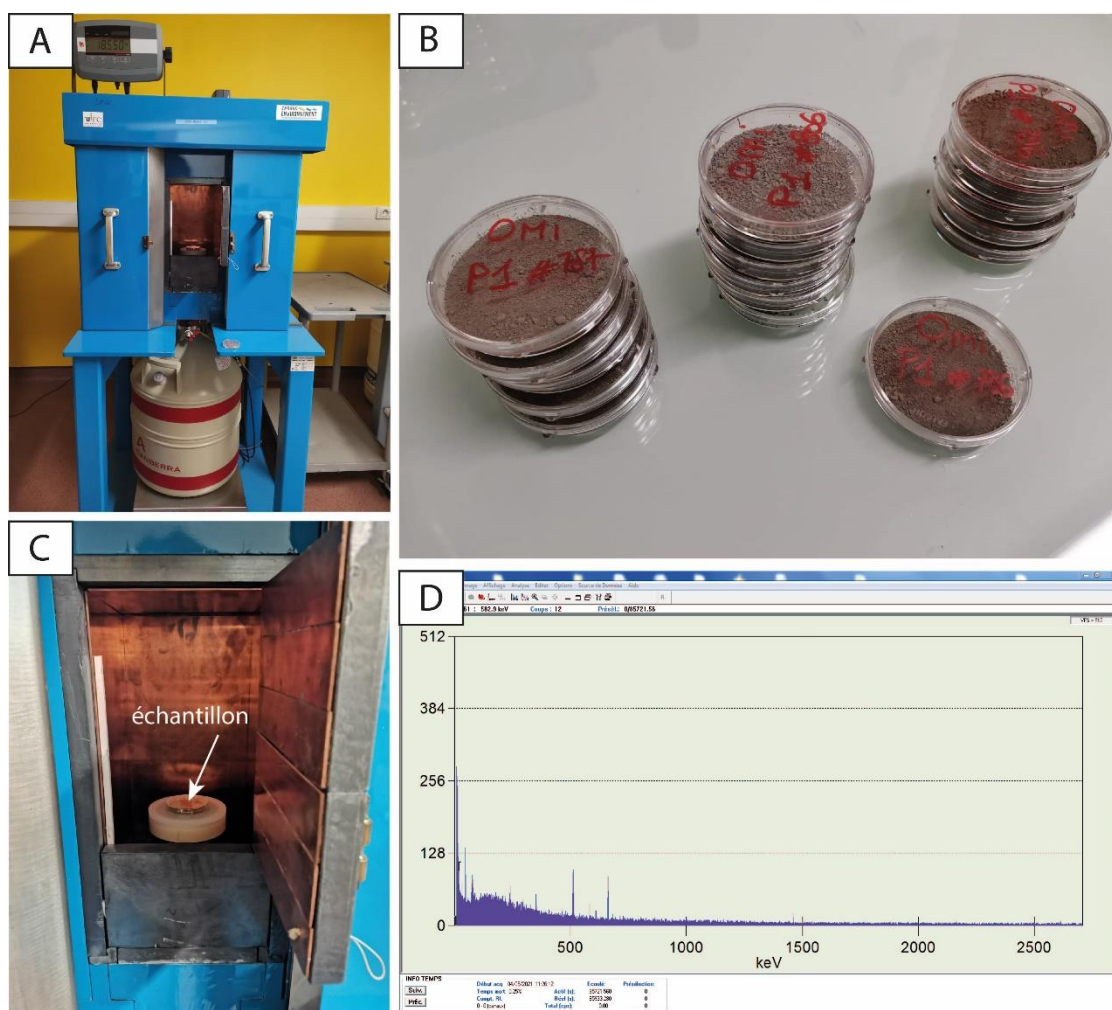


Photo 3. (A) détecteur BEGe au laboratoire Chrono-environnement (Besançon), (B et C) échantillons pour l'analyse du plomb 210 et du césium 137 (D) exemple d'une acquisition des radioéléments sur l'échantillon OMI\_6-7cm\_787

L'isotope du  $^{137}\text{Cs}$  est émis par les activités humaines sous la forme de retombées atmosphériques. C'est un isotope naturel issu de la famille de l'uranium 235. L'américium 241 descend du  $^{241}\text{Pu}$  par désintégration  $\beta^-$ . Sa période de demi-vie est de 14,2 ans. En Europe, le  $^{137}\text{Cs}$  et le  $^{241}\text{Am}$  fournissent trois repères identifiables dans les dépôts sédimentaires : le démarrage des essais nucléaires atmosphériques en 1954 ([Appleby & Oldfield, 1978](#)), le pic de 1963 en lien avec les essais nucléaires aériens ([Pennington et al., 1976](#)) et le pic de 1986 correspondant à l'accident nucléaire de Tchernobyl.

L'analyse du plomb 210 et des radioéléments a été faite au laboratoire souterrain de Modane par spectrométrie gamma à l'aide d'un détecteur puits DÉMON et au laboratoire Chrono-environnement de Besançon avec un détecteur germanium bas bruit BEGe (**Photo 3**).

### *II.2.1.3 Téphrochronologie*

L'objectif de cette étude était de construire une chronologie régionale cohérente pour l'archipel du Kvarner sur la base de l'activité des radioéléments et des datations par le radiocarbone, mais également de la corrélation d'éventuelles niveaux de cendres volcaniques (téphras). En effet, la côte orientale de la mer Adriatique est relativement proche de la péninsule italienne où sont présents un certain nombre de volcans. Les principales éruptions italiennes sont résumées dans le **Tableau 2**. Les éruptions volcaniques explosives peuvent disperser la matière volcanique sur de longues distances avec l'aide du vent. Les téphras identifiés dans les sédiments à différents endroits peuvent donc être corrélés avec les téphras de certaines éruptions précises. Un certain nombre de téphras provenant de volcans italiens ont d'ailleurs déjà été retrouvés dans la mer Adriatique ([Calanchi et al., 1998](#) ; [Siani et al., 2004](#) ; [Lowe et al., 2007](#) ; [Calanchi & Dinelli, 2008](#) ; [Sulpizio et al., 2008](#) ; [Bourne et al., 2010](#)) et en milieu continental sur le pourtour du bassin méditerranéen ([Magny et al., 2007](#) ; [Wulf et al., 2008](#) ; [Wagner et al., 2009](#) ; [Caron et al., 2010](#) ; [Vogel et al., 2010](#) ; [Lane et al., 2012](#) ; [Aufgebauer et al., 2012](#) ; [Wagner et al., 2012](#)). L'archipel du Kvarner semble donc idéalement situé, dans une zone où les produits d'éruptions anciennes auraient pu se propager.

La corrélation des téphras nécessite de faire une analyse physique et chimique du téphra identifié afin de déterminer sa source originel ([Cohen, 2003](#)). Cela comprend la caractérisation de la couleur, la forme, la taille et le degré d'altération des particules du verre volcanique ainsi qu'une analyse chimique. Cependant, la recherche sur les téphras dans les sédiments lacustres



est limitée par la datation précise des éruptions. Par exemple, le téphra « Astroni » est situé avant une éruption historique du Vésuve ( $1478 \pm 1$  cal. BP) datée à l'année près. Les âges d'autres téphras, comme le « Mercato Base » ( $8530 \pm 100$  cal. BP), sont obtenus en combinant des âges  $^{14}\text{C}$  calibrés provenant de différentes archives sédimentaires régionales. De plus, un prérequis à la corrélation des téphras contenus dans des sédiments avec une éruption précise, est la bonne connaissance chimique et physique du téphra d'origine. Ainsi, bien que permettant des corrélations entre les archives sédimentaires lacustres, l'identification des téphras seule ne permet pas toujours la datation absolue des sédiments.

Les datations par le radiocarbone des séquences sédimentaires lacustres d'Omišalj (île de Krk), de Vrana, de Osor et de Punta Secca (île de Cres) ont ainsi pour intérêt d'établir le cadre chronostratigraphique dans lequel les cendres volcaniques peuvent être identifiées. En plus d'améliorer la datation des éruptions datées indirectement à partir d'autres archives sédimentaires, ces séquences permettent de dater de manière absolue les téphras dont la chronologie est encore relative et peut servir de base pour la téphrochronologie d'autres archives lacustres.

Dans un premier temps, les cryptotéphras ont donc été identifiés dans les niveaux où la susceptibilité magnétique montrait des valeurs importantes, ces valeurs étant calées chronologiquement sur les modèles âge-profondeur. Toutefois, par cette méthode, s'appuyant donc seulement sur la susceptibilité magnétique, aucun niveau de téphra n'a pu être localisé avec précision. Les raisons de ce résultat peuvent être nombreuses. Premièrement, les téphras ont pu être remis en dissolution comme c'est souvent le cas en milieu carbonaté ([Longman et al., 2019](#)). Deuxièmement, tous les téphras ne contiennent pas des éléments magnétiques. Des téphras sont donc peut être bien présents dans les sédiments mais non discernés par la susceptibilité magnétique.

Pour pallier au problème, il serait donc nécessaire de cibler des intervalles sédimentaires où la probabilité chronologique de trouver des téphras provenant de fortes éruptions bien datées (à l'exemple du Vésuve) est la plus forte puis de monter des lames d'observation par pas successifs afin de localiser des éventuelles échardes de verre. Une fois les niveaux identifiés avec certitude, une analyse géochimique détaillée serait alors nécessaire pour déterminer avec précision l'éruption correspondante. Ce travail complexe et chronophage fait partie des

recherches qui pourraient être encore envisagées sur ces séquences sédimentaires, notamment celle de Vrana qui dispose d'un modèle âge-profondeur très solide.

Cryptotéphra(s)	Age (cal. BP)	Référence
Mont Somma-Vesuvius	319 ± 1 (1631 cal. AD)	Rosi et al. (1992)
Pollena (Mont Somma-Vesuvius)	1478 ± 1 (472 cal. AD)	Marchini et al. (2014)
Pompéi (Mont Somma-Vesuvius)	1871 ± 1 (79 cal. AD)	Rosi et al. (1992)
Avellino (Mont Somma-Vesuvius)	Vers 4000	Sigurdsson et al. (1985), Vogel et al. (1990), Cioni et al. (1992), Lirer et al. (1993), Rolandi et al. (1993a), Zanchetta et al. (2011)
Astroni 1 – 3 (AST, Phlegraean Fields)	4220 ± 50	Alessio et al. (1971), Rosi and Sbrana (1987), Di Vito et al. (1999)
Agnano Monte Spina (AMST, Phlegraean Fields)	4943 ± 40	Alessio et al. (1971), Rosi and Sbrana (1987), de Vita et al. (1999), Calanchy et Dinelli (2008)
Mercato base (Mont Somma-Vesuvius)	8530 ± 100	Zanchetta et al. (2011)
Agnano Pomici Principali (C-1-APP, Phlegraean Fields)	Entre 12 400 et 12 000	Rosi and Sbrana (1987), Di Vito et al. (1999), Siani et al. (2001)
Tuff Biancastri (Phlegraean Fields)	14 450 ± 600	Rittmann (1950)
Tuff Jaune Napolitain (NYT, Phlegraean Fields)	14 450 ± 200	Lirer and Munno (1975), Rosi and Sbrana (1987), Orsi et al. (1992), Zolitschka and Negendak (1996), De Vito et al. (1999), Siani et al. (2001)
Lagno Amandolare (LAM, Phlegraean Fields)	15 633 ± 90	Andronico et al. (1996a)
Biancavilla Ignimbrite (Et1-Y1, Mont Etna, Sicile)	Entre 16 965 et 17 670	Kieffer (1979), De Rita et al. (1991), Siani et al. (2001), Albert et al., 2013
Pomici di base (L9, Mont Somma-Vésuve)	Entre 22 686 et 23 149 ± 420	Joron et al. (1987), Andronico et al. (1995), Andronico et al. (1996a), Bertagnini et al. (1998), Siani et al. (2004)
Y2 (Campi Flegrei, Naples)	21 862 ± 295	De Vito et al. (2001), Margari et al. (2007) ; Zanchetta et al. (2008), Vogel et al. (2010)
Y3 (Campi Flegrei, Naples)	29 300 ± 350	De Vito et al. (2001), Margari et al. (2007), Zanchetta et al. (2008), Vogel et al. (2010)
Y5 (Campi Flegrei, Naples)	39 950 ± 70	De Vito et al. (2001) ; Margari et al. (2007), Zanchetta et al. (2008), Vogel et al. (2010)

*Tableau 2. Descriptions des principales éruptions volcaniques en mer Adriatique*

## II.2.2 Analyses diagraphiques

### II.2.2.1 Banc de diagraphie géophysique Geotek®

Le banc de diagraphie\* géophysique Geotek® du laboratoire Chrono-environnement mesure de manière non-destructive l'absorption des rayons gamma en fonction de la densité, la vitesse de propagation des ondes acoustiques (ondes P), les paramètres colorimétriques, et la quantité de matériaux magnétiques présents dans le sédiment (**Figure 32**). Il permet également

l'acquisition d'images haute résolution de la surface du sédiment grâce à une caméra numérique. Les sections ont été analysées en continu par incrément de 5 mm.

Cependant, avant toute mesure, la première étape consiste à gratter la couche superficielle de sédiment pour éviter les biais de mesures liés à d'éventuelles traces d'oxydation ou à la fine pellicule d'eau libre formée en surface lors du stockage en chambre froide des carottes. Un film de polyéthylène est ensuite déposé sur les sédiments en évitant les bulles d'air et les plis. Ce film vise notamment à éviter de contaminer la sonde du spectrocromimètre. Le film de polyéthylène n'a aucune incidence sur le spectre acquis (Balsam et al.1997).

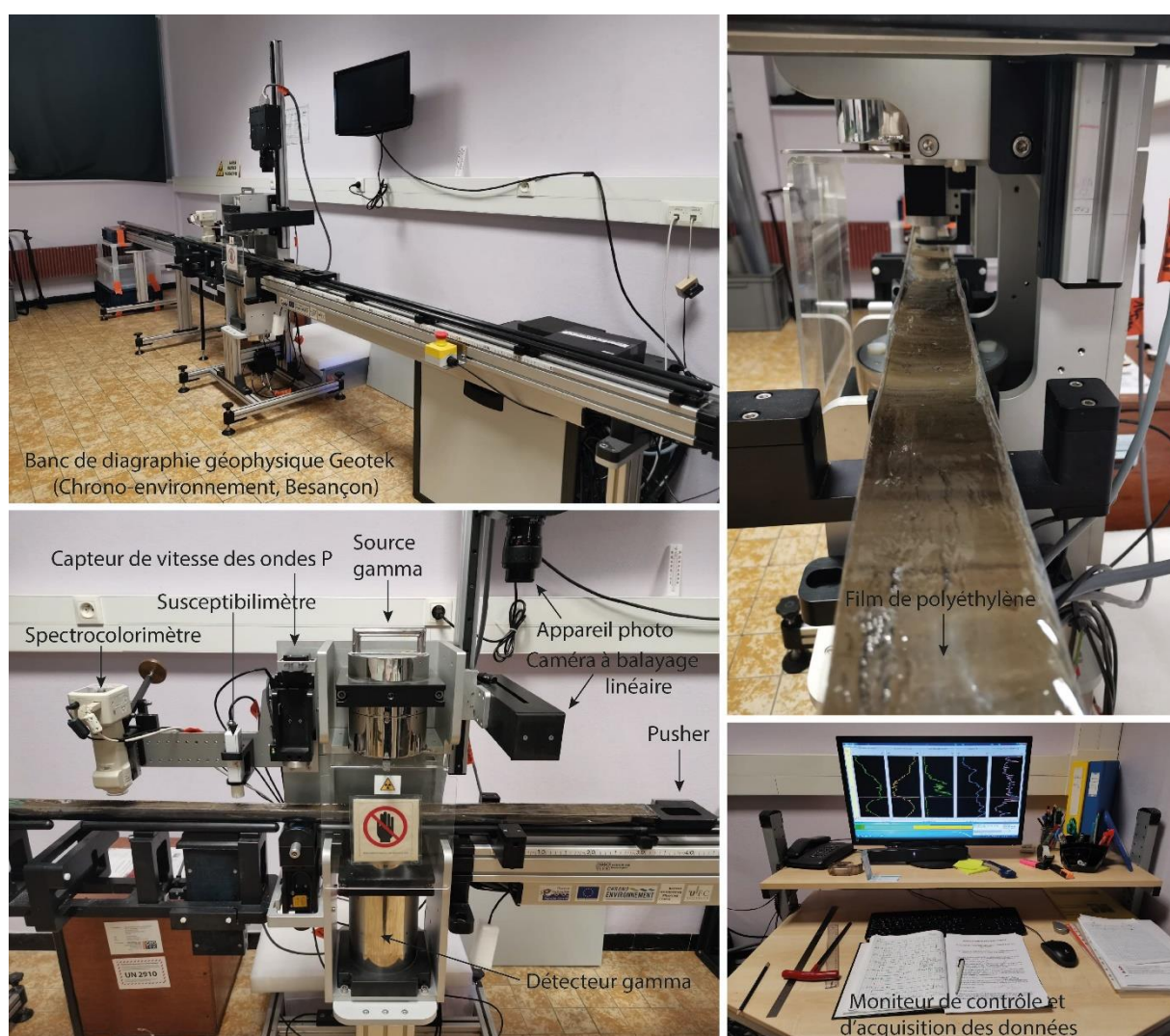


Figure 32. Banc de diagraphie géophysique Geotek® avec les différents capteurs (capteur de vitesse des ondes P, spectrocromimètre, susceptibilimètre, densitomètre gamma, caméra numérique), et le moniteur de contrôle et d'acquisition des données. Les demi-sections de carottes sont déplacées sur un rail poussées pas à pas par un « pusher »

Densitométrie gamma

Les mesures de densitométrie gamma sont acquises grâce à une source de  $^{137}\text{Cs}$  qui émet des rayons gamma de 0,66 MeV et à un détecteur (**Figure 32**). Le détecteur mesure l'intensité des rayons gamma émis par la source qui ont été rétrodiffusés\* vers le détecteur par les sédiments.

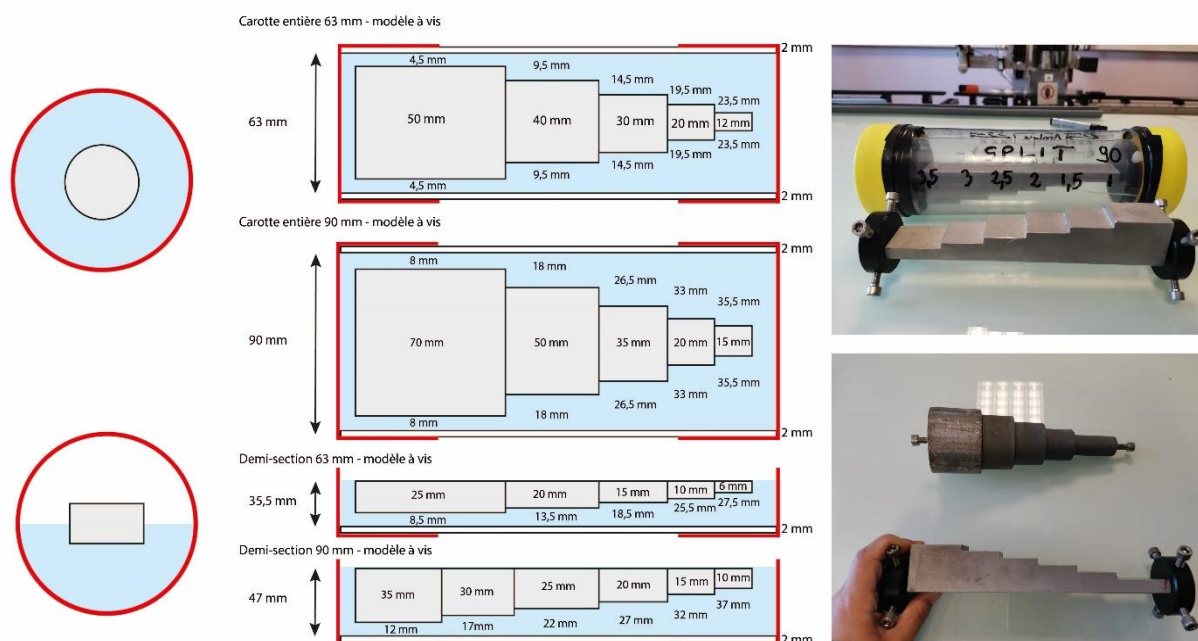


Figure 33. Pièces de calibration pour le densitomètre gamma

Un étalonnage a été effectué avant le passage de chaque tronçon en raison de la désintégration de la source gamma (période de demi-vie de 30,4 ans). L'étalonnage du système repose sur l'utilisation à la fois du revêtement dans lequel le sédiment est contenu (liner PVC) et le fluide que contient le sédiment (eau). Par exemple, pour analyser une carotte sédimentaire entière saturée en eau, la section d'étalonnage doit être constituée d'une pièce cylindrique d'aluminium avec des épaisseurs variables et entourée d'eau dans une doublure scellée (**Figure 33**).

Après calibration de l'instrument, il est possible d'obtenir la densité des sédiments en unités cgs de gramme par centimètre cube (g/cc). La densité du sédiment dépend en grande partie de sa composition minérale et de son degré de compaction. Cette mesure a servi d'indicateur de changements lithologiques et de porosité. Les valeurs de densité ont également été utilisées pour corréler les sections entre elles et construire la carotte composite, car des changements de dépôts peuvent entraîner de brusques changements de densité.

### Susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique (SM) a été mesurée à l'aide d'un Bartington MS2 d'une résolution de  $2.10^{-6}$  SI. La SM correspond à la capacité d'un corps à acquérir une aimantation induite sous l'effet d'un champ magnétique faible. Il s'agit d'un paramètre permettant de caractériser l'intensité des apports détritiques et est lié à la concentration en minéraux magnétiques (**Rousseau et al., 2020**). La SM est principalement contrôlée par les minéraux ferromagnétiques\* (magnétite, hématite, etc.), mais peut également être influencée dans une moindre mesure par un matériau diamagnétique\* (e.g carbonate, quartz, calcite) ou paramagnétique\* (e.g argiles, sidérite). Les minéraux ferro- et ferri-magnétiques\* donneront des valeurs de SM positives et fortes et les minéraux para- ou dia-magnétiques des valeurs faibles.

Les valeurs de SM peuvent également dépendre du volume de matériel et du type de dépôt (par ex. silts, sables, etc.). Deux carottes identiques mais avec des diamètres différents présenteront ainsi des valeurs de susceptibilité magnétique différentes mais un profil similaire.



*Photo 4. Echantillon de calibration du susceptibilimètre*

Le susceptibilimètre a été calibré avant chaque début de section à l'aide d'un échantillon de référence ( $358 \text{ CGS } 10^{-6}$ ) (**Photo 4**).

### Spectrocolorimétrie

L'analyse spectrocolorimétrique est une approche consistant à quantifier la couleur des sédiments définie dans la charte de Munsell en mesurant la proportion de lumière réfléchie par

la surface d'un matériau (**Deaton, 1987**). Le but de cette analyse est de caractériser les constituants du sédiment (e.g oxydes, carbonates, matière organique altérée, argiles, chlorophylle a et des produits dérivés). Cette analyse à haute résolution est non-destructive et rapide. Elle se base sur l'utilisation du mode dit  $L^*a^*b^*$  qui couvre tout le spectre du visible. Le paramètre  $a^*$  restitue l'ensemble des composantes de couleur du rouge jusqu'au vert. Le paramètre  $b^*$  restitue quant à lui l'ensemble des composantes de couleur du jaune jusqu'au bleu. Le paramètre  $L^*$  correspond à la réflectance totale qui caractérise le pouvoir réflecteur du matériau. L'appareil utilisé est un Minolta CM 2600d. Il se compose d'une sphère intégrant d'environ 5 – 8 mm de diamètre dont la surface est recouverte de sulfate de baryum ( $BaSO_4$ ). Une lumière incidente est positionnée à l'entrée de la sphère perpendiculairement au sédiment. Les rayons lumineux sont ainsi propagés et réfléchis dans toutes les directions à l'intérieur de la sphère et à la surface de l'échantillon. Le spectre est acquis dans le domaine du visible (compris entre 400 et 700 nm). Le dispositif utilisé permet le découpage des spectres tous les 10 nm offrant ainsi une très bonne résolution analytique spatiale.

Le protocole utilisé est celui de **Balsam et al. (1997)**. L'appareil est calibré à l'aide d'un standard blanc. Ce standard blanc représente 100 % de la réflectance. Un second standard noir représente 0 % de la réflectance est également utilisé. Ce dernier est acquis loin de toute source lumineuse.

Afin de déterminer la composition précise de la minéralogie des sédiments, l'utilisation de dérivées premières (*First Derivative Spectrophotometry* ou FDS) obtenue à chaque profondeur mesurée est utilisée (**Barranco et al., 1989 ; Balsam et Deaton, 1991 ; Deaton et Balsam, 1991**). Chaque constituant du sédiment absorbe en effet de façon différente la lumière et présente en retour une signature spectrale qui lui est propre (**Van der Meer, 2004**). Certains intervalles de longueurs d'onde de la FDS vont ainsi correspondre à certains constituants ou phases minéralogiques dans le sédiment. Par exemple, l'intervalle compris en-dessous de 500 nm correspond essentiellement aux argiles (**Balsam et Damuth, 1997**), l'intervalle 500 – 590 nm aux oxydes et l'intervalle 605 – 695 nm correspond en général aux composés organiques du sédiment. De façon plus précise, la position à 575, 565 ou 555 nm du pic de la FDS correspond à l'hématite (**Deaton et al., 1991**), ceux à 435 et 545 nm correspondent à la goéthite (**Deaton et al., 1991**), et celui à 675 nm (couplé à un pic d'absorbance à 645 nm) correspond à des composés organiques spécifiques tels que la chlorophylle a et ses produits dérivés (**Das et al., 2005 ; Wolfe et al., 2006**).

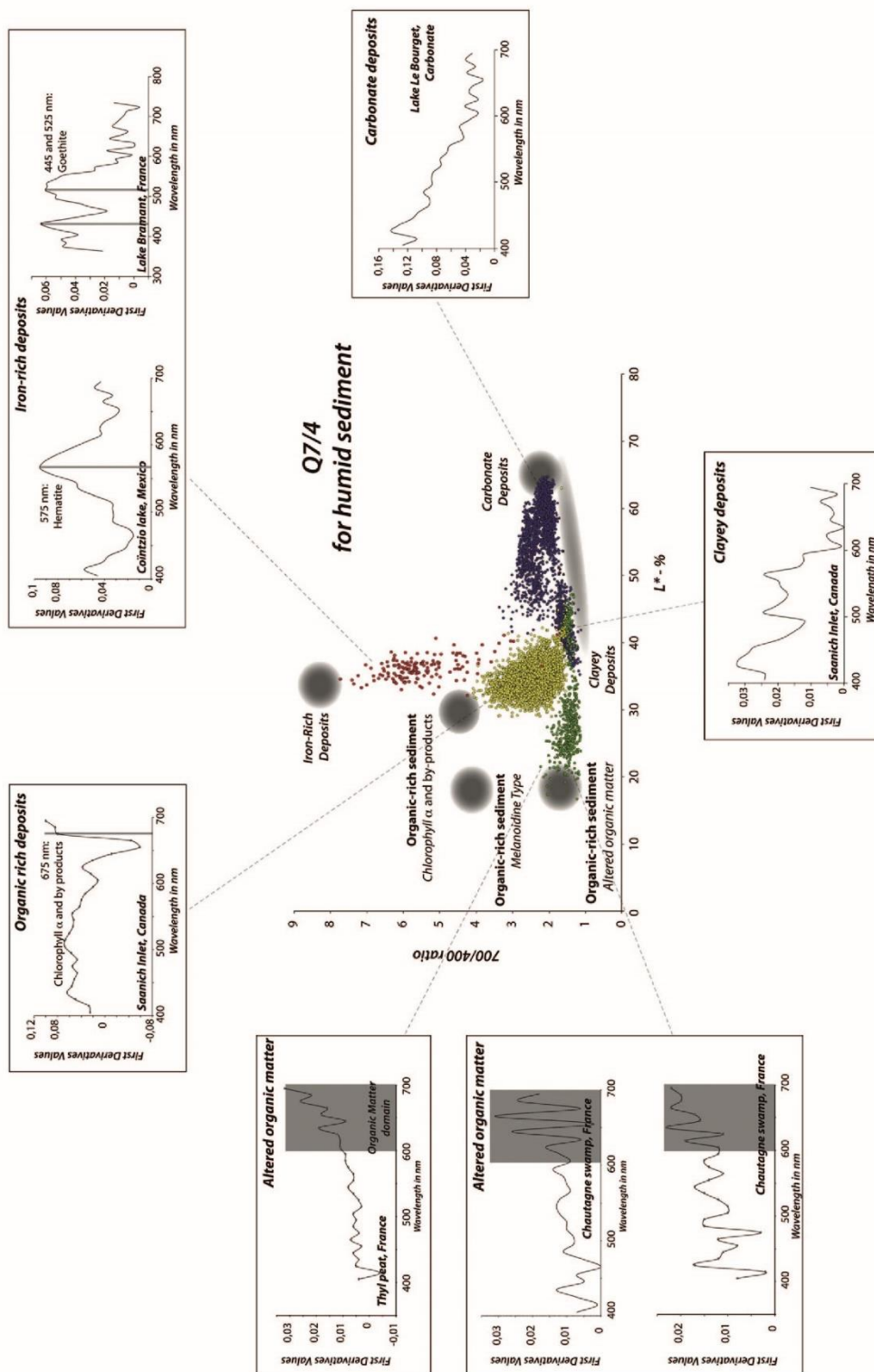


Figure 34. Diagramme Q7/4 d'après Debret et al., 2011

Un autre paramètre très utilisé en spectroradiométrie est le  $L^*$ . Dans la littérature, ce paramètre est régulièrement utilisé en milieu océanique pour retracer les teneurs en carbonates (Balsam et al., 1991). Intégré au diagramme Q7/4 ( $L^*$  en abscisse ; ratio 700/400 nm en ordonnée ; Figure 34), il constitue une signature classique, utilisée en routine qui permet de caractériser la dynamique sédimentaire du site étudié (Debret et al., 2011 ; Debret et al., 2014). Ce diagramme Q7/4 permet ainsi de définir 6 pôles purs distincts :

- le pôle des oxydes ;
- le pôle des argiles ;
- le pôle des carbonates ;
- le pôle de la matière organique de type mélanoidine\* ;
- le pôle de la matière organique altérée ;
- le pôle de chlorophylle a et ses produits dérivés.

Enfin, des calculs d'indice de profondeur d'absorption relative appelée RABD (Relative Absorption Band Depth) ou de région de bande d'absorption relative (RABA, Relative Absorption Band Area) peuvent être utilisés afin de caractériser et quantifier les phases minéralogiques et organiques contenues dans les sédiments (Trachsel et al., 2010).

Le calcul de l'indice de profondeur d'absorption relative (RABD) s'écrit de la façon suivante (Figure 35) :

$$n = \frac{1 - X2}{\left( X1 * \left( \frac{B}{C} \right) \right) + \left( X3 * \left( \frac{A}{C} \right) \right)}$$

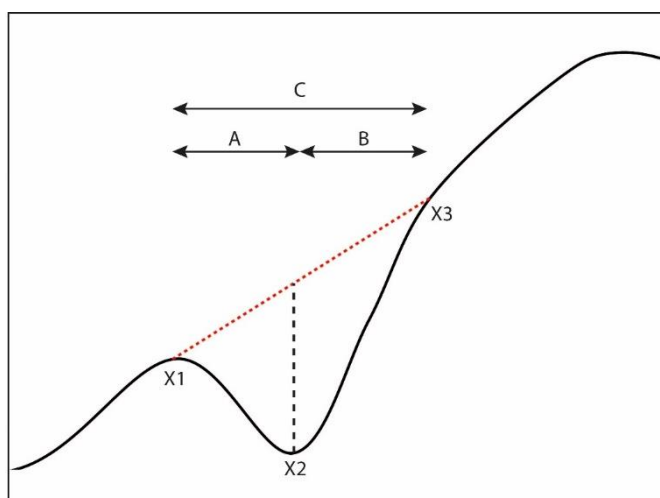


Figure 35. Variables de calcul pour l'indice de profondeur d'absorption relative (RABD)



Pour la bande d'absorption choisie, X1 et X3 correspondent aux longueurs d'ondes où l'absorption est minimale ou nulle et X2 correspond à la longueur d'onde où l'absorption est maximale (profondeur de bande maximale). Le calcul pour l'indice d'une région de bande d'absorption relative (RABA) est similaire à celui de la RABD à la différence que l'on cherche à quantifier l'aire sous la courbe pour une bande d'absorption choisie.

#### *II.2.2.2 Spectrométrie de fluorescence X (XRF)*

La spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF) est une analyse non-destructive, peu coûteuse et rapide, qui détermine semi-quantitativement la composition chimique des sédiments. Cette analyse géochimique a été réalisée à l'aide d'un banc de diagraphie XRF Avaatech au laboratoire EDYTEM (Chambéry, France). Depuis un tube à rayon X, un faisceau de rayons X primaire et très énergétique est dirigé à la surface du sédiment qui va émettre en réponse à l'excitation, des rayons X fluorescents secondaires dotés d'énergies caractéristiques des éléments présents dans l'échantillon.

Les mesures ont été effectuées en continu sur l'ensemble des sections tous les 5 mm avec un courant de 0,09 mA et des tensions de 10 kV pour détecter le Na, Mg, Al, Si, P, S, Ar, K, Ca, Ti et 30 kV pour détecter le Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Rb, Sr, Zr et le Pb. L'analyse par fluorescence X donne des informations chimiques uniquement sur les dizaines de micromètres supérieurs de l'échantillon. Par conséquent, la surface des sédiments a été soigneusement grattée et lissée pour éliminer les premiers millimètres de sédiments potentiellement contaminés. D'autre part, les valeurs obtenues sont semi-quantitatives en raison des différences de densité, de porosité et de texture du sédiment (Tjallingii et al., 2007). Pour limiter la rugosité de surface du sédiment et afin d'éviter la contamination de la sonde, chaque demi-section a été recouverte d'une fine feuille d'ultralène (4 µm) en évitant les bulles d'air qui pourraient absorber les rayons X et influencerait la qualité des données.

Les résultats obtenus sont systématiquement interprétés sous la forme de rapports entre éléments ou entre sommes d'éléments (Davies et al., 2015) pour s'assurer d'un effet de matrice minimale (Revel et al., 2010). L'amplitude des pics du spectre XRF est proportionnelle à la concentration de l'élément correspondant.

Pour exemple, le rapport Ca/Ti est utilisé pour retracer les précipitations de carbonates authigéniques (Kylander et al., 2011 ; Olsen et al., 2013),  $\ln(\text{Br}/\text{Ti})$  pour reconstruire les augmentations de salinité et les influences marines (De Boer et al., 2014) et Fe/Mn pour retracer les changements d'oxygénation de la colonne d'eau (Corella et al., 2012 ; Cuven et al., 2011 ; Haberzettl et al. 2007). Les concentrations semi-quantitatives du brome sont quant à elles utilisées pour estimer le contenu organique des sédiments (Fedotov et al., 2012 ; Kalugin et al., 2007 et 2013 ; Unkel et al., 2010) et celles du titane pour retracer les changements des apports détritiques (Metcalf et al., 2010 ; Corella et al., 2012 ; Balascio et al., 2011 ; Stansell et al., 2013).

*Remarque : Bien que certaines précautions soient prises dans l'acquisition des données, les résultats obtenus sur sédiment humide peuvent tout de même être biaisés par des différences de granulométrie, de teneurs en eau, etc. Afin d'obtenir des valeurs plus fiables et corriger les données XRF sur sédiment humide, des échantillons secs sur poudre ont été analysés à l'aide d'un pistolet pXRF au laboratoire Biogéosciences de Dijon.*

### **II.2.3 Analyses micro- et macroscopiques**

#### *II.2.3.1 Palynologie et Microfossiles non-polliniques*

L'analyse du contenu sédimentaire en spores et grains de pollen fossiles et en microfossiles non-polliniques (MNP) a été utilisée pour décrire l'histoire de la végétation et de ses variations. Les changements du couvert végétal peuvent être induits par des phénomènes naturels (e.g changement climatique, humidité des sols) ou liés aux activités humaines (déforestation, agriculture, élevage).

Des échantillons lyophilisés de 400 mg ont été traités pour l'analyse des grains de pollen, des spores et des microfossiles non-polliniques (227 échantillons sur VRA\_2018, 50 sur OMI\_2018, et 7 sur PS\_2018). Les premières analyses pour OSOR\_2016 ont été menées sur 30 échantillons de sédiment humide sur  $1 \text{ cm}^3$ , du fait d'un échantillonnage en amont de cette thèse. L'ensemble des échantillons ont été préparés selon la technique de Sittler avec HCl (36 %) puis HF (40 %) pour éliminer les carbonates et les silicates. Une séparation densimétrique du pollen des résidus organiques a été effectuée avec  $\text{ZnCl}_2$  ( $d= 1,9$ ), suivie d'une coloration des grains de pollen par acétolyse à  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  pendant 8 min. Les résidus ont ensuite été tamisés à  $200 \text{ }\mu\text{m}$  pour éliminer les particules grossières puis des lames palynologiques ont été montées avec du glycérol et scellées à la paraffine.

Un microscope à lumière transmise au grossissement x400 a été utilisé pour identifier les pollens, les spores, et les MNP. Entre 700 et 1000 grains de pollens terrestres ont été comptés dans chaque échantillon pour permettre la détermination des pourcentages relatifs de chaque type pollinique. Une courbe de raréfaction incluse dans le logiciel Polycounter nous a permis d'évaluer la richesse spécifique de chaque échantillon (**Photo 6**). Les pollens de Cypéracées, de plantes aquatiques ou hygrophiles, les spores et les MNP sont exclus de la somme pollinique pour le calcul des pourcentages. L'identification a été effectuée à l'aide de collections de référence du laboratoire Chrono-environnement (Besançon) et d'atlas polliniques (Spores et pollens fossiles : **de Reille (1992) ; Chester & Raine (2001) ; Beug (2004) et Demske et al., (2013) ; MNP : Van Geel (1978, 2001) ; Van Geel et al., (2003) ; Van Geel et Aptroot (2006) ; Cugny et al., (2010) ; Gelorini et al., (2011) ; Revelles et al., (2016)**).

Chaque espèce végétale produit un pollen qui lui est caractéristique. La détermination des spores et pollens se fait à partir de leur forme, leur taille, leur nombre d'apertures (sillons et pores), et l'ornementation de leur exine. Cependant, en raison de similarités entre certains pollens ou spores, l'identification reste bien souvent au rang du genre (ex. *Alnus*) ou de la famille (ex. Poaceae). Les règles de détermination pollinique appliquées ont été celles obtenues de **Beug (2004)**. De la même manière, les microfossiles non-polliniques ont été identifiés en fonction de leur couleur, taille, forme, apertures, et ornementation. Les diagrammes palynologiques ont été tracés à l'aide du logiciel Tilia (**Grimm, 1991**) (**Annexe 4, 5, 6 et 7**).

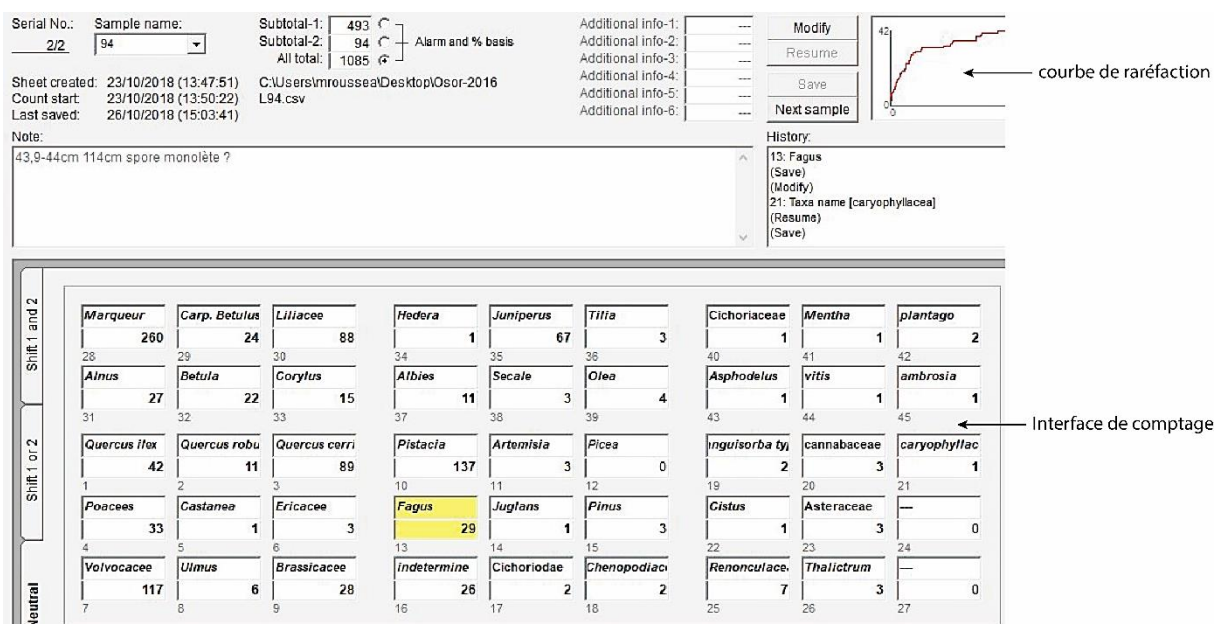


Photo 5. Capture d'écran de l'interface polycounter.

En règle générale, en palynologie, la représentation quantitative en pourcentages est largement privilégiée. Cependant, un certain nombre d'effets de sur- ou de sous-représentation de certains taxons est possible (Davies et al., 1980). Afin de résoudre une partie de ce problème, il est possible de calculer des concentrations absolues ou des flux polliniques.

Les concentrations absolues qui permettent de déterminer un nombre de pollens, spores et MNP par volume de sédiment (nb/cm<sup>3</sup>) sont possibles grâce à l'ajout dans les préparations polliniques d'un taxon absent de la pluie pollinique régionale de la zone d'étude. Dans notre cas, le marqueur exogène est *Lycopodium clavatum*. La formule utilisée pour le calcul de la concentration est :

$$[C] = \frac{Pc}{Lc} * \frac{La}{V}$$

avec,

**[C]** : concentration (nb/cm<sup>3</sup>)

**Pc** : le nombre de palynomorphes comptés

**Lc** : le nombre de lycopodes comptés ajoutés à l'échantillon

**La** : le nombre de lycopodes

**V** : le volume de l'échantillon

Le calcul des flux s'écrit quant à lui :

$$Flux = [C] * Sed$$

avec,

**Sed** : taux de sédimentation (cm/an)

### II.2.3.2 Palynofacies

L'étude du palynofaciès a d'abord été développée pour l'exploration pétrolière afin d'accéder au potentiel en hydrocarbures des réservoirs. Dans les études paléoenvironnementales, cette approche consiste à l'analyse du contenu total en matière organique pour permettre de caractériser les environnements de dépôt et les changements dans les apports détritiques (Sebag et al., 2006 et 2006a). Cette méthode se base sur l'identification et la quantification au microscope optique de cinq catégories de particules établies selon leur

origine (aquatique ou terrestre), leur nature (biogène, anthropique ou fossile) et/ou leur formation (biodégradation, combustion, oxydation, **Figure 36**).

On retrouve ainsi la classe de la matière organique amorphe (OM), des restes algaïres, des restes fongiques (MYC), des palynomorphes (pollen et spores) et des phytoclastes (fragments de plantes microscopiques). Cette dernière classe est divisée en 4 sous-catégories comprenant les particules transformées opaques (charbons, minéraux – OP), les altérées translucides (tissus végétaux – TLC), les particules préservées transparentes (tissus de plantes et de bois – ALC) et les cuticules/membranes de plantes en cours de dégradation (GP, AP).

L'ensemble de l'analyse palynofaciès a été menée sur les mêmes échantillons que ceux préparés pour les comptages palynologiques.

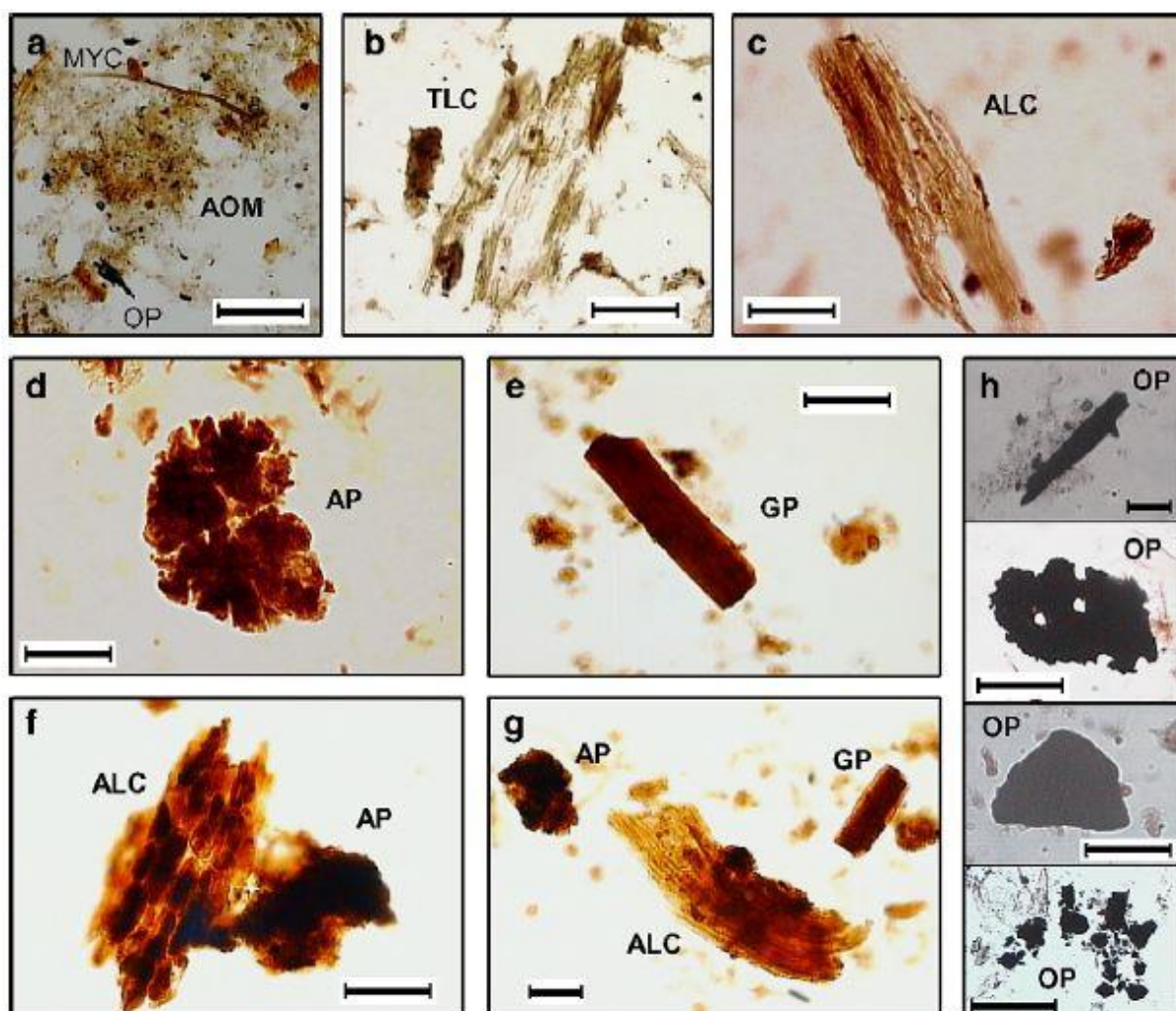


Figure 36. Classification des particules du palynofaciès par *Sebag et al., 2006*

### II.2.3.3 Macrocharbons de bois

L'étude des macrocharbons de bois est employée dans les études paléoenvironnementales pour reconstruire les variations à long terme du signal incendie (Tolonen, 1986 ; Patterson et al., 1987 ; MacDonald et al., 1991 ; Clark, 1988a ; Clark et al., 1998 ; Long et al., 1998 ; Whitlock & Anderson, 2003 ; Rius et al., 2011). Cette analyse vient en complément des analyses palynologiques afin de préciser les liens entre le climat, la végétation, les incendies et l'homme. Les macrocharbons de bois qui constituent l'ensemble des charbons supérieur à 150 – 180 µm permettent d'étudier le signal des feux locaux dans un rayon d'environ trois kilomètres (Oris et al., 2014 ; Remy et al., 2018). En-dessous de cette gamme de valeurs, les particules sont automatiquement classées dans la catégorie des microcharbons de bois et étudiées en lame mince (Conodera et al., 2009 et 2018). De par leur plus grande mobilité dans l'air, ces derniers permettent de retracer les incendies régionaux.

L'extraction et le comptage des macro-charbons ont été menés sur 292 échantillons de VRA\_2018 (Photo 7). Après élimination des carbonates par HCL (37 % - 24H) et de la matière organique par NaOH (10 % - 24H) et H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30 % - 24H), chaque échantillon a été tamisé à 150 µm pour ne distinguer que les incendies locaux (Oris et al., 2014 ; Remy et al., 2018). Le comptage des charbons piégés dans le refus de tamis a été effectué à l'aide d'une loupe binoculaire au grossissement x50.

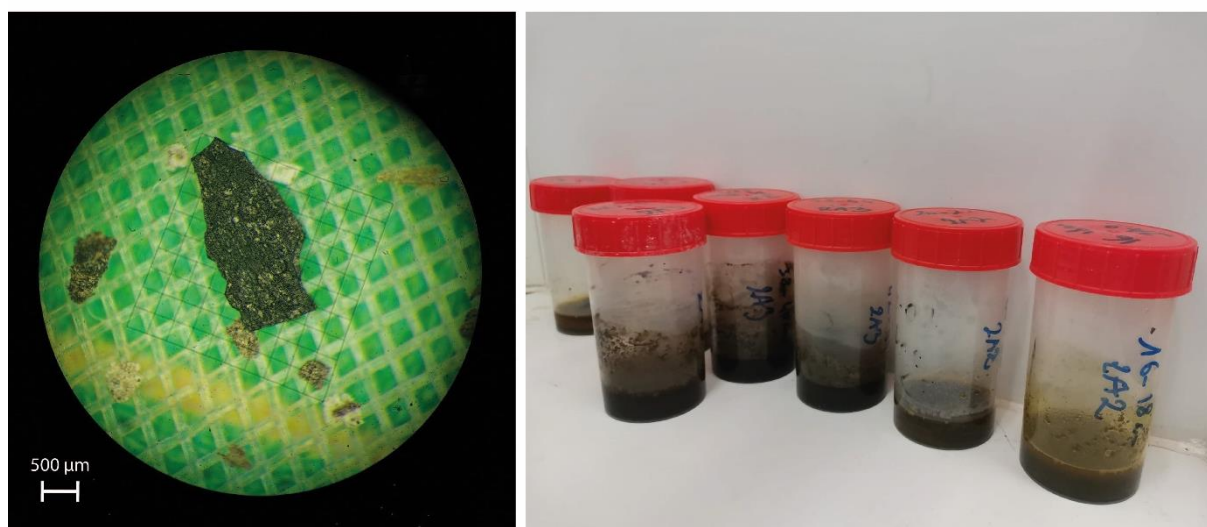


Photo 6. Macrocharbon de bois mesuré dans l'échantillon C325 (2A3\_28 cm)

Le nombre de charbons comptés est ensuite transformé sous la forme de flux exprimé en taux d'accumulation de nombre de charbons (CHAR ; #.cm<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>) et calculé grâce à la formule :

$$CHAR_{acc} = CHAR/V * Sed$$

avec,

**CHAR** : Nombre total de charbons dans l'échantillon

**V** : Volume de sédiment de l'échantillon en cm<sup>3</sup>

**Sed** : Taux de sédimentation exprimé en cm/an

Cependant, le calcul de flux exprimé en fonction de la surface totale de charbon dans l'échantillon équivalent à un taux d'accumulation de charbon (CHARA ; mm<sup>2</sup>.cm<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>) est souvent plus précis et permet de s'affranchir en partie des problèmes de fragmentation des charbons causée au moment du transport ou du dépôt dans les sédiments, ou encore lors de la préparation des échantillons. Un carreau de la grille interne de la binoculaire représente 250 microns de côté. La formule s'écrit alors :

$$CHAR_{acc} = CHARA/V * Sed$$

avec,

**CHARA** : la surface totale de charbon dans l'échantillon en mm<sup>2</sup>

## **II.2.4 Analyses géochimiques**

### *II.2.4.1 Isotopie (C et N)*

Les analyses des isotopes stables du carbone et de l'azote de la matière organique sédimentaire peuvent être utilisées pour reconstruire les changements des taux de productivité primaire aquatique et les sources de nutriments (Bertrand et al., 2009). Lors des périodes de productivité aquatique accrue, les communautés algues consomment préférentiellement l'isotope de carbone léger dissous (<sup>12</sup>C) pour la photosynthèse.

L'absorption accrue de  $^{12}\text{CO}_2$  par les organismes aquatiques entraîne la production et la sédimentation de matière organique (MO) pauvre en  $^{13}\text{C}$ . Les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{Org}}$  ou du rapport  $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$  sont alors plus négatives (Meyers et Teranes, 2001). Des valeurs inférieures de  $\delta^{13}\text{C}$  de la matière organique sédimentaire peuvent également refléter un afflux accru de matière organique terrestre dans le lac, ou une augmentation de l'apport de  $\text{CO}_2$  dissous dans l'eau du lac en raison d'une réduction de la couverture neigeuse saisonnière (amélioration des échanges entre l'atmosphère et l'eau du lac) ou des changements dans les niveaux trophiques du lac (Harwart et al., 1999 ; Teranes et Bernasconi, 2005). Pour les mêmes raisons, une stratification du lac plus longue et plus forte ou une photosynthèse améliorée par les algues et les plantes aquatiques peuvent également influencer la composition du  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Org}}$  (discrimination  $^{14}\text{N}$  et  $^{15}\text{N}$  lors de la fixation de l'azote) de la MO lacustre (Lu et al., 2010 ; Xu et al., 2006).

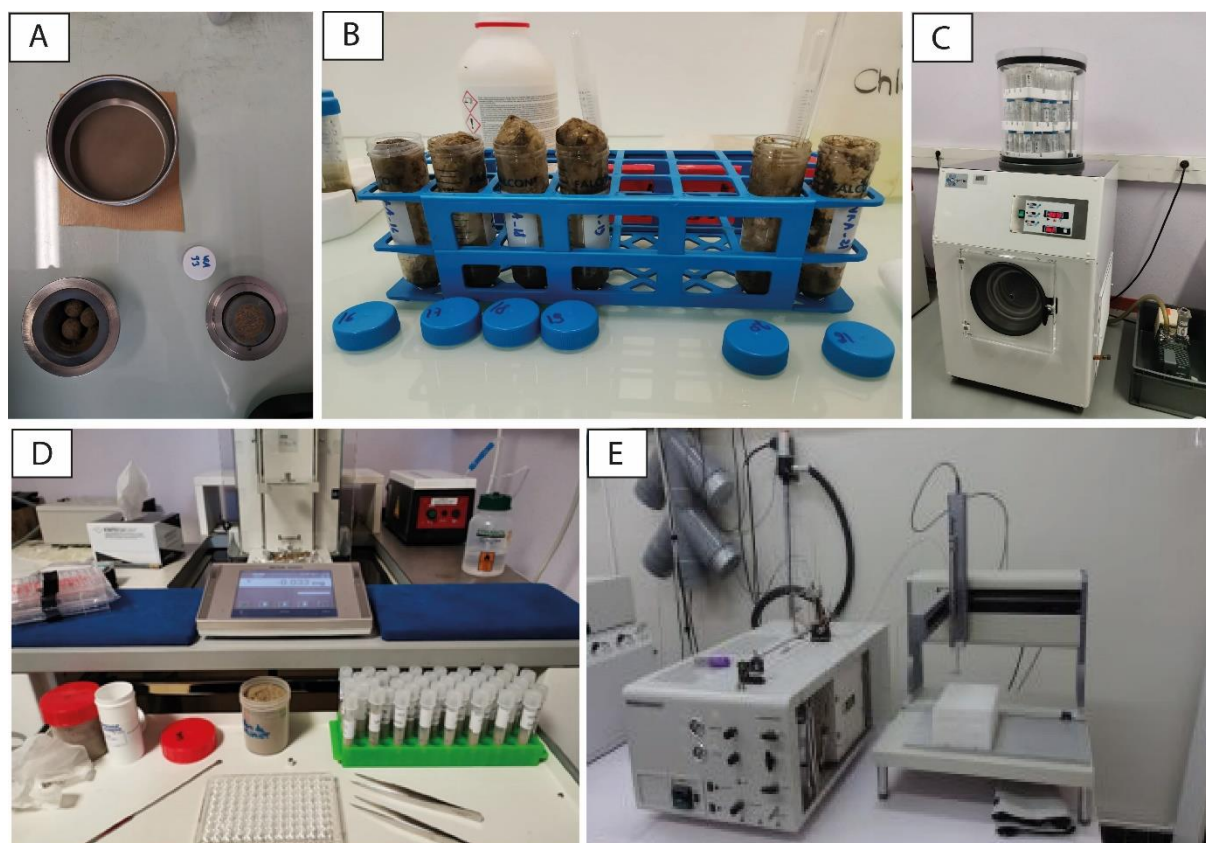


Figure 37. Étapes de préparation des échantillons pour l'analyse isotopique avec (A) broyage avec des billes d'agates à 500 tours pendant 8 min, (B) décarbonatation et rinçage des échantillons, (C) lyophilisation pendant trois jours, (D) encapsulage avec une balance de précision et (E) analyse à l'IRMS-EA

Les analyses isotopiques ont été menées en continu (Figure 37) à l'aide d'un spectromètre de masse à ratio isotopique couplé à un analyseur élémentaire (IRMS-EA) du



laboratoire Biogéosciences de Dijon. Les sous-échantillons d'environ 2 g de sédiments secs ont été broyés à 500 tours pendant 8 min jusqu'à obtenir un diamètre inférieur à 100 µm. Ils ont ensuite été décarbonatés avec de l'acide chlorhydrique 18,5 %, puis plusieurs rinçages ont été nécessaires après réaction afin d'obtenir un PH le plus proche de la neutralité. Il est essentiel que les échantillons soient le plus neutres possible afin de ne pas endommager le spectromètre de masse. Puis, les échantillons ont été congelés à -80 °C et lyophilisés. De nouveau, les sédiments ont été broyés et homogénéisés à l'aide d'un mortier en agate.

Des masses cibles de sédiment à mettre dans chaque capsule ont été déduites des taux de carbone (TOC décarbonaté) et d'azote (TN décarbonaté) du sédiment décarbonaté en tenant compte des masses optimales de C et de N pour la gamme de linéarité du spectromètre (0,5 et 0,1 mg respectivement).

Les formules utilisées sont les suivantes :

$$\text{masse cible de C} = \frac{0,5}{\left(\frac{\text{TOC décarbonaté}}{100}\right)}$$

$$\text{masse cible de N} = \frac{0,1}{\left(\frac{\text{TN décarbonaté}}{100}\right)}$$

Cependant, il n'a pas été possible d'obtenir des masses idéales pour les deux éléments simultanément, une moyenne sur les deux masses cibles a donc été calculée. Les masses de sédiment ainsi estimées se situent entre 0,6 et 1 mgC et entre 0,06 et 0,1 mgN. Ces masses idéales estimées ont ensuite été lissées sur 3 points afin d'éviter les valeurs extrêmes (s'agissant d'une approximation) et arrondie au mg près.

Par ailleurs, des répliques tous les 10 échantillons ont été ajoutés. S'ajoutent à cela des « standards » d'environ 15 mg avec des sédiments de valeurs isotopiques connues (QAL std: 5,740 %C ; 0,462 %N). La masse cible de ces « standards » a été calculée de la même manière que précédemment. Ils ont été ajoutés en plus des standards classiquement utilisés afin de renforcer le protocole de mesure en estimant la dérive de la machine, et d'appliquer des corrections si nécessaires. Enfin, les capsules ont été placées aléatoirement dans les plaques et non pas suivant leur position stratigraphique, afin d'éviter des biais de mesure liés à un effet de dérive.

#### II.2.4.2 Perte au feu

Les analyses par perte au feu (PAF) ont été réalisées au Laboratoire Chrono-environnement (**Photo 8**). Il s'agit d'une technique d'analyse qui consiste à estimer le contenu en matière organique (LOI 550 °C), en carbonates (LOI 950 °C) et en composés minérogéniques (LOI>950 °C). Cette méthode se base sur la mesure d'une différence de masse d'un échantillon avant et après chauffage à différentes températures dans un four à moufle (**Galle et al, 1960 ; Dean, 1974**). La matière organique commence à se consumer dès 200 °C, et l'est entièrement lorsque la température atteint 550 °C. Les carbonates brûlent dès 800 °C et le sont totalement à 950 °C. Enfin, La partie non-carbonatée résiduelle (e.g., minérogénique) est celle restante après calcination (> 950 °C).

Un soin particulier a été systématiquement pris avant chaque pesée en laissant les échantillons 60 minutes au minimum dans un dessiccateur afin de supprimer les effets de l'humidité atmosphérique qui pourraient biaiser les résultats. Deux pesées successives ont été effectuées : une avec le creuset vide (préalablement séché durant 12 heures à 105 °C), et une avec le sédiment sec. Les échantillons ont ensuite été chauffés progressivement pendant 60 min jusqu'à atteindre 550 °C. Les échantillons restent à cette température pendant 4 heures, puis ils sont pesés à froid à l'aide d'une balance de précision. Les échantillons sont ensuite chauffés progressivement durant 1h30 afin d'atteindre 950 °C où ils y resteront pendant 2 heures. Ils sont à nouveau pesés à froid.

Le pourcentage de matière organique totale (appelé LOI 550 °C) est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{LOI 550 °C (Carbone organique totale)} = \left( \frac{C-D}{C-A} \right) * 100$$

avec,

**A** : le poids du creuset vide

**C** : le poids de l'échantillon sec

**D** : le poids après passage à 550 °C

Le pourcentage des carbonates (CaCO<sub>3</sub> ou LOI 950 °C) dans l'échantillon est quant à lui calculé d'après la formule :

$$\text{LOI } 950 \text{ }^{\circ}\text{C} (\text{CaCO}_3) = \text{CO}_2 * 2,27 \text{ dont } \text{CO}_2 = \left( \frac{D-E}{C-A} \right) * 100$$

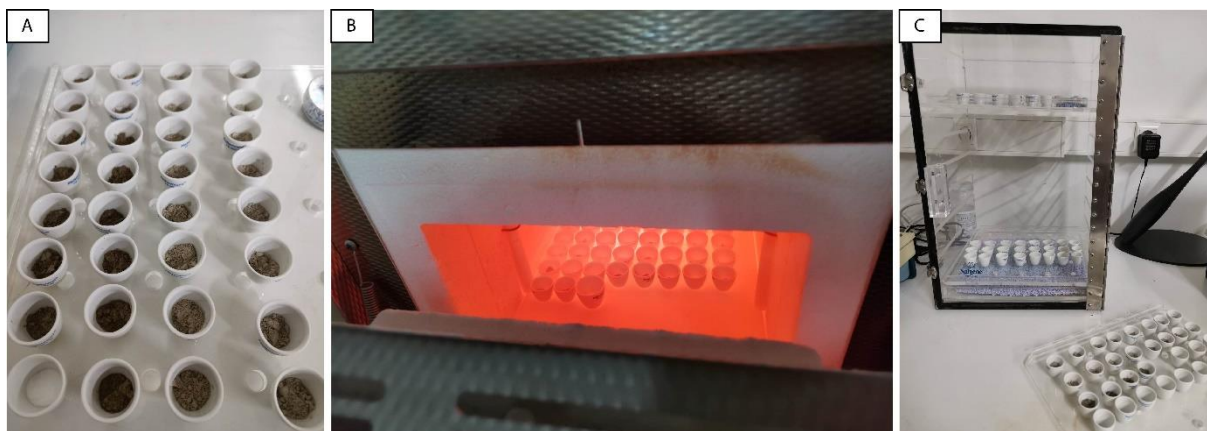
avec,

**E** : le poids de l'échantillon après passage à 950 °C.

De plus, différents tests ont été menés sur les sédiments comportant une forte proportion de carbonates comprenant de la calcite et de la dolomite afin de les discriminer :

- la littérature disponible indique une température de combustion de la dolomite vers 600 °C ([Gunasekaran et al., 2007](#) ; [Shahraki et al., 2009](#) ; [Humienik et al., 2015](#)). Ainsi, des chauffages à des températures graduelles après 550 °C ont été fait sur les sédiments (e.g. 550, 575, 600, 750, etc.) pour tenter d'estimer la température de cuisson de la dolomite. Les résultats obtenus n'ont cependant pas permis d'obtenir une température caractéristique. D'après les résultats obtenus, il semble que la dolomie est en partie oxydée dès 550 °C en même temps que le reste de la matière organique (**Annexe 8**). Une des raisons peut être l'influence du broyage sur la température de combustion. Une piste de recherche future pourrait donc être d'effectuer de nouveaux tests en augmentant cette fois-ci par pas successifs dès 450 – 500 °C et en évitant le broyage des échantillons. Les résultats obtenus pourraient être ensuite facilement comparés avec les analyses menées par diffraction aux rayons X où la calcite et la dolomite ont pu être mises en évidence (**Annexe 9**) ;

- des échantillons de calcite pure (CaCO<sub>3</sub>) ont également été ajoutés lors des analyses de perte au feu afin de connaître les proportions perdues après chauffage à 105, 550 et 950 °C. Une perte de 1 % a été estimée dès 550 °C. (**Annexe 8**) ;



*Photo 7. Analyse de perte au feu avec (A) préparation des échantillons, (B) cuisson des échantillons et en (C) refroidissement dans un dessiccateur pour contrer les effets de l'humidité atmosphérique.*



## **III. : Description des lacs et résultats**



Travail de labour d'après [melodie.rousseau.com](http://melodie.rousseau.com)

## III.1 Partie 1 : Le lac Vrana (Vransko Jezero), île de Cres

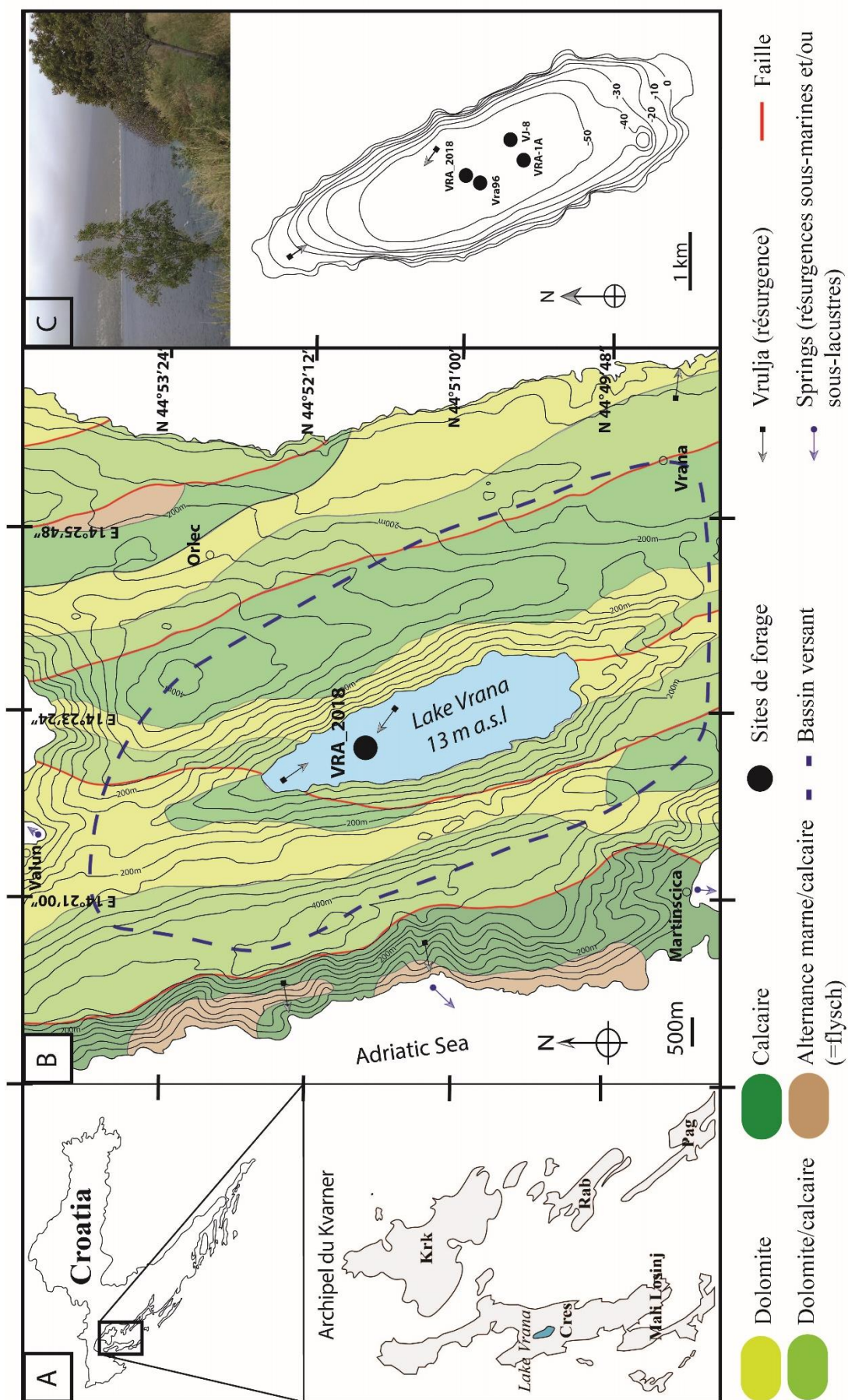
### III.1.1 Généralités

L'île de Cres couvre une superficie de 404 km<sup>2</sup> – 62 km de long et 2 à 11 km de large. Son point culminant se situe au nord, à Gorice (650 m a.s.l.). Le lac Vrana ou Vransko Jezero (44°51'30.67"N, 14°23'03.40"E) se trouve au centre de l'île de Cres, à une distance de 2 à 6 km de la mer Adriatique (**Figure 38**). Son bassin versant, d'une superficie d'environ 25 km<sup>2</sup>, est constitué de roches carbonatées karstifiées et très perméables (**Figure 38**). À proximité immédiate du lac, dans une zone à dolomie faiblement perméable, se situe une faille inverse NO-SE (**Biondić et al., 1992**). On retrouve plus précisément dans le bassin versant, des calcaires rudistes d'âge Crétacé et Eocène, des dolomites et des dépôts de flysch du Paléogène. Enfin, les sédiments argileux lacustres les plus anciens de Vrana sont d'âge pliocène-pléistocène (**Biondic et al., 1995, 1997**). Le lac s'est donc formé à partir d'un champ karstique modelé il y a 1,8 Ma lors de la transition Pliocène-Pléistocène (**Bonacci, 1993, 2015 et 2018**). Durant l'Holocène, l'augmentation des précipitations et la montée du niveau marin ont inondé la cuvette de Vrana. L'élévation post-glaciaire du niveau marin a été estimé à environ 120 m (**Faivre et al., 2010 ; 2019**).

Ce lac karstique couvre une surface de 5.75 km<sup>2</sup> (5,5 km de long ; 1,5 km de large) correspondant à un volume moyen d'eau douce de 220.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (197.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> au minimum et 241.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> au maximum, **Bonacci, 1993 ; Habdija et al., 2011**). La surface du lac se situe entre 10 et 15 m a.s.l, le fond en moyenne à 40 m en-dessous du niveau marin, cumulant à une profondeur maximale de 60 m environ (**Figure 38, Schmidt et al., 2000**). D'après la carte bathymétrique, le fond du lac est en pente douce au nord et au sud, tandis que les rives à l'est et à l'ouest sont abruptes. Les apports en eau sont principalement issus des précipitations à la surface du lac (pour environ 33 % des apports). La partie restante provient du bassin versant par ruissellement et par les sources karstiques sous-lacustres (*vruljas* en croate ; **Bonacci, 1993 ; Biondic, 1992**). L'afflux annuel moyen est estimé à 0,588 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> et l'évaporation annuelle moyenne de l'eau de surface à 1,153 mm/an (**Ožanić and Rubinić, 2003**). Les eaux du lac restent en moyenne entre 30 et 40 ans dans le bassin de Vrana avant d'être évacuées via un drain karstique<sup>14</sup> (**Hertelendi et al., 1997 ; Ožanić and Rubinić, 2003 ; Ozanic, 1996 ; Hertelendi, 1994**).

---

<sup>14</sup> Ponor



En réalité, les changements du niveau du lac sont co-dépendants en partie des variations du niveau marin. Ce dernier joue en effet un rôle de « balance hydraulique » avec les masses d'eau douces souterraines. D'autre part, en raison de sa situation hydrographique, le réservoir du lac Vrana est conditionné par les changements du niveau des eaux souterraines des aquifères karstiques environnants dépendants des régimes annuels de précipitations. **Bonacci (2015)** estime ainsi qu'il est compliqué de définir précisément les réservoirs d'eau du bassin versant, cela nécessiterait la surveillance en permanence d'une dizaine de piézomètres profonds.

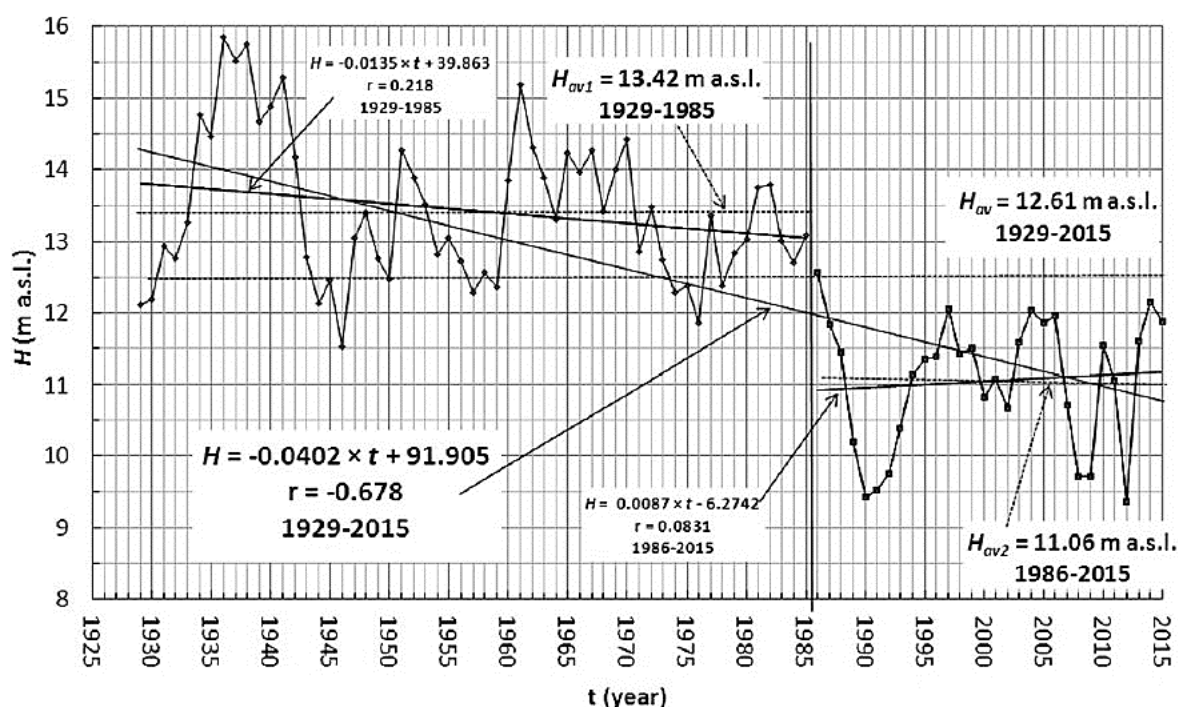


Figure 39. Evolution du niveau du lac Vrana entre 1929 et 2015 (**Bonacci, 2017**)

Le niveau du lac Vrana a largement évolué au cours des XX – XXIème siècles en raison de fortes activités anthropiques. Dès 1946, un système de pompage est construit afin de subvenir à la demande croissante en eau (**Katalinic et al., 2008 ; Bonacci, 2018**). En effet, Vrana représente une ressource précieuse pour fournir les populations autochtones et l'agriculture de Cres et de Lošinj. Depuis le début du XXIème siècle, la demande en eau n'a cessé de croître en raison de la hausse du tourisme (250 000 touristes en été). Actuellement,  $2,3 \cdot 10^6$  de  $m^3$ /an d'eau sont pompés dans le réservoir du lac (**Katalinic et al., 2008**). Les données hydrographiques mesurées en bordure depuis le début du XXème siècle indiquent un niveau moyen du lac de 13 m a.s.l entre 1929 et 1985, puis une chute à 10 m a.s.l entre 1986 et 2013 (**Figure 39**). Le lac a également enregistré deux baisses drastiques de son niveau en 1991 et 2012, avec une hauteur d'eau respectivement de 9,11 et 8,56 m a.s.l. Enfin, le maximum de niveau d'eau est de 16,86



m a.s.l enregistré en 1936. Depuis les années 80, le niveau ne cesse de diminuer à une vitesse de 48 cm/an (**Ozanic and Rubinic, 2003 ; Bonacci, 2015**).

Les différentes études menées sur les propriétés physico-chimiques des eaux de ce lac indiquent qu'il s'agit d'un lac dit « monomictique chaud » et « oligotrophe » (**Petrik, 1960 ; Bonacci, 1993 ; Bukvic et al., 1997 ; Ternjej et Tomec, 2005 ; Habdija et al., 2011 ; Kuhta and Zeljka, 2013**). Pendant l'été, la stratification thermique est stable tandis qu'au début de l'automne et en hiver, les vents froids provoquent un mélange complet des masses d'eau. La surface du lac n'est jamais englacée. Les températures des eaux varient entre 4 °C (hiver) et 25 °C (été) avec un épilimnion\* à une température constante de 8,7 °C à ~10 m et un hypolimnion\* à 10 °C entre 20 et 70 m. La zone euphotique\* se situe en moyenne à 10 m de profondeur (**Tomec et al., 1996**). Enfin la thermocline\* est enregistrée en été entre 10 et 20 m.

Les eaux du lac Vrana contiennent en moyenne 0,136 mg/l de carbonate de calcium, environ 10 µg/l de phosphore dans l'épilimnion (**Biondic et al., 1995**) et 72 mg/L de chlorures de sodium en raison de l'influence de la mer (**Bonacci, 2017**). Des vents violents (e.g. Bura, Jugo) transportent les embruns jusqu'à la surface du lac et dans tout le bassin versant. Les sels sont ensuite transportés dans le lac par ruissellement lors des épisodes pluvieux.

### III.1.2 Végétation aquatique

Les communautés végétales du lac Vrana sont très bien définies et organisées le long d'un gradient de profondeur. Les eaux les moins profondes sont peuplées d'une végétation submergée et de plantes vasculaires dont une ceinture d'hélophytes\* (**Figure 40, Alegro et al., 2016**). Vers 8 m et jusqu'à 30 m de profondeur se développe une végétation de charophytes dominée par *Chara aculeolata*, *Chara virgata* et *Nitella opaca*.

L'écosystème spécifique de Vrana lui confère d'appartenir au type d'habitat 3140 (eaux dures oligo-mésotrophes à végétation benthique d'espèces *Chara*\*), protégé par la directive Habitat. En raison de la présence de plusieurs espèces de charophytes en voie de disparition dans les Balkans et en Europe, le lac est un site important pour la conservation des charophytes\* aux niveaux national et européen (**Alegro et al., 2016**).

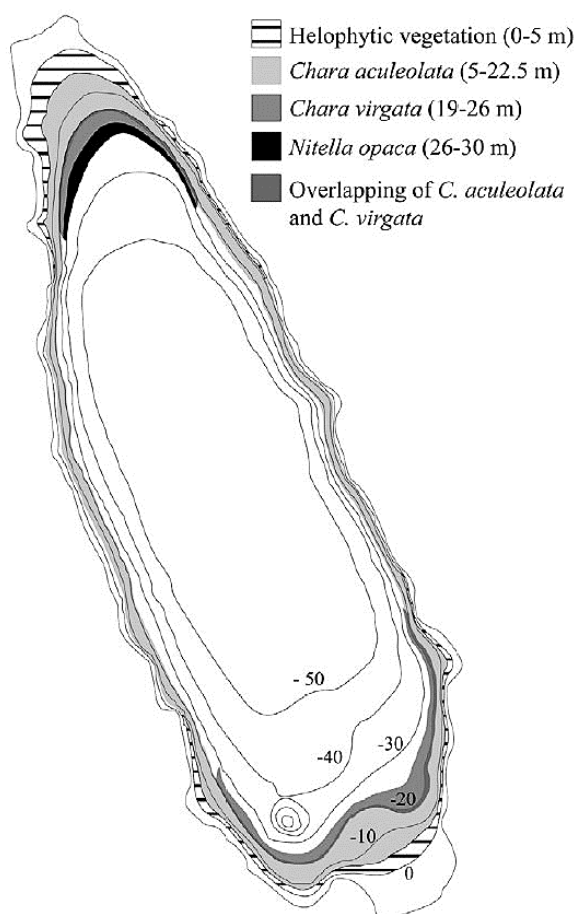


Figure 40. Carte de distribution de la végétation macrophytes de Vrana (Alegro et al., 2016)

### III.1.3 Nature et évolution des sédiments lacustres

Une précédente étude sur les sédiments du lac Vrana (Vra96, **Figure 38**) a permis d'accéder à l'histoire paléoclimatique et anthropique des 16 000 dernières années de l'île de Cres (Schmidt et al., 2000). L'analyse des assemblages de cladocères, des diatomées, des plantes macrofossiles, des pollens et géochimiques a mis en évidence d'importantes variations du niveau du lac Vrana dès la fin du Pléistocène et un impact anthropique précoce possible dès le Mésolithique. La fin du Pléistocène (14 000 – 13 600 BP) est marquée par une période froide, humide et érosive. À cette époque, le lac Vrana est peu profond mais son niveau fluctue largement entraînant une forte érosion des berges. Les sédiments lacustres sont régulièrement mélangés à des sédiments plus anciens remobilisés par les sources karstiques. Aucun niveau de sédiment ne semble attribuable à l'Allerød. Une discordance dans la sédimentation est confirmée avec l'analyse échographique du remplissage sédimentaire. Par rapport aux autres

sites méditerranéens, le Dryas récent (vers 10 600 BP), apparaît plus humide et suite à l'augmentation des précipitations, l'érosion du bassin versant s'accroît permettant le développement d'une végétation marécageuse. Le lac de Vrana devient un peu plus profond. Puis toujours selon **Schmidt et al., 2000**, au début de l'Holocène (Préboréal), l'augmentation de la productivité primaire et des taux d'accumulation entraîne d'importants bouleversements environnementaux avec une nette progression des macrophytes\* et chydorides\* littoraux. Dès le Néolithique voire l'âge du Bronze apparaissent les premières perturbations dans le bassin versant liées à l'utilisation du feu par l'homme pour défricher. Le milieu de l'Holocène (vers 8500 BP) est marqué par des conditions plus humides (8400 – 6000 BP) qui entraînent la mise en place du bassin profond et pérenne de Vrana tel qu'il est actuellement. Les conditions météorologiques plus douces avec des hivers moins froids, permettent notamment l'apparition du lierre (*Hedera helix*) et la progression des fougères. Un changement de composition dans les sédiments s'opère avec la dissolution de calcite peut être due à une faible productivité et à un apport d'eaux froides enrichies en CO<sub>2</sub>. Ceci a également entraîné une baisse des taux de sédimentation et une proportion plus importante des silicates. Entre 6000 et 4000 BP, les espèces méditerranéennes se développent au profit des forêts de chêne décidus. Vers 4200 BP, le chêne vert (*Quercus ilex*) progresse brusquement favorisé par des étés plus secs et le défrichement des forêts. Enfin, à l'Holocène récent, les changements observés dans la végétation sont principalement liés aux activités humaines. L'augmentation de la sécheresse estivale, associée au défrichement des forêts à l'époque illyrienne, est probablement à l'origine du passage à la végétation de chênes à feuilles persistantes dans le bassin versant du lac. Il est aussi observé une augmentation des pâturages de l'olivier (*Olea*) et de la vigne (*Vitis*). Enfin, l'utilisation accrue des terres aux époques romaine et post-romaine a provoqué une augmentation du niveau trophique du lac. **Schmidt et al., 2000** concluent par la re-oligotrophisation du lac Vrana produite à la suite de changement dans l'utilisation des terres et l'abandon d'une bonne partie des cultures.

Une autre étude sur les paléopollutions des 3000 dernières années a mis en évidence un enrichissement en polluants atmosphériques tel que le plomb dans les sédiments de Vrana (**Figure 41 ; Miko et al., 2005**). Les résultats obtenus du ratio Plomb/Scandium de la carotte de surface VS-8 ont montré une érosion des sols et des paléosols à la période pré-Holocène. Les sédiments sont riches en calcite (>60 %). À l'époque romaine le fort ratio Pb/Sc est en lien avec la phase d'exploitation minière romaine connue à l'échelle de l'Europe (**Kempton et al., 2007 ; Shotyky et al., 2002**). Le plomb anthropogénique atteint 60 % de la concentration en Pb

total. Le taux de sédimentation passe de 0,1 mm/an (période pré-romaine, âge Illyrien) à 0,8 mm/an (WPD) (Miko et al., 2008, 2005). Puis, un déclin à la période post-romaine entraîne d'importants changements de l'utilisation des terres. Cette détérioration est la conséquence d'une déforestation accrue qui correspond à la période de migration entre 400 et 900 AD. Entre 1400 – 1650 AD, la réduction de la couverture végétale et la détérioration des conditions climatiques (climat froid, grande fréquence des tempêtes en mer dans l'Adriatique ; Camuffo et al., 2011) due à une absence de taches solaires (minimum Sporer) provoquent une érosion intensive dans le bassin versant. La composition des sédiments change et devient plus riche en quartz et argile (70 %), en dolomite (10 %) et plus pauvre en CaCO<sub>3</sub> (<5 %) (Schmidt et al., 2000). Enfin, la sédimentation moderne est marquée par de forts ratios de Pb/Sc induit d'une importante pollution anthropogénique.

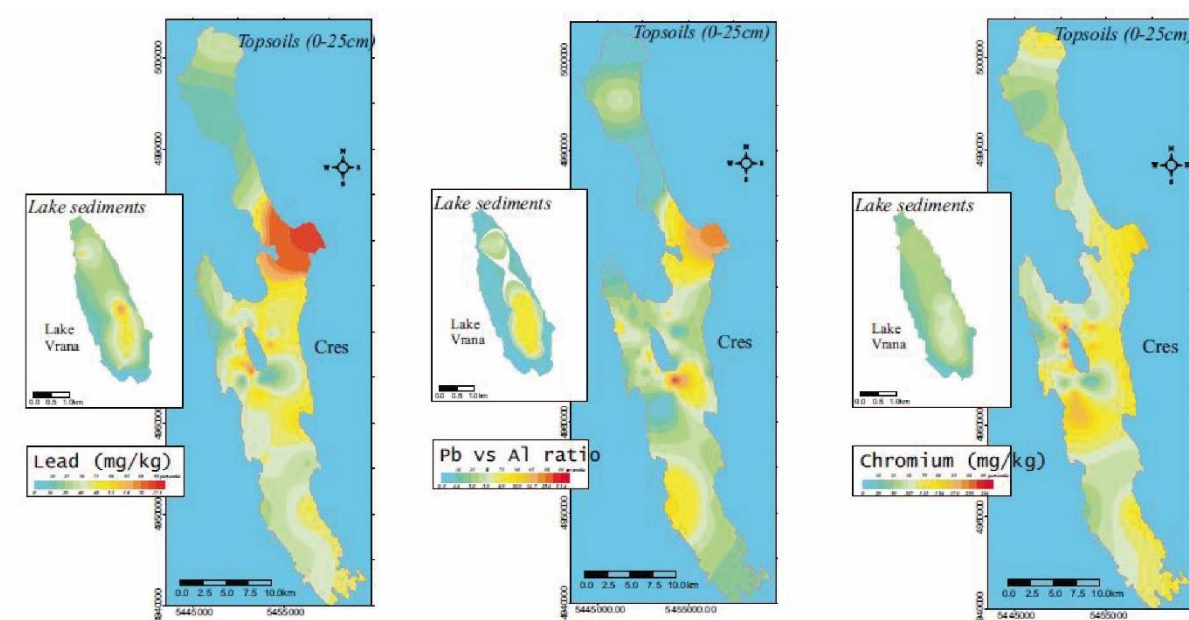


Figure 41. Carte de la distribution géochimique du Pb, du ratio Pb/Al et du Cr dans les sols de l'île de Cres et des sédiments de surface de Vrana (Miko et al., 2003)

Pour la période actuelle, le dragage des sédiments de surface du lac Vrana a permis de discriminer deux principaux types de sédiments et leur distribution sur le fond du lac (Miko et al., 2003) :

1. les sédiments près des rives escarpées du lac composé de sables carbonatés (Ca 10 %) et à faible teneur en MO (<5 %) ;
2. les sédiments au centre du lac constitués de silts plus riches en matière organique (>10 %) et plus pauvres en CaO (<10 %).

Actuellement, les sédiments riches en carbonates et pauvres en magnésium proviennent principalement de l'altération des rives sud et sud-ouest du lac, composées de roches dolomitiques. Cette érosion s'est notamment accentuée ces derniers siècles suite aux déforestations successives et à la diminution de l'épaisseur des sols par les pratiques agropastorales passées. Les sédiments plus anciens, riches en Ca mais pauvres en Mg, ont comme principal processus de formation la précipitation de CaCO<sub>3</sub> (Miko et al., 2003).

Les sédiments lacustres de surface de Vrana sont riches en Ca, Sr, Cd, Pb, Ba, Mg et pauvres en Cu, P, Fe, Cr et La. Ces éléments sont apportés principalement par deux sources : d'une part, la pollution atmosphérique longue distance (Shotyk et al., 1998 ; Bränvall et al., 2001), en particulier pour le plomb (31 mg/Kg) ; d'autre part, depuis le bassin versant, par exemple le plomb provient en grande partie du transport routier, le cuivre et le mercure (107 µg/Kg) d'industries agrochimiques. (Miko et al., 2003).

Dans les sols environnants le zinc et en partie le cuivre sont présents (20 – 30 %) en raison des vignobles abandonnés dans les parties nord et sud du lac ; le fer et le chrome (moy 121 mg/Kg) dus à des processus pédogéniques naturels de rubification\* (caractéristique des sols des régions méditerranéennes). Enfin, l'enrichissement en chrome et vanadium peut être issu de dépôts de bauxite de mines dans la partie NO du lac Vrana (Miko et al., 2003).

Les derniers travaux sur les sédiments du lac Vrana proviennent de la thèse d'Ijlanic (2014). L'étude minéralogique, géochimique, granulométrique, de la susceptibilité magnétique et de la spectrocromimétrie sur la carotte VRA-1A (Figure 38) a permis de caractériser la succession sédimentaire. De la fin du pléistocène et jusqu'à l'holocène moyen, ce sont des matériaux principalement siliclastiques qui se déposent remplacés par la précipitation de carbonates à partir de 4500 BP. La période entre 8000 et 7500 BP et entre 7200 et 6600 BP, se caractérise par une augmentation des apports de matière provenant du bassin versant et coïncide avec des vitesses de sédimentation plus importantes dans les enregistrements de bordure du lac Vrana. Le niveau actuel du lac (entre +9 et +12 m a.s.l) ne s'est mis en place qu'à partir de 3200 BP et il n'a jamais atteint plus de +15 m d'altitude.

### III.1.4. VRA\_2018

Afin d'obtenir la totalité du remplissage sédimentaire, le forage de 2018 a été effectué dans la zone bathymétrique la plus importante correspondant à environ 58 m de profondeur d'eau. Les profils sismiques (**Figure 42**) obtenus de **Schmidt et al., 2001** ont permis de placer le point de forage où les sédiments de fond ne semblaient pas perturbés par des déplacements et déformations sous-marines de type « *slumps* ». Le profil obtenu dans la partie centrale du lac (**Figure 42.a**) permet d'observer une accumulation d'environ 50 m de sédiment où se distinguent plusieurs unités sédimentaires (Y à V) relativement planes sans perturbations particulières au contraire des zones sur les pentes ou en bas de pente (**Figure 42.b**).

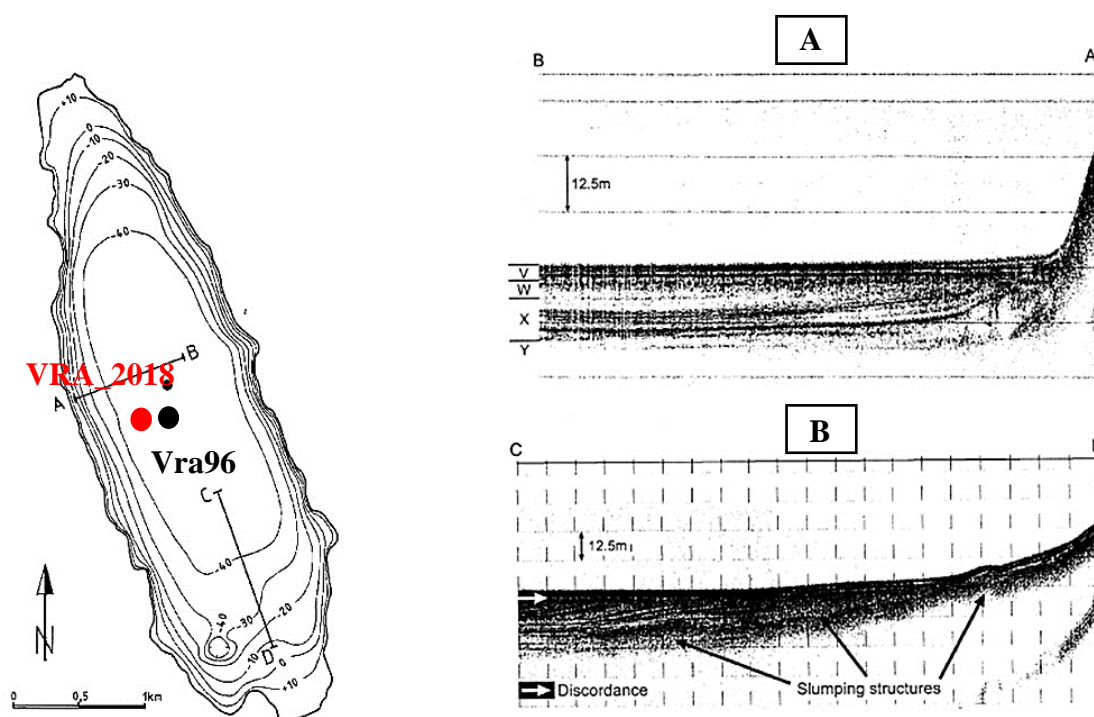
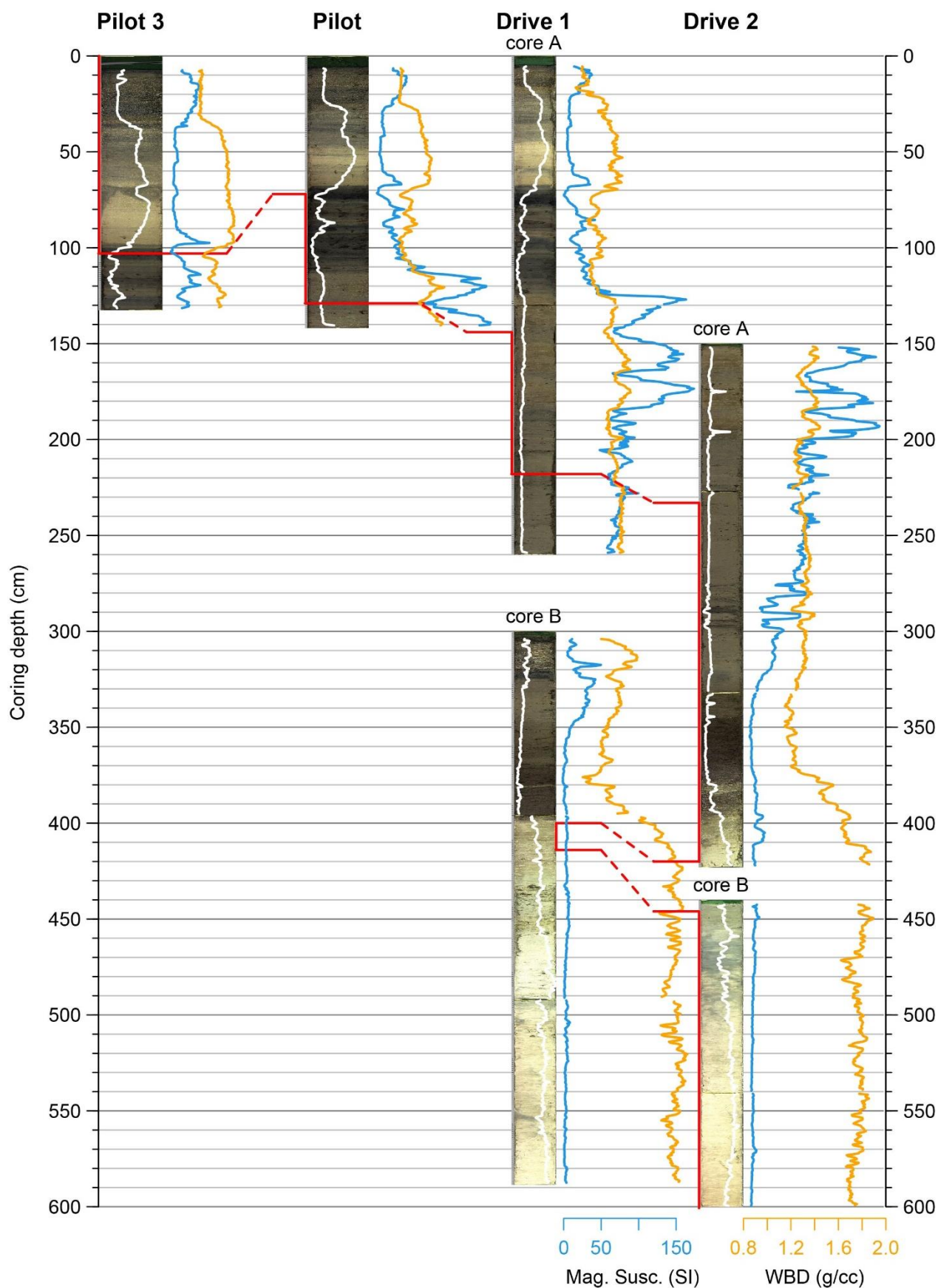


Figure 42. Localisation des forages VRA\_2018 et VRA96 et profils sismiques à 3,5 kHz obtenus de **Schmidt et al., 2001**. (A) dans la partie centrale du lac Vrana ; (B) en zone côtière avec localisation des discordances (*slumps*).

### III.1.5 Résultats

#### III.1.5.1 Carotte composite

L'établissement d'une carotte composite (Master Core) permet de s'affranchir de certains problèmes survenant lors de l'extraction des carottes sédimentaires, et notamment des lacunes



*Figure 43. Etablissement de la carotte composite VRA\_2018 à l'aide de données de susceptibilité magnétique (courbe bleue), du L\* (courbe blanche) et de la densité (courbe jaune)*

une carotte composite de 582 cm a été établie à partir de plusieurs données obtenues (susceptibilité magnétique, densité du sédiment et  $L^*$  ; **Figure 43**). Dans la suite de ce manuscrit, la séquence est appelée VRA\_2018.

### III.1.5.2 Sédimentologie de la carotte VRA\_2018

La séquence VRA\_2018 a été divisée en sept unités lithologiques distinctes comprises entre 0 et 582 cm principalement identifiées de visu par leurs variations de couleur et confirmées par d'autres paramètres de couleur du sédiment tel que la réflectance ( $L^*$ ). L'ensemble des unités sont décrites suivant le type de sédiment (couleur/texture/granulométrie), leur teneur en eau et leur densité (**Figure 44**) ainsi que leur contenu en macrorestes dans le **Tableau 3**. Le paramètre de densité mesuré à l'aide du banc de diagraphie Geotek® est très bien corrélé à la teneur en eau calculée après échantillonnage de la carotte ( $R^2 = 0,96$ ), ce qui montre une bonne distribution statistique et donc une bonne fiabilité des mesures.

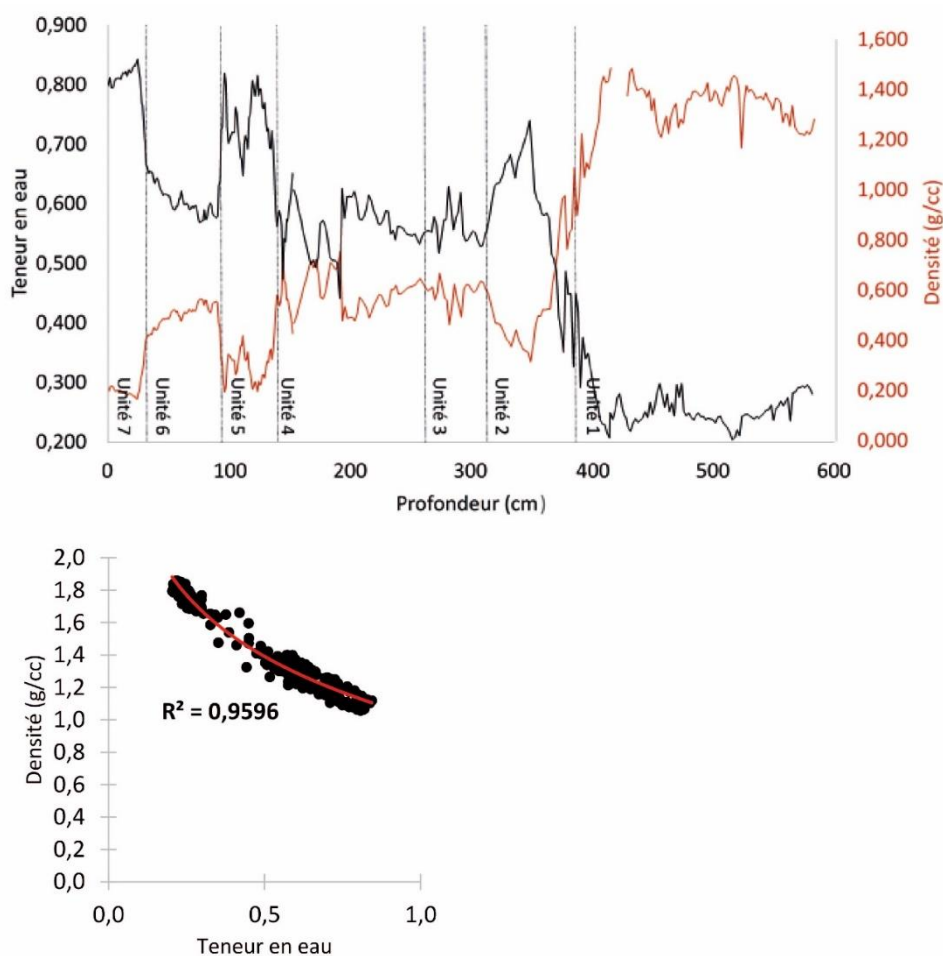







Figure 44. Variation de la teneur en eau (w/w) et de la densité g/cc) le long de la séquence VRA\_2018 (582 cm) avec la figure de corrélation entre les deux paramètres.



Unité	Profondeur (cm)	Couleur	Description (Texture, granulométrie, composition...)  * Les valeurs présentent en () sont exprimées en cm	Macrorestes  (Annexe 11, 12 et 13)  * Les valeurs présentent en () sont exprimées en cm
<p>* les photos sont à la même échelle</p> <p>1</p> 	582 – 386,5	Grisâtre	Le sédiment est argileux gris à gris-bleu et les laminations peu visibles (très homogène). Il apparaît compact voire massif sur le dernier mètre (densité élevée ~ 1,4 g/cc) et a une très faible teneur en eau (20 % en moyenne). Il réagit fortement à HCL ce qui indique une forte teneur en carbonates. Il a été également noté dans certains niveaux la présence de graviers carbonatés (410 à 404, 398 à 386).	Très peu de macrorestes sont présents dans les sédiments pour cette unité : un petit morceau de bois (484) et des restes de racines (entre 594 et 500 et 459).
<p>2</p> 	386,5 – 309,5	Brun-noir à gris	Le sédiment est argileux variant d'un brun-noir très collant et peu compact entre 374 et 309,5 cm à un sédiment très compact entre 390 et 374 cm. Dans cette unité, la teneur en eau augmente fortement avec des valeurs proches de 70 % à environ 346 cm avant de redescendre à 50 % à 309,5 cm. La densité chute de 1,4 à 0,3 g/cc entre 415 et 349 cm.	Présence d'une feuille et d'une brindille (345,5 ; 332), de plusieurs morceaux de bois (369,5 ; 357,5 et 349,5), de graines de nénuphars (376,1 ; 357,5 ; 354 ; 340 ; 336), d'un charbon (354), de restes de végétaux aquatiques (342,5 à 309,5), de gastéropodes (354 à 350), d'ostracodes et de fragments coquillés (348 à 324).
<p>3</p> 	309,5 – 261,5	Gris-brun	Le sédiment est argileux et très organique voire tourbeux à laminations milli- à centi-métriques. Il a été relevé la présence de sidérites (307,5) ainsi que de fissures de dégazage (entre 268 et 261,5). Les valeurs de la teneur en eau restent relativement stables autour de 54 % et la densité remonte très légèrement à 0,6 g/cc.	Présence de nombreux restes de végétaux aquatiques (entre 309,5 et 270,5) et de quelques ostracodes et charophytes.
<p>4</p> 	140 – 261,5	Grisâtre à marron clair	Le sédiment est organique et argileux avec la présence de quelques graviers (entre 172 et 170) et de fissures de dégazage (entre 261,5 et 216). Certains niveaux sont également riches en sidérite (171,5 à 165,5 ; 159,5 à 157,5 et 141,5 ; analyse au MEB pour confirmer ce minéral - voir <b>Annexe 10</b> ). La teneur en eau varie beaucoup plus dans cette unité. Elle augmente progressivement à 61 % à 197,5 cm avant de chuter brusquement à 44 % à 191,5 cm puis remonte en dent de scie jusqu'à 69 % à 135,5 cm. Malgré une courbe en « dents de scie », la densité reste relativement stable entre 0,5 et 0,6 g/cc.	Présence d'un morceau de bois (146), d'une feuille (164,5), de charbons (entre 160 et 157 et à 146), d'ostracodes et de charophytes.
<p>5</p> 	140 – 93,5	Gris-brun/Noir	Le sédiment est sombre très finement varvé (laminations milli- à centi-métriques) dont plusieurs niveaux de boue organique noire plus ou moins carbonatée. Dans cette unité, la teneur en eau devient plus importante variant entre 70 et 80 %. La densité baisse subitement à 0,2 g/cc.	Présence de nombreux petits morceaux de bois (135 ; 130 ; 125 ; 123 ; 112,5 ; 110,6 ; 110 ; 107 et 101), d'une feuille (96), de restes de plantes (103), d'un charbon (127) et de nombreux ostracodes et charophytes.



<p>6</p> 	<p>93,5 – 32,5</p>	<p>Jaune/grisâtre</p>	<p>Le sédiment est carbonaté (calcite) avec quelques laminations millimétriques. Réaction forte à l'HCL. La teneur en eau diminue à nouveau vers des valeurs moyenne à 60 %. A contrario, la densité augmente à 0,5 g/cc.</p>	<p>Présence de nombreux charophytes, morceaux de bois (91 ; 53) et d'une brindille (76).</p>
<p>7</p> 	<p>32,5 – 0</p>	<p>Marron clair à sombre</p>	<p>Le sédiment est très laminé (laminations millimétriques) avec une très forte teneur en eau (80 % en moyenne). La densité diminue à de très faibles valeurs autour de 0,2 g/cc.</p>	<p>Présence de nombreux ostracodes et charophytes sur l'ensemble de l'unité, quelques tubes en calcite (ver lacustre ; entre 27,5 et 25,5 cm), et un fragment de bois (30,5).</p>

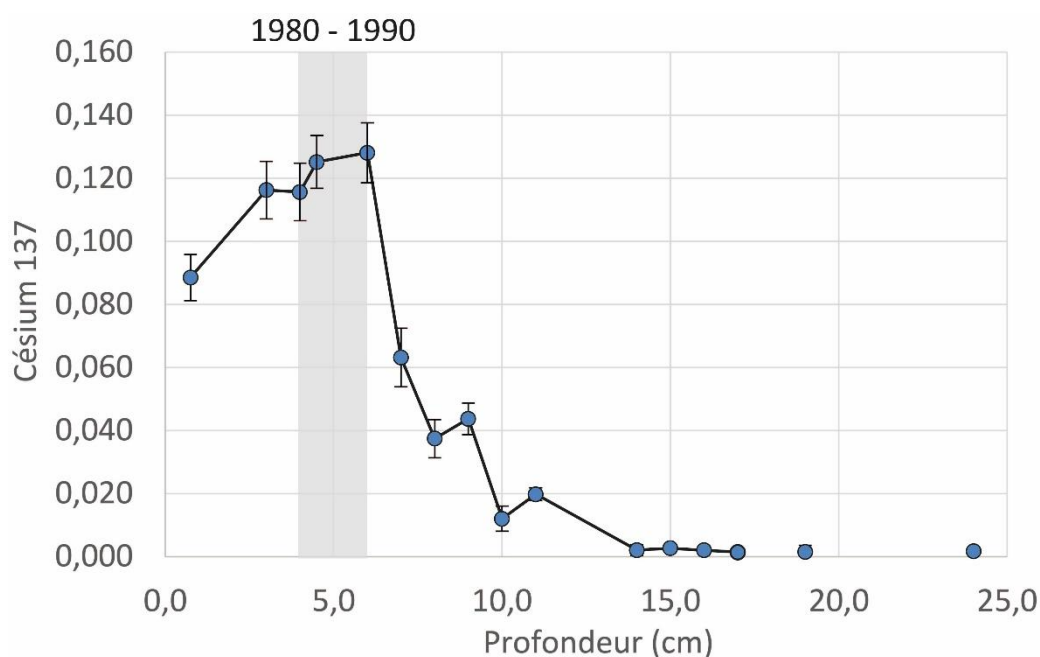
Tableau 3. Description lithologique des unités sédimentaires de la séquence VRA\_2018

### III.1.5.3 Modèle d'âge/profondeur

La chronologie récente des vingt-cinq premiers centimètres a été établie à l'aide d'un modèle au plomb dit CRS (Constant Rate of Supply, **Figure 45** et **46**). Une décroissance progressive de l'activité du plomb peut être observée jusqu'à 25 cm (**Figure 46**). En parallèle, un maximum de Cs<sup>137</sup> est observé entre 4 et 6 cm correspondant aux années 1980 ce qui apparaît en contradiction avec le modèle CRS obtenu (**Figure 45**). Cependant, cette tendance du césium 137 est similaire à d'autres acquises en Croatie (par ex. [Horvatinci et al., 2014](#) sur le lac de Plitvice en Croatie de l'Est) où un maximum d'activités du <sup>137</sup>Cs est également enregistré dans les années 1980. L'hypothèse alors émise est celle que le césium 137 dans les sédiments du lac Vrana provient de l'érosion des sols. En effet, les retombées radioactives de césium 137 déposées dans le paysage à la suite d'essais nucléaires atmosphériques sont fortement absorbées par les particules du sol, limitant leur mouvement par des processus chimiques et biologiques. La plupart des mouvements de césium 137 dans l'environnement se font donc par des processus physiques. Il peut être alors utilisé comme un traceur de l'érosion et de la sédimentation. Ainsi, le choix a été fait d'exclure les données du <sup>137</sup>Cs du modèle d'âge finale. L'âge estimé à 25 cm à l'aide du plomb 210 est donc d'environ 1884 cal. AD (66 cal. BP).

La chronologie profonde de VRA\_2018 a été définie sur la base de 34 datations par le radiocarbone obtenu par spectrométrie de masse par accélérateur au centre de datation au radiocarbone ARTEMIS (Lyon, France), au laboratoire de radiocarbone de Poznań (Pologne)

et au laboratoire de physique des faisceaux ioniques de Zurich (**Figure 47 ; Tableau 4**). La plupart des datations ont été effectuées sur des macrorestes de végétaux continentaux nettoyés des carbonates et identifiées à l'aide d'une loupe binoculaire (**Annexe 1**). D'autres datations ont été menées sur le sédiment totale préalablement décarbonaté. Enfin, ces datations ont été complétées par six autres dates (**Tableau 4**) provenant de la corrélation stratigraphique de VRA\_2018 avec les séquences Vra96 (**Schmidt et al., 2000 et 2001**), VRA-1A (**Ilijanić, 2014**) prélevées à proximité (**Figure 38, 47 et 48**). Les deux dates obtenues de la corrélation de VJ-8 (**Miko et al., 2008**) ont été rejetées en raison du modèle d'âge au plomb plus fiable obtenu avec la séquence VRA\_2018.



*Figure 45. Activité du césium 137 mesurée sur les 25 premiers centimètres de la séquence de la Vrana (VRA\_2018)*

Les âges radiocarbone ont été convertis en âges calendaires calibrés selon la courbe de calibration IntCal2020 (**Reimer et al., 2020**). Le modèle d'interpolation a été obtenu avec le programme BACON pour le logiciel R (**Blaauw, 2013**). La séquence VRA\_2018 permet ainsi de documenter la période comprise entre la fin du Pléistocène et la période actuelle (**Figure 47**). L'âge du début de la séquence reste difficile à estimer malgré les données disponibles. Les études précédentes dont celle de **Schmidt et al., 2000** proposaient un âge du lac à 17 500 ans à 5 m, sous-estimé selon **Šegota & Filipic (2001)** (**Figure 48**). Ce résultat est à prendre avec prudence en raison de la faible quantité de matière organique datée. En effet, cette date a été

obtenue sur un intervalle de sept centimètres. Dans les travaux d'Ilijanić, 2014, des coquilles à 521 et 733 cm ont donné des dates à plus de 41 550 cal. BC (43 500 cal. BP). La principale difficulté pour dater les sédiments du lac Vrana en-dessous de 370 cm repose donc sur l'obtention de suffisamment de matériel terrestre datable. Dans le cadre de cette étude, la datation la plus ancienne obtenue a été menée sur un échantillon de sédiment total préalablement décarbonaté prélevé à 531 cm.

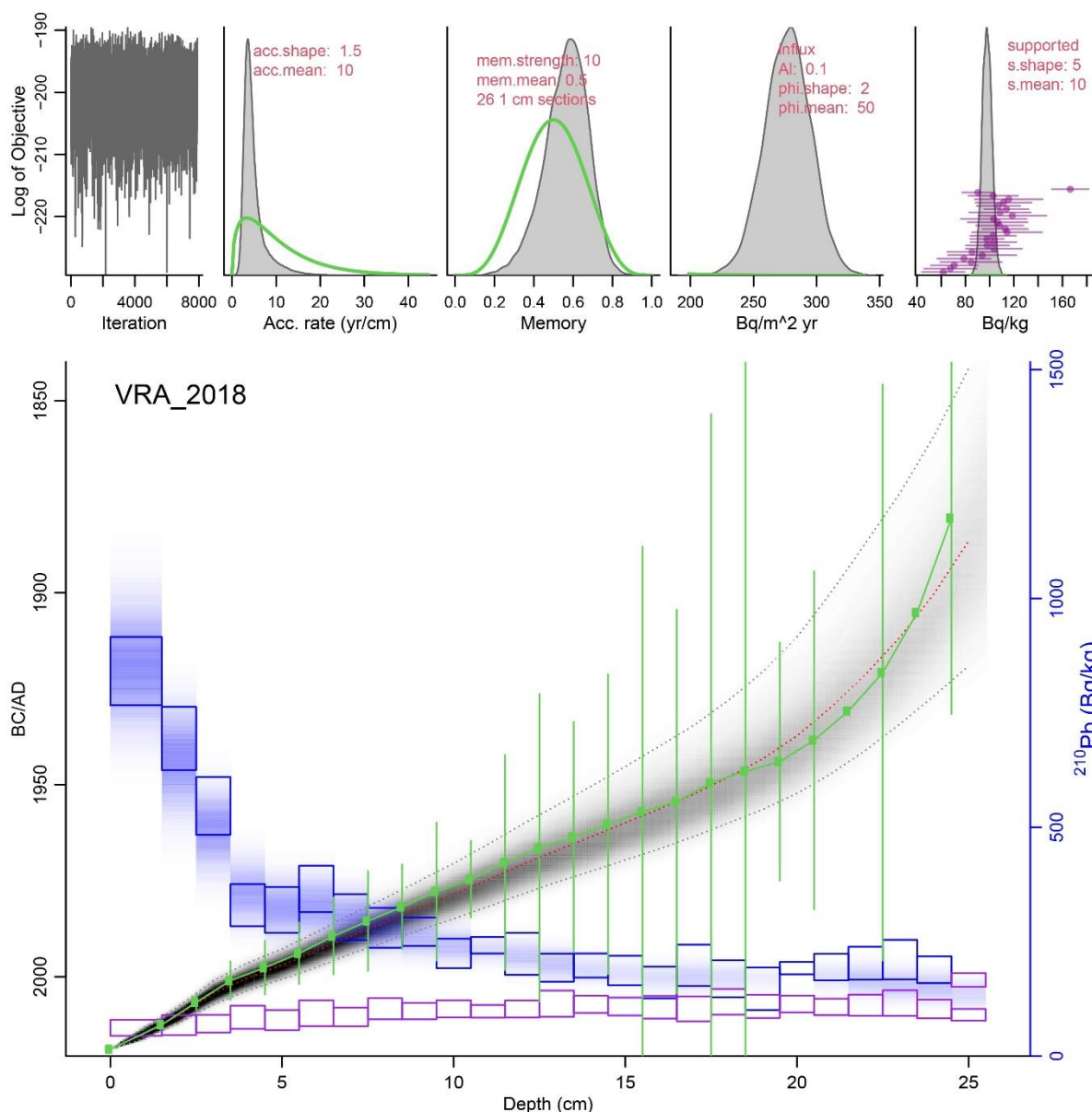


Figure 46. Modèle d'âge au plomb du lac Vrana (VRA\_2018), tracé à l'aide de package BACON intégré dans Rstudio comprenant la courbe du plomb totale (violet), le radon en équilibre (rose) et le modèle d'âge CRS obtenu manuellement sous Excel (vert) et calculer avec PLUM (gris)

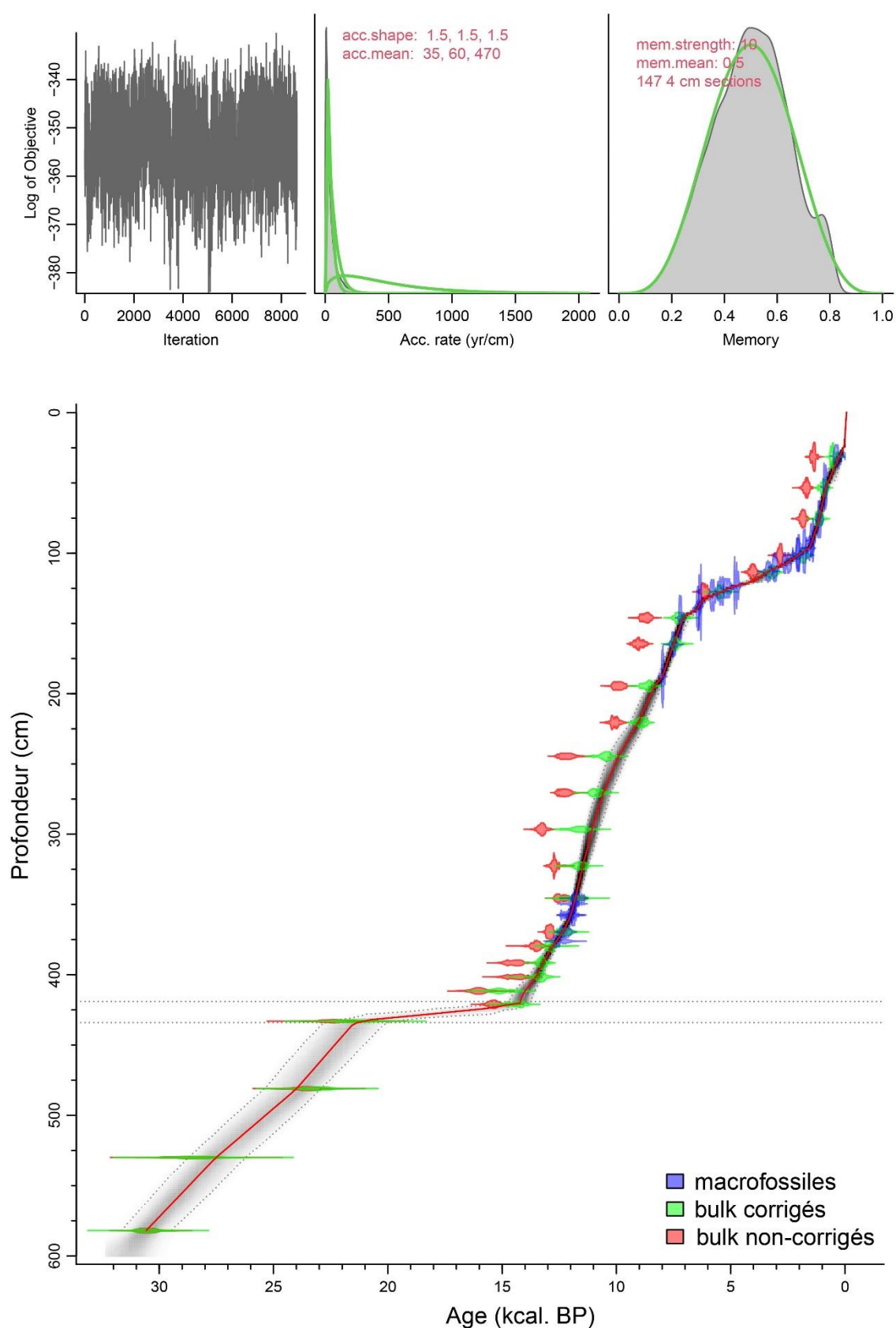


Figure 47. Modèle d'âge/profondeur de VRA\_2018 établi d'après les datations des macrorestes terrestres (bleu) et de datations sur sédiment total corrigées de l'effet réservoir (non-corrigées en rouge et corrigées en vert)

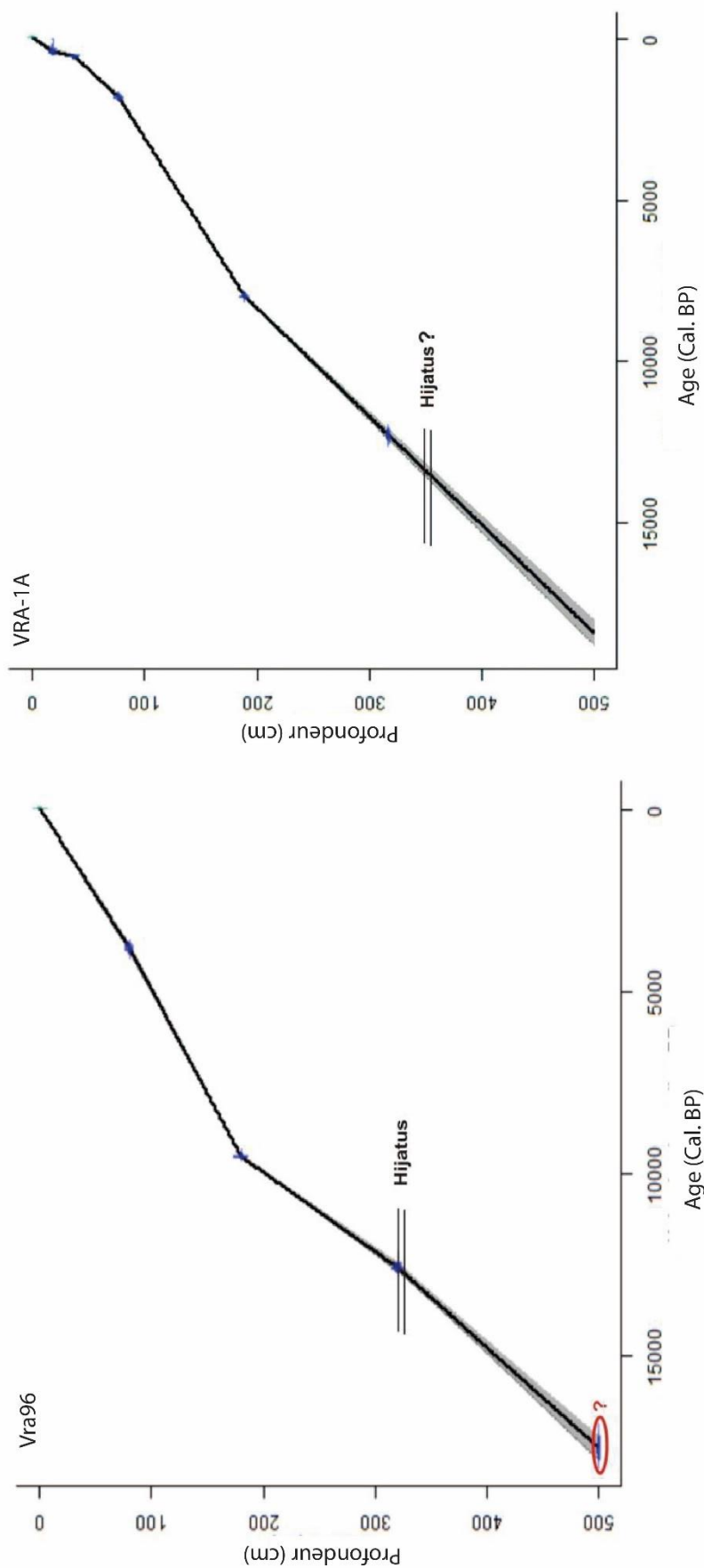


Figure 48. (Gauche) Modèle d'âge obtenu par Schmidt et al., 2000 sur la séquence Vra-96; (Droite) Modèle d'âge établi dans les travaux d'Ilijanić, 2014 sur la séquence VRA-1A. Illustration obtenue des travaux d'Ilijanić, 2014

Code laboratoire	Profondeur (cm)	Matériel	Age 14C ± 1σ (BP 1950)	Intervalles calibrés à 2σ	Référence
VJ-8_18	12.5	Charbon	300 ± 25	AD 1500 – 1655	Miko et al., (2008)
VJ-8_37	25.8	Brindille	500 ± 40	AD 1325 – 1455	Miko et al., (2008)
ETH-116917.1.1	31	Bois	310 ± 60	AD 1448 - 1671	Cette étude
SacA-58490	53	Bois	975 ± 30	AD 1013 – 1155	Cette étude
Poz-129840	76	Brindille	1195 ± 30	AD 705 – 950	Cette étude
Poz-138258	91	Bois	1545 ± 35	AD 432 - 595	Cette étude
ETH-116918.1.1	96,5	Feuille/bois	1670 ± 60	AD 307 - 541	Cette étude
GdA-3300	98.5	Charbon	1870 ± 25	AD 120 – 235	Ilijanić (2014)
SacA-58491	100	Plante	2080 ± 30	BC 191 – 3	Cette étude
SacA-58492	101	Bois	2110 ± 30	BC 204 – 46	Cette étude
SacA-58493	107	Bois	2445 ± 30	BC 753 – 410	Cette étude
SacA-58494	110	Bois	2920 ± 30	BC 1211 – 1020	Cette étude
ETH-116920.1.1	113	Bois	3140± 70	BC 1535- 1218	Cette étude
Ua-13660	117,8	Sédiment total	3515 ± 80	BC 1900 – 1700	Schmidt et al., 2000
SacA-58495	123	Bois	4220 ± 30	BC 2905 – 2696	Cette étude
SacA-58496	125	Bois	4480 ± 30	BC 3341 – 3030	Cette étude
SacA-61064	127	Charbon	4710 ± 40	BC 3629 – 3372	Cette étude
SacA-58497	130	Bois	5030 ± 30	BC 3945 – 3714	Cette étude
SacA-58498	135	Bois	5525 ± 30	BC 4449 – 4334	Cette étude
SacA-62538	139,3	Bois	5660 ± 30	BC 4581 – 4369	Cette étude
SacA-58499	146	Charbon	6265 ± 30	BC 5320 – 5084	Cette étude
<b>ETH-117134.1.1</b>	<b>146</b>	<b>Sédiment total</b>	<b>7860 ± 110</b>	<b>BC 7044- 6497</b>	<b>Cette étude</b>
ETH-116919.1.1	165	Feuille	6630 ± 80	BC 5714- 5472	Cette étude
GdA-3301	187,8	Charbon	7155 ± 30	BC 8018 – 7937	Ilijanić (2014)
<b>ETH-117135.1.1</b>	<b>194,5</b>	<b>Sédiment total</b>	<b>8840 ± 110</b>	<b>BC 8244- 7647</b>	<b>Cette étude</b>
Ua-13661	241,1	Sédiment total	8585 ± 45	BC 7684- 7535	Schmidt et al., 2000
<b>ETH-117136.1.1</b>	<b>244,5</b>	<b>Sédiment total</b>	<b>10 350 ± 130</b>	<b>BC 10 679 – 9789</b>	<b>Cette étude</b>
<b>ETH-117137.1.1</b>	<b>296,5</b>	<b>Sédiment total</b>	<b>11 370 ± 140</b>	<b>BC 11 561 – 11 104</b>	<b>Cette étude</b>
SacA-61065	270,5	Matière végétale aquatique	10 165 ± 50	BC 10 022 – 9461	Cette étude
SacA-61066	290,5	Matière végétale aquatique	10 380 ± 45	BC 10 531 – 10 049	Cette étude
SacA-62535	328,5	Matière végétale aquatique	10 540 ± 45	BC 10 737 – 10 526	Cette étude
GdA-3302	331,2	Charbon	10 400 ± 35	BC 12 420 – 12 078	Ilijanić (2014)
SacA-61067	343,5	Matière végétale aquatique	10 375 ± 45	BC 10 529 – 10 049	Cette étude
SacA-62539	345,5	Brindille	10 130 ± 50	BC 9989 – 9454	Cette étude
<b>ETH-117138.1.1</b>	<b>345,5</b>	<b>Sédiment total</b>	<b>10 510 ± 130</b>	<b>BC 10 779 – 10 041</b>	<b>Cette étude</b>
SacA-61068	349,5	Bois	10 200 ± 50	BC 10 143 – 9694	Cette étude
SacA-62536	357,5	Graines (Nymphaea)	10 215 ± 45	BC 10 146 – 9706	Cette étude
SacA-61069	357,5	Bois	10 285 ± 45	BC 10 502 – 9878	Cette étude
SacA-62537	369,5	Bois, débris	10 375 ± 45	BC 10 529 – 10 049	Cette étude
Ua-11252	376,1	Fruit/graine	10 620 ± 125	BC 10 819 – 10 147	Schmidt et al., 2000

ETH-117139.1.1	379,5	Sédiment total	11 630 ± 150	BC 11 842 – 11 281	Cette étude
ETH-117140.1.1	434	Sédiment total	18 450 ± 480	BC 21 401 – 19 068	Cette étude
SacA-61063	459	Racines	10 460 ± 45	BC 10671 – 10153	Cette étude
ETH-117141.1.1	482	Sédiment total	19 510 ± 390	BC 22 378 – 20 579	Cette étude
Ua-11253	597,8	Détritus organique	14 445 ± 45	BC 15 888 – 15 455	Schmidt et al., 2000
SacA-62586	525	Racines	10 320 ± 45	BC 10 518 – 9986	Cette étude
ETH-117142.1.1	531	Sédiment total	24 350 ± 730	BC 28 081 – 25 316	Cette étude

Tableau 4. Résultats des datations au radiocarbone des sédiments du lac de Vransko Jezero (VRA\_2018). Les datations corrigées d'un âge réservoir ont été surlignées en gris et celles rejetées sont en jaune.

*Remarque : Un soin particulier a été pris pour tenter de corriger les datations d'un « âge réservoir ». Pour ce faire, pour certaine profondeur, deux échantillons de nature différente (dont un était obligatoirement un macroreste végétale terrestre) ont été prélevés et datés séparément afin de calculer la différence d'âge obtenu. Ce « carbone mort » varie ainsi le long de la séquence VRA\_2018 au maximum de 1600 ans entre 531 et 434 cm et entre 328,5 et 146 cm. Cet âge réservoir est réduit entre 380 et 200 ans à 379,5 cm et entre 345,5 et 328,5 cm. Pour les autres profondeurs, l'âge réservoir est nul. Cette estimation a ainsi permis la correction de certaines datations trop anciennes menées sur du sédiment total ou de la matière végétale non-identifiée quand cela était justifié (Figure 47 ; les dates corrigées de l'effet réservoir ont également été surlignées en gris dans le Tableau 4).*

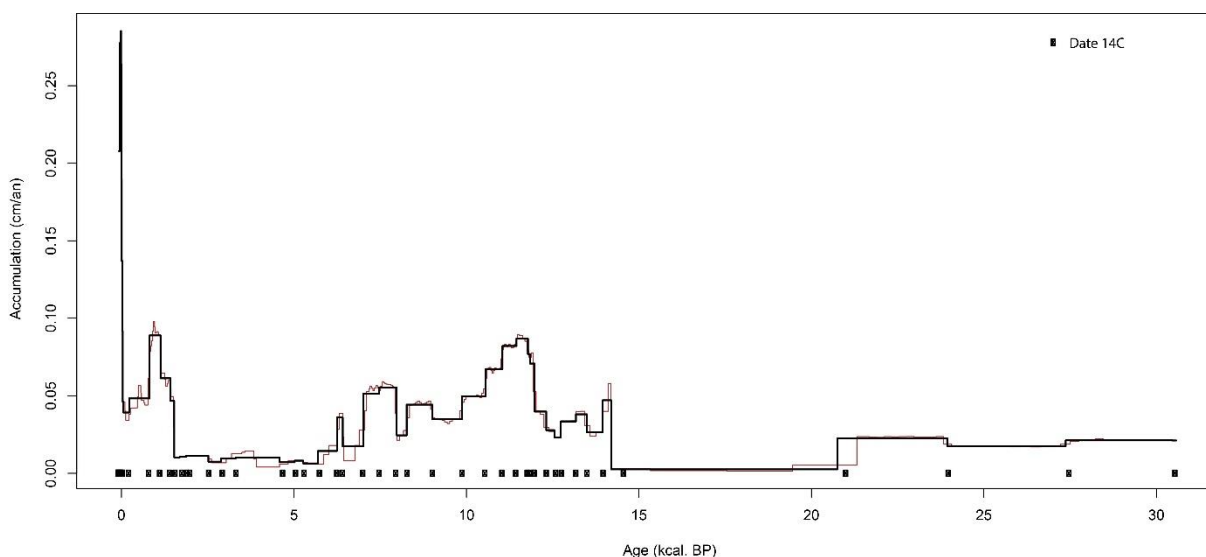
Les sédiments seraient donc datés à la profondeur de 531 cm à 22 400 cal. BC (24 350 cal. BP). Ainsi, par extrapolation la base de la carotte VRA\_2018 serait datée à 28 550 cal. BC (30 500 cal. BP). Cette date apparaît donc beaucoup plus ancienne par rapport aux études antérieures (Figure 48). Cependant, au regard des nouvelles datations radiocarbone obtenues sur la séquence VRA\_2018, le modèle d'âge de Schmidt et al., 2001 présente un certain décalage sur le sommet de plusieurs milliers d'années en raison d'un nombre de dates radiocarbone insuffisantes et de l'interpolation entre chacune d'elles (Figure 48). Certains changements de sédimentation ne sont donc pas décelés. L'âge du début de la séquence de Vrana est donc plausible mais reste à confirmer par d'autres datations radiocarbone corrigées de l'âge réservoir et/ou en utilisant d'autres méthodes de datation (par exemple en datant des culots de pollen ou des téphras, etc.).

Par ailleurs, les datations obtenues de la séquence VRA\_2018 semblent montrer un écart important entre 433 cm (18 450 cal. BP) et 421 cm (12 860 cal. BP) suggérant la présence d'un hiatus à ces profondeurs comme le suggère déjà Schmidt et al., 2001 et Ilijanić, 2014. D'autres



marqueurs mesurés (ex. spectrocolorimétrique, palynologique, macrocharbons de bois, etc.) tendent d'ailleurs à montrer des décalages ou plateaux de données aberrants dans cette zone (décrit dans la suite de ce manuscrit).

Ainsi, le taux de sédimentation estimé à l'aide du modèle d'âge-profondeur montre plusieurs grandes variations au cours des 30 500 dernières années environ (**Figure 49**). En effet, celui-ci varie dans des gammes de valeurs comprises entre 0 cm.a<sup>-1</sup> de 4050 à 2050 cal. BC (6000 à 1900 cal. BP) et 0,28 cm.a<sup>-1</sup> entre 1950 et 2018 cal. AD (0 – (-)68 cal. BP). Les plus forts taux sédimentation sont enregistrés principalement sur les 2000 dernières années environ et entre 12 550 et 4050 cal. BC (14 500 – 6000 cal. BP).



*Figure 49. Taux de sédimentation en cm/an obtenu estimé d'après le modèle d'âge-profondeur de la séquence VRA\_2018.*

#### *III.1.5.4 Analyse diagraphique*

La caractérisation de manière non-destructive des sédiments passe dans un premier temps par l'utilisation du diagramme dit Q7/4 (**Debret et al., 2011**). L'axe des abscisses représentant la réflectance totale (L\*) acquise grâce au spectrocolorimètre monté sur le banc de diagraphie Geotek®. L'axe des ordonnées correspond au rapport calculé d'après le spectre entier acquis entre 400 et 700 nm. Enfin, l'axe des cotes (axe z) apparaît sous la forme d'une échelle de couleurs correspondant aux différentes unités lithologiques (voir **PARTIE III** section **Résultats 1.5.2** pour la description sédimentaire des différentes unités). D'après le diagramme Q7/4 des sédiments de la séquence VRA\_2018 (**Figure 50**), les échantillons se répartissent parmi quatre grands pôles sédimentaires que sont les carbonates, la matière

organique fraîche (chlorophylle a et ces produits dérivés), la matière organique altérée et les argiles. L'axe des cotes permet de préciser le pôle dominant dans chaque unité lithologique. Ainsi, les unités 1 et 6 sont principalement composées de carbonates, l'unité 5 contient majoritairement de la matière organique altérée et les unités 4 et 7 sont constituées essentiellement de matière organique riche en chlorophylle a et ces produits dérivés. Pour les unités 2 et 3, elles semblent contenir un mélange de sédiments organiques altérées et non-altérées (chlorophylle a et ces produits dérivés). Enfin, les dépôts d'argiles sont surtout présents dans les unités 1, 2 et 4.

Pour appuyer les résultats obtenus du diagramme Q7/4, des dérivées premières ont été calculées pour chaque échantillon puis tracées (**Figure 50**). La forme que va prendre la dérivée première va permettre la caractérisation de certains pigments végétaux et/ou minéraux.

Par exemple, la dérivée première des échantillons se situant dans le pôle des carbonates suit une décroissance caractéristique entre 400 et 700 nm. Les dérivées premières des échantillons appartenant au pôle des sédiments organiques riches en chlorophylle a et ces produits dérivés présentent un creux à 645 nm suivi d'un pic à 675 nm correspondant à la bande d'absorption de la chlorophylle a. Dans le pôle de la matière organique altérée, on retrouve des échantillons avec des dérivées premières en « zig zag » entre 600 et 700 nm. Enfin, les échantillons composés en grande partie d'argiles possèdent des valeurs de dérivée première relativement basses.

Le diagramme Q7/4 permet ainsi d'obtenir une vision relativement générale de la composition des sédiments du lac Vrana en fonction de la profondeur. C'est pourquoi il est ensuite nécessaire de comparer ces interprétations avec d'autres paramètres acquis de manières non-destructifs.

*Remarque : En raison d'une trop forte influence de la teneur en eau et/ou de la granulométrie sur les données de spectrométrie de fluorescence-X, certaines valeurs obtenues des éléments légers (Al, Mg, Si notamment) ne peuvent être exploités et interprétés malgré l'utilisation de rapport et l'acquisition de données XRF sur poudre pour comparaison au laboratoire Biogéosciences de Dijon (**Figure 51**). En effet, sur la **Figure 51**, nous pouvons remarquer hormis le fer et le magnésium que l'ensemble des autres éléments présentent des écarts trop importants suivant s'ils sont mesurés sur sédiment humide ou sur poudre.*

# Diagramme Q7/4

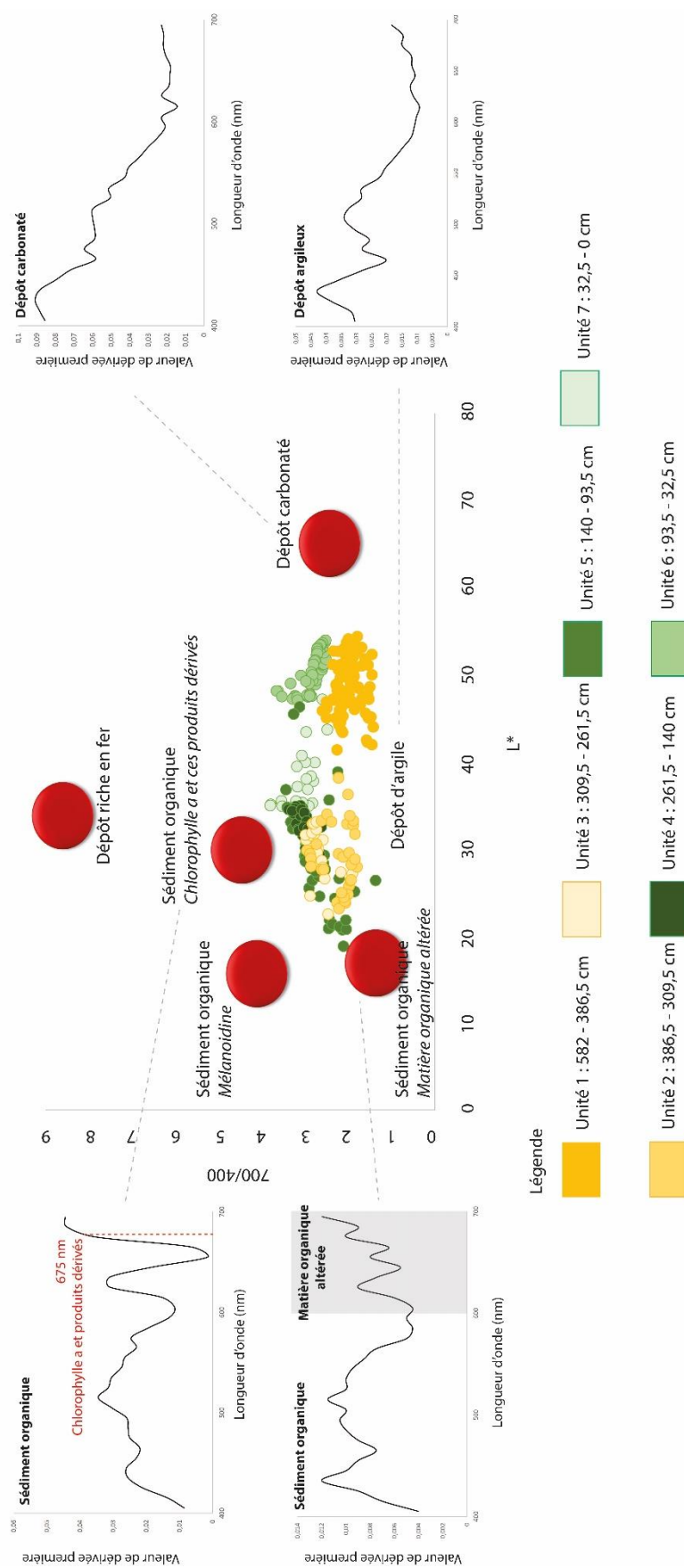


Figure 50. Diagramme Q7/4 obtenu des sédiments de la séquence VRA\_2018

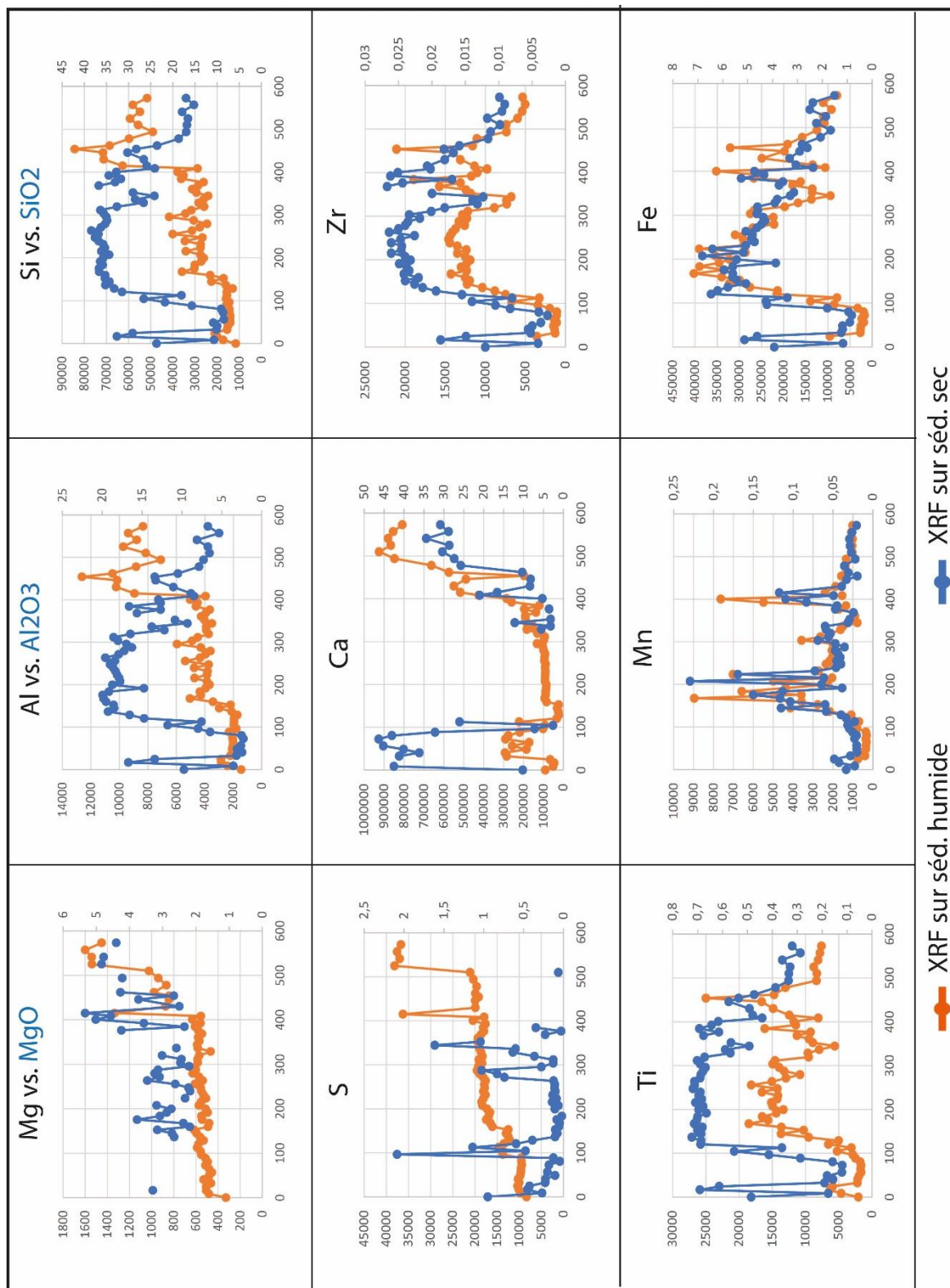


Figure 51. Comparaison des résultats obtenus de la spectrométrie de fluorescence X sur le sédiment sec (bleu) avec celle sur le sédiment humide (orange)

Ainsi, parmi l'ensemble des paramètres mesurés, seules la susceptibilité magnétique, les valeurs du rapport Mn/Fe obtenues de la spectrométrie de fluorescence-X, et la RABA calculée d'après les valeurs du spectrocolorimètre sont décrites ici en raison des informations utiles qu'elles renferment (**Figure 52**). La susceptibilité magnétique permet la description des apports de particules magnétiques détritiques (souvent portées par les argiles) dans le lac Vrana, les valeurs de RABA retracent les variations de la chlorophylle a et de ces produits dérivés induite de la productivité primaire. Pour finir, le rapport Mn/Fe renseigne sur les conditions oxydo-réductions de la colonne d'eau.

Afin de décrire au mieux les variations des marqueurs cités ci-dessus, une analyse de cluster (CONISS) a été effectuée afin d'identifier et visualiser des périodes pertinentes (**Figure 52**). Ainsi, neuf zones ont été délimitées approximativement à :

- 28 550 – 21 790 cal. BC (30 500 – 23 740 cal. BP) ;
- 21 790 – 11 460 cal. BC (23 740 – 13 410 cal. BP) ;
- 11 460 – 9420 cal. BC (13 410 – 11 370 cal. BP) ;
- 9420 – 8760 cal. BC (11 370 – 10 710 cal. BP) ;
- 8760 – 6310 cal. BC (10 710 – 8260 cal. BP) ;
- 6310 – 4470 cal. BC (8260 – 6420 cal. BP) ;
- 4470 – 1710 cal. BC (6420 – 3660 cal. BP) ;
- 1710 – 610 cal. BC/AD (3660 – 1340 cal. BP) ;
- 610 – 1720 cal. AD (1340 – 230 cal. BP) ;
- 1720 – 2018 cal. AD (230 – (-68) cal. BP).

Le première période (28 550 – 21 790 cal. BC soit 30 500 – 23 740 cal. BP) est caractérisée par de très faibles valeurs de susceptibilité magnétique (proche de 0 SI) correspondant à des apports détritiques d'éléments magnétiques faibles. Les valeurs basses du rapport Mn/Fe suggèrent quant à elles une faible oxygénation de la colonne d'eau. Enfin, les valeurs de RABA indiquent une faible productivité primaire jusqu'à environ 22 550 cal. BC (24 500 cal. BP), après cette date celle-ci semble être boostée.

De 21 790 – 11 460 cal. BC (23 740 – 13 410 cal. BP), les apports détritiques restent faibles mais stables, cependant, la diminution du rapport Mn/Fe dès 20 550 cal. BC (22 500 cal. BP) semble indiquer une meilleure oxygénation de la colonne d'eau puis la tendance s'inverse entre 12 650 et 11 460 cal. BC (14 600 et 13 410 cal. BP). Durant cette période, la productivité

primaire reste à des valeurs hautes jusqu'à 12 650 cal. BC (14 600 cal. BP) puis diminue brusquement. Le hiatus est visible entre 19 050 et 12 650 cal. BC (21 000 - 14 600 cal. BP).

Entre 11 460 et 9420 cal. BC (13 410 et 11 370 cal. BP), les apports détritiques restent faibles et stables jusqu'à environ 9550 cal. BC (11 500 cal. BP), ensuite, ils augmentent lentement. L'oxygénation des eaux du lac Vrana augmente progressivement jusqu'à atteindre un maximum à 9550 cal. BC (11 500 cal. BP). Enfin, les valeurs de la RABA sont faibles hormis un pic de productivité primaire à 9550 cal. BC (11 500 cal. BP).

De 9420 à 8760 cal. BC (11 370 à 10 710 cal. BP), l'érosion dans le bassin versant de Vrana continue d'augmenter fortement. La diminution des rapport Mn/Fe indique le développement d'une anoxie jusqu'à environ 9050 cal. BC (11 000 cal. BP). Dans le même temps, la productivité primaire diminue.

Puis, de 8760 à 6310 cal. BC (10 710 à 8260 cal. BP), l'augmentation de la susceptibilité magnétique et donc des apports détritiques se poursuit pour atteindre un « plateau » à 90 – 100 SI. Le rapport Mn/Fe indique un léger pic d'anoxie à 7250 cal. BC (9200 cal. BP). Ici, la productivité primaire reste faible et stable à part un pic à 7750 cal. BC (9500 cal. BP).

Entre 6310 et 4470 cal. BC (8260 – 6420 cal. BP), d'importants changements se produisent marqués par quatre pics successifs de la susceptibilité magnétique à plus de 100 SI (5850, 5550, 5050 et 4450 soit 7800, 7500, 7000 et 6400 cal. BP). À 5550 cal. BC (7500 cal. BP), le rapport Mn/Fe atteint également un pic marquant une bonne oxygénation des eaux du lac.

Dès 4470 et jusqu'à 1710 cal. BC (6420 – 3660 cal. BP), les rapports de Mn/Fe et la susceptibilité magnétique diminuent brusquement. La productivité primaire reste faible.

La période comprise entre 1710 et 610 cal. BC/AD (3660 et 1340 cal. BP), est marquée par une diminution des apports détritiques exceptés trois petits pics à 850, 550 et 450 cal. BC/AD (2800, 2500 et 1500 cal. BP). De même, la légère augmentation du rapport Mn/Fe indique que la colonne d'eau est moins oxygénée vers 1550 cal. BC (3500 cal. BP) et entre 50 et 610 cal. BC/AD (2000 – 1340 cal. BP). Enfin, la valeur de la RABA augmente légèrement à 550 cal. BC (2500 cal. BP).

Entre 610 et 1720 cal. AD (1340 et 230 cal. BP), le rapport élevé de Mn/Fe laisse supposer une faible oxygénation des eaux du lac. Enfin, la productivité primaire du lac Vrana atteint un maximum à 1150 cal. BC (800 cal. BP) puis diminue jusqu'à 1720 cal. BC (230 cal. BP). Les apports détritiques sont faibles autour de 0 SI.

Enfin, de 1720 à 2018 cal. AD (230 – (-)68 cal. BP), la susceptibilité magnétique augmente rapidement et le rapport Mn/Fe diminue dès 230 cal. BP signe d'une meilleure oxygénation des eaux. La productivité primaire atteint un maximum à 2018 cal. BC (-68 cal. BP).

### *III.1.5.5 Analyse de perte au feu*

Les analyses de perte au feu ont permis d'estimer le contenu en matière organique (LOI 550 °C), en carbonates (LOI 950 °C) et en composés minérogéniques (LOI > 950 °C). Elles ont été menées en continu sur 251 sous-échantillons de VRA\_2018 : tous les 2 cm entre 0 et 415 cm puis tous les 4 cm entre 415 et 582 cm. En amont des analyses, des sous-échantillons de sédiments secs d'environ 400 mg ont été prélevés puis broyés à 500 tr pendant 8 min jusqu'à un diamètre inférieur à 100 µm. Les tendances obtenues (**Figure 52**) sont décrites en fonction des périodes établies précédemment par l'analyse de cluster et sont exprimées en flux ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ ).

De 28 550 à 21 790 cal. BC (30 500 à 23 740 cal. BP), les sédiments apparaissent très carbonatés ( $25 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  environ) et riches en éléments minérogéniques ( $10 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$  environ). Les taux de matière organique sont quant à eux très faibles, en-dessous de  $0,5 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ .

Entre environ 21 790 et 11 460 cal. BC (23 740 et 13 410 cal. BP), les sédiments changent légèrement de composition et s'enrichissent progressivement en minéraux jusqu'à atteindre  $30 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ , en carbonates ( $50 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ ) et en matière organique ( $0,5 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ ).

Dès 11 460 et jusqu'à 9420 cal. BC (13 410 – 11 370 cal. BP), les teneurs en minéraux et carbonates dans les sédiments chutent à  $20 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$  environ, au profit de la matière organique qui augmente à  $4 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$  environ.

Pour la période qui suit, entre 9420 et 8260 cal. BC (11 370 et 10 710 cal. BP), la matière organique diminue à  $1,5 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$ . Au contraire, les taux de carbonates et d'éléments minérogéniques montent chacun à  $45 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$  environ.

Entre 8260 et 6310 cal. BC (10 710 à 8260 cal. BP), les carbonates et les éléments minérogéniques diminuent puis restent dans des gammes de valeurs comprises entre 15 et 20  $\text{mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$ . La matière organique chute à  $0,5 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$ .

De 6310 à 4470 cal. BC (8260 à 6420 cal. BP), la composition en minéraux et carbonates progresse rapidement pour atteindre  $35 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$  chacun environ à 5050 cal. BC (7000 cal. BP) avant de descendre à moins de  $10 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$  chacun. La matière organique reste ici stable autour de  $0,5 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$  environ jusqu'à 5050 cal. BC (7000 cal. BP) où elle chute à  $0,2 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$ .

Entre 4470 et 1710 cal. BC (6420 et 3660 cal. BP), la composition des sédiments change brusquement avec une diminution en-dessous de  $5 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$  des teneurs en carbonates et minéraux. La matière organique chute également à des valeurs très faibles (moins de  $0,5 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$ ).

Puis, de 1710 à 610 cal. BC/AD (3660 à 1340 cal. BP), Les teneurs en carbonates, éléments minérogéniques et matière organique restent faibles et relativement stables jusqu'à environ 450 cal. BC (1500 cal. BP) où les teneurs en matière organique montent à  $1,5 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$ , en carbonates à  $30 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$  et les minéraux à  $10 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$ .

Entre 610 et 1720 cal. AD (1340 – 230 cal. BP), les sédiments continuent de s'enrichir en matière organique jusqu'à des valeurs de  $1,6 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$  avant de chuter progressivement à  $5 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$ . Les carbonates suivent la même tendance avec une augmentation jusqu'à  $42 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$  avant de chuter à  $20 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$ . Les minéraux restent quant à eux dans des gammes de valeurs comprises entre 5 et  $10 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$ .



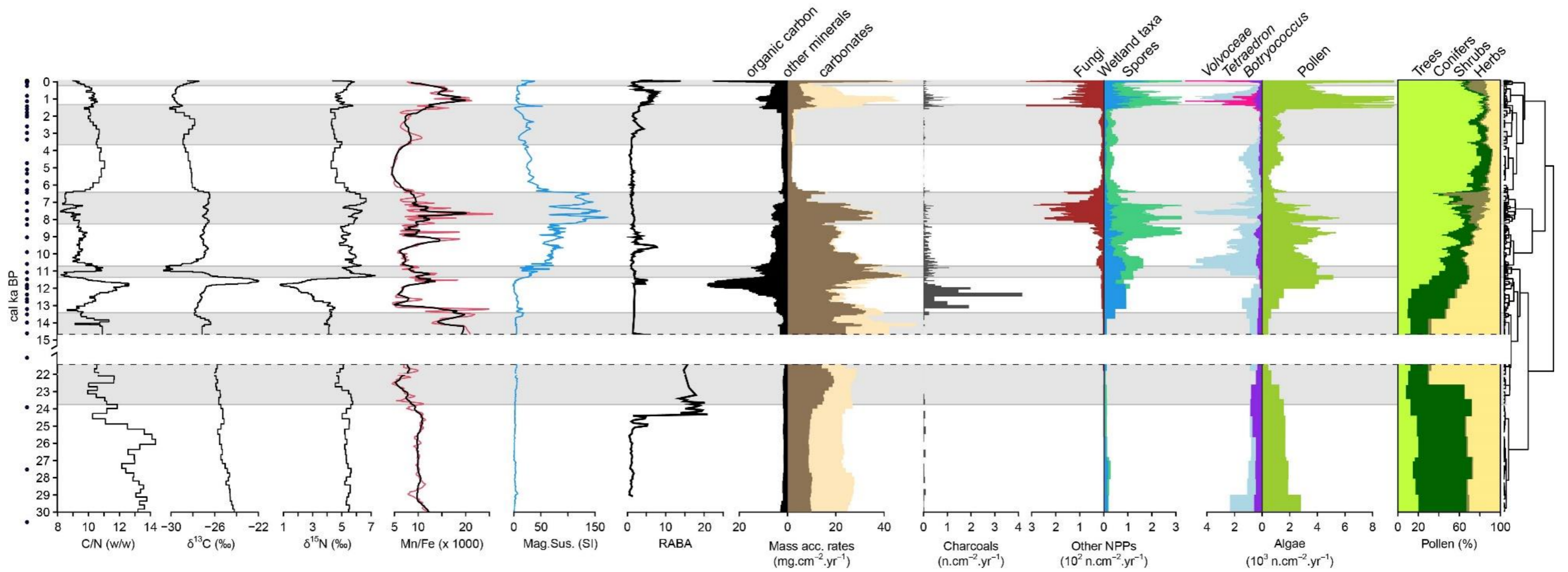


Figure 52. Description des paramètres acquis en isotopie (C/N,  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ), en spectrométrie de fluorescence-X (Mn/Fe), avec le banc de diagraphie Geotek® (SM, RABA), en perte au feu (MO totale, minéraux et carbonates total), avec les macrocharbons de bois et en palynologie (spores de champignons, de plantes palustres et de fougères ; les algues ; la somme des pollens et le diagramme avec la somme de feuillus, conifères, arbustes et herbacées).

Enfin, entre 1720 et 2018 cal. AD (230 – (-68) cal. BP) le sédiment devient brusquement carbonaté et minérogénique (40 mg.cm<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> chacun) et riche en matière organique (3,5 mg.cm<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>).

### III.1.5.6 Analyse isotopique

L'analyse isotopique menée en continu sur la séquence VRA\_2018, a permis d'obtenir le rapport C/N ainsi que les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  (**Figure 52**). Les augmentations de la productivité primaire peuvent être retracées lorsque les valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  tendent vers des valeurs négatives. Cependant, le  $\delta^{13}\text{C}$  peut être également influencé par les apports détritiques qui diluent le signal. À cette échelle, le  $\delta^{15}\text{N}$  permet quant à lui de retracer l'origine de la source sédimentaire.

Ainsi, les tendances obtenues entre 28 550 et 21 790 cal. BC (30 500 et 23 740 cal. BP), montrent une baisse du  $\delta^{13}\text{C}$  de -24 à -25 ‰ et du rapport C/N de 13 à 11,5. Le  $\delta^{15}\text{N}$  reste quant à lui relativement stable durant cette période autour de 5,5 ‰.

De 21 790 à 11 460 cal. BC (23 740 à 13 410 cal. BP), l'ensemble des marqueurs indiquent une diminution progressive. Le  $\delta^{13}\text{C}$  passe à -27 ‰ ; le  $\delta^{15}\text{N}$  chute à 4,5 ‰ et le C/N à 9,5.

Entre 11 460 et 9420 cal. BC (13 410 et 11 370 cal. BP), le C/N augmente brusquement à 12,5, de même pour le  $\delta^{13}\text{C}$  pour atteindre un maximum à -22,1 ‰ à 9550 cal. BC (11 500 cal. BP). Enfin, le  $\delta^{15}\text{N}$  diminue jusqu'à 1 ‰.

De 9429 à 8760 cal. BC (11 370 à 10 710 cal. BP), le  $\delta^{13}\text{C}$  et le C/N diminuent respectivement à -30 ‰ et à 8,8. La tendance à la décroissance du  $\delta^{13}\text{C}$  indique un milieu de plus en plus lacustre et une productivité primaire qui prend une part de plus en plus importante. Seul le  $\delta^{15}\text{N}$  augmente jusqu'à atteindre 7,5 ‰.

Puis, de 8760 à 6310 cal. BC (10 710 à 8260 cal. BP), les valeurs de C/N se stabilisent à 9,5, le  $\delta^{13}\text{C}$  à -26,5 ‰ et le  $\delta^{15}\text{N}$  à environ 5,5 ‰.

La période qui suit entre 6310 et 4470 cal. BC (8260 et 6420 cal. BP) montre une légère diminution du C/N à 8,8 et une augmentation du  $\delta^{15}\text{N}$  à 7 ‰.

De 4470 à 1710 cal. BC (6420 à 3660 cal. BP), le C/N augmente graduellement jusqu'à 11. Le  $\delta^{15}\text{N}$  est anti-corrélé et diminue à 4,5 ‰. Le  $\delta^{13}\text{C}$  décroît très légèrement lui aussi à -29 ‰.

Entre 1710 et 610 cal. BC/AD (3660 et 1340 cal. BP), les valeurs de C/N décroissent à 10,5, le  $\delta^{13}\text{C}$  augmente à -27 ‰ et le  $\delta^{15}\text{N}$  se stabilise autour de 5 ‰.

L'avant dernière période entre 610 et 1720 cal. AD (1340 – 230 cal. BP), le C/N se stabilise autour de 11 et le  $\delta^{13}\text{C}$  diminue à -29 ‰. Enfin, depuis 1720 cal. BC (230 cal. BP), le C/N a diminué à 9, le  $\delta^{13}\text{C}$  a augmenté à -27 ‰ et le  $\delta^{15}\text{N}$  à 6 ‰.

### *III.1.5.7 Analyse des macrocharbons de bois*

L'analyse des macrocharbons de bois (supérieur 150  $\mu\text{m}$ ) a été menée de manière continue par tranches centimétriques entre 0 et 154 cm puis tous les 2 cm de 154 à 327 cm, couvrant ainsi l'intégralité de l'Holocène. Pour les profondeurs les plus anciennes, les analyses ont été menées de manière discontinue tous les 6 cm jusqu'à la base de la séquence à 582 cm.

La courbe du flux de charbon permet ainsi de mettre en évidence deux périodes où le signal incendie augmente fortement (**Figure 52**). Une première période relativement longue s'étalant entre 11 050 – 4050 cal. BC (13 000 – 6000 cal. BP) comprenant trois grands pics principaux à 10 050 cal. BC (12 000 cal. BP), 8050 cal. BC (10 000 cal. BP) et 5300 cal. BC (7250 cal. BP). Une seconde période plus récente entre 450 et 1450 cal. AD (1500 – 500 cal. BP) dont un pic principal est observé à 700 cal. AD (1250 cal. BP).

### *III.1.5.8 Analyse micro- et macroscopique*

#### Analyse palynofaciès

Les analyses des palynofacies ont permis de caractériser et décrire le contenu sédimentaire général d'une partie de la séquence VRA\_2018 (**Figure 53**). En effet, les analyses ont été menées ponctuellement sur les lames palynologiques dès 9000 dernières années environ. Ainsi, les sédiments se composent à 40 – 70 % de particules opaques dont une grande majorité sont des pyrites framboïdales\* et à 15 – 20 % de matière organique amorphe (voir la **PARTIE II, Chapitre 2.4.2** pour le descriptif des catégories de particules ; **Sebag et al., 2006**). Le reste

de la matrice est constituée de restes d'algues dont les espèces *Tetrahedron* (max. 56 %) et *Botryococcus braunii* (max. 2 %). Enfin, une petite proportion représente les phytoclastes préservés comme les membranes et cuticules (CM), les tissus transparents (TLC) et altérés (ALC), max. 9 % ; et des phytoclastes transformés dont les particules amorphes (AP) et gélifiées (GP), max. 30 %. Les spores et pollens fossiles représentent quant à eux un maximum de 7,5 %.

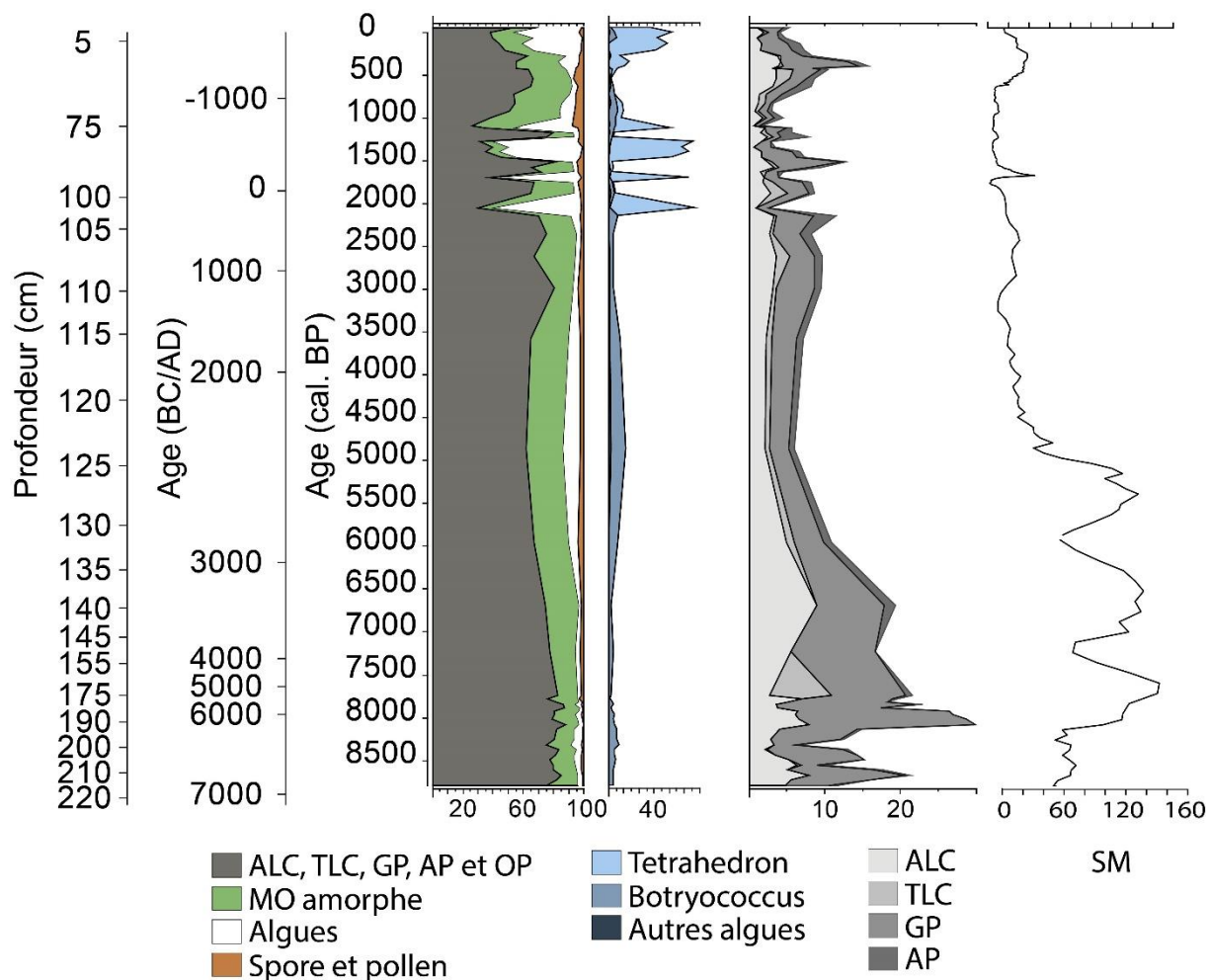


Figure 53. Description du contenu sédimentaire sur les 9000 dernières années. Les catégories sont définies selon [Sebag et al., 2006](#)

Les phytoclastes préservés (ALC, TLC) ou en cours de transformation (AP, GP) constituent une partie des apports détritiques du bassin versant de Vrana. En effet, leur variation corrèle relativement bien avec celles de la susceptibilité magnétique (**Figure 53**). Les algues fossiles sont utilisées ici pour caractériser l'évolution de la productivité primaire.

On remarque qu'entre 6750 et 6250 cal. BC (8700 et 8200 cal. BP), les apports détritiques sont relativement constants. Les tissus altérés (ALC) et les particules gélifiées (GP) dominent le groupe des phytoclastes. La productivité primaire (principalement l'espèce d'algue *Botryococcus braunii*) est faible. Puis, à partir de 6250 et jusqu'à 4550 cal. BC (8200 – 6500 cal. BP), l'érosion - et donc l'apport de phytoclastes depuis le bassin versant - augmente brusquement et fortement<sup>15</sup>. La productivité primaire reste quant à elle stable. De 4550 à 1650 cal. BC (6500 à 3600 cal. BP), la proportion de phytoclastes diminue dans les sédiments. Au contraire, la productivité primaire se développe légèrement. La période qui suit entre 1650 à 550 cal. BC/AD (3600 à 1400 cal. BP) est marquée par une hausse de la productivité primaire avec deux pics distincts à 250 et 200 cal. BC/AD (2200 et 1750 cal. BP). D'autre part, un « turnover » dans les populations alguaire est observé avec l'espèce *Tetrahedron* qui devient dominante par rapport à *Botryococcus braunii*. Ces deux espèces ont en effet des préférences écologiques différentes : *Tetrahedron* a une préférence pour les eaux chargées en CO<sub>2</sub> (Hunnik et al., 2000) alors que *Botryococcus braunii* est omniprésente dans la plupart des eaux douces, saumâtres voire salées (Qin et al., 2006). Entre 450 et 1450 cal. AD (1500 – 500 cal. BP), on observe des épisodes de productivité primaire accrue, en particulier entre 550 et 950 cal. AD (1400 et 1000 cal. BP). Enfin, depuis 1450 cal. AD (500 cal. BP), la productivité trophique est en nette progression. Le nombre de spores et de pollens fossiles et les apports détritiques augmentent fortement dans cette dernière période.

### Analyse pollinique

Les analyses des spores et grains de pollen fossiles ainsi que des microfossiles non-polliniques ont été menées en continu tous les centimètres sur les 259,5 premiers centimètres puis tous les 14 cm entre 259,5 et 582 cm. D'après l'analyse de cluster obtenue avec le logiciel *Tilia*, le diagramme pollinique peut être divisé en deux zones polliniques distinctes (ZP1 et ZP2) qui peuvent être subdivisées en neuf sous-zones (**Figure 54** ; diagramme complet en **Annexe 4**) :

- (ZP1/a) 28 050 – 20 150 cal. BC / 30 000 – 22 100 cal. BP ;
- (ZP1/b) 20 150 – 12 050 cal. BC / 22 100 – 14 000 cal. BP ;

---

<sup>15</sup> Nous verrons plus loin que cette date d'environ 6250 cal. BC marque le début d'une chute importante du chêne et de l'apparition de plantes directement liées à l'Homme et à son bétail.

- (ZP1/c) 12 050 – 9550 cal. BC / 14 000 – 11 500 cal. BP ;
- (ZP1/d) 9550 – 8750 cal. BC / 11 500 – 10 700 cal. BP ;
- (ZP1/e) 8750 – 6250 cal. BC / 10 700 – 8200 cal. BP ;
- (ZP1/f) 6250 – 4550 cal. BC / 8200 – 6500 cal. BP ;
- (ZP2/a) 4550 – 1650 cal. BC / 6500 – 3600 cal. BP ;
- (ZP2/b) 1650 – 450 cal. BC/AD / 3600 – 1500 cal. BP ;
- (ZP2/c) 450 – 1450 cal. AD / 1500 – 500 cal. BP ;
- (ZP2/c) 1450 – 2018 cal. AD / 500 – (-68) cal. BP ;

**ZP 1 (28 050 – 4550 cal. BC / 30 000 – 6500 cal. BP)**

1/a (28 050 – 20 050 cal. BC / 30 000 – 22 100 cal. BP) :

La végétation se compose en moyenne à 59 % de pollens de conifères, principalement représentés par le pin et le sapin (*Pinus sp.* 47,4 à 63,6 % ; *Abies alba* 3,6 à 6,2 %). Les pollens de genévrier (*Juniperus*) et de saule (*Salix*) ne représentent que 1 % du total des pollens comptés. Les quarante pourcents restants se divisent à part égale entre les feuillus et les herbacées. Les feuillus comprenant en majorité du chêne pédonculé-pubescent (*Quercus robur-pubescentes-type* : 2,2 à 6,1 %), du hêtre (*Fagus sylvatica* : 2 à 4,9 %), du bouleau (*Betula* : 3 à 9,4 %) et du charme (*Carpinus betulus* : 1,9 à 4 %). Dans une moindre mesure, on notera la présence d'aulne (*Alnus*), d'orme (*Ulmus*), de frêne (*Fraxinus*), de tilleul (*Tilia*), et de noisetier (*Corylus avellana*).

Le groupe des herbacées est représenté quant à lui en majorité par l'armoise (*Artemisia* : 5,8 à 52,8 %) et les poacées (*Poaceae* : 9,2 à 39,4 %). On retrouve également présents dans de plus faibles proportions des plantains, des astéracées, des renonculacées, des caryophyllacées, des apiacées, des chénopodiacées, des saxifragacées, des cichorioidés, des éricacées (*Erica-Empetrum*) et des rubiacées.

Enfin, quelques cypéracées complètent en grande partie la végétation humide proche du lac et un petit pic curieux de *Sporormiella* est à noter vers 21 550 cal. BC (23 500 cal. BP).

1/b (20 150 – 12 050 cal. BC / 22 100 – 14 000 cal. BP) :

*Remarque : ce niveau présente une forte altération des spores et pollens fossiles. La courbe de Lycopodium comptés montre d'ailleurs une anomalie pour cette période. Moins de 300 pollens ont été comptabilisés dans les échantillons. Les données polliniques obtenues sont tout de même décrites mais doivent donc être interprétées avec beaucoup de précaution.*

Le pin montre une chute à 10 voire 5 %. Des tendances à la diminution sont également visibles pour d'autres essences comme le chêne pédonculé-pubescent, le charme, l'orme, le noisetier, le hêtre, et le sapin. Tout comme le bouleau, le genévrier augmente légèrement.

Parmi les herbacées, l'armoise, les caryophyllacées, les chénopodiacées, les poacées, les astéracées, les cichorioidées et les rubiacées augmentent fortement. Les herbacées représentent ainsi dans cette sous-zone 65 % de l'assemblage pollinique. Les pollens de feuillus restent dans des proportions stables autour de 20 % ; les arbustes augmentent très légèrement autour de 5 % et les conifères ne représentent plus que 10 % de la somme totale. Pour cette période, le pourtour du lac Vrana et son bassin versant étaient couverts par une végétation plutôt steppique ; les arbres et arbustes n'occupant que des niches écologiques particulières. Enfin, parmi les populations alguaires, les espèces *Botryococcus braunii* et *Pediastrum* atteignent un pic respectivement à 80 % et 15 % à environ 21 050 cal. BC (23 000 cal. BP).

1/c (12 050 – 9550 cal. BC / 14 000 – 11 500 cal. BP) :

Dans cette sous-zone, les proportions de chêne pédonculé-pubescent progressent graduellement jusqu'à des valeurs de 20 %, de même pour le frêne mais jusqu'à 5 %. Le chêne vert (*Quercus ilex-type*) apparaît dans la végétation à 9550 cal. BC (11 500 cal. BP). Le pin quant à lui augmente fortement dès 11 150 cal. BC (13 100 cal. BP) avant de se stabiliser autour de 40 %.

Au contraire, les proportions de hêtre, d'aulne, de charme, de bouleau diminuent. Des tendances similaires sont observées pour les principales herbacées avec la diminution graduelle des poacées, de l'armoise et des chénopodiacées. Les arbustes dont le genévrier restent à des valeurs relativement stables autour de 5%. On peut également remarquer la présence de spores de champignons coprophiles de type *Sordariacées* dès 11 050 cal. BC (13 000 cal. BP).

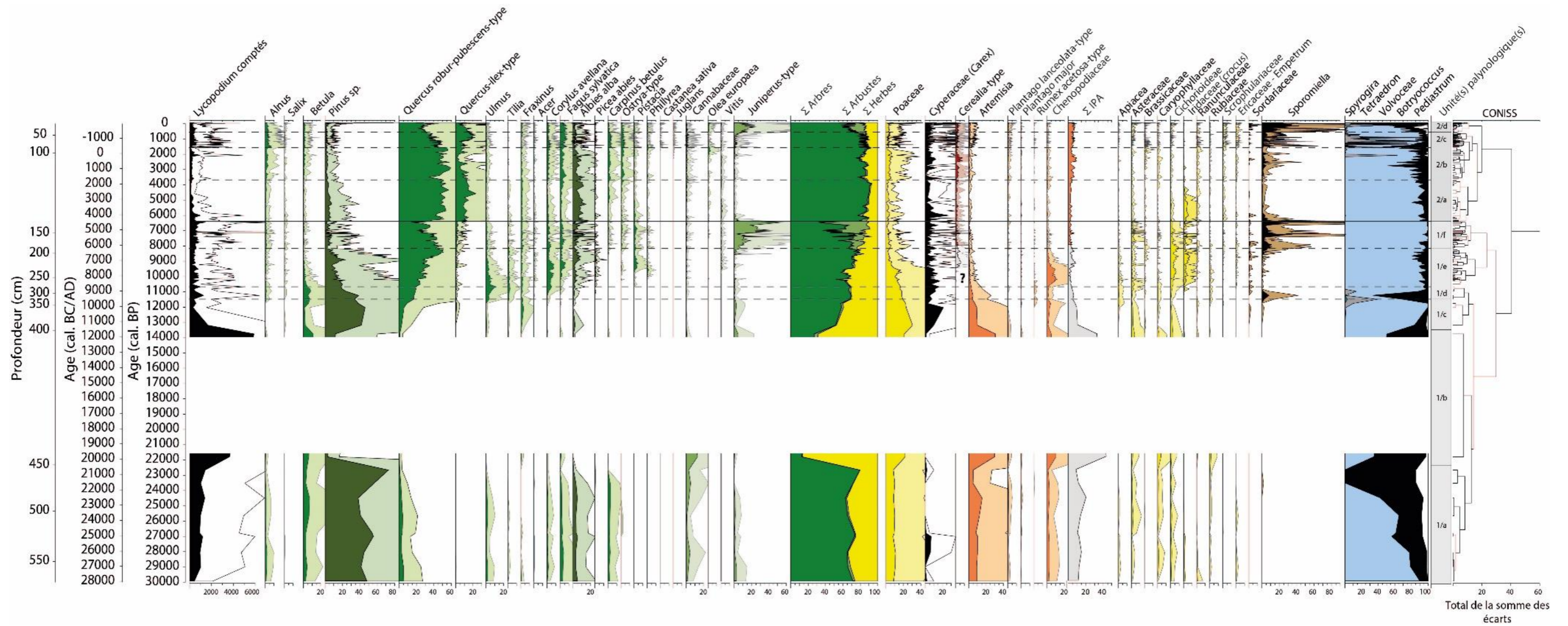


Figure 54. Diagramme pollinique simplifié obtenu de l'analyse palynologique des sédiments du lac Vrana (île de Cres, Croatie)



1/d (9550 – 8250 cal. BC / 11 500 – 10 700 cal. BP) :

Depuis 9550 cal. BC (11 500 cal. BP), on peut observer des changements significatifs avec notamment l'augmentation progressive de certaines essences comme l'aulne, l'orme, le tilleul, le noisetier, le bouleau et plus légèrement le hêtre à partir de 9050 cal. BC (11 000 cal. BP). Le chêne pédonculé-pubescent semble marqué par un plateau autour de 20 %. Le pin quant à lui entame une baisse progressive jusqu'à des valeurs de 20 % autour de 8250 cal. BC (10 700 cal. BP).

Le pourcentage d'herbacées continue de diminuer progressivement. Dans cette intervalle de temps, les herbacées ne représentent alors que 40 % de l'assemblage pollinique. Le reste se compose à 60 % d'arbres dont 10 % de conifères et 1 % d'arbustes. On assiste vraisemblablement pour cette période à une fermeture progressive du milieu et une reconquête par le chêne pédonculé-pubescent. Dans cette sous-zone, les champignons coprophiles de type *Sporormiella* augmentent pour atteindre un pic à 9050 cal. BC (11 000 cal. BP).

Dans les populations alguaires, les espèces *Tetrahedron* et *Spirogyra* atteignent un pic respectivement à 40 et 0,5 % à 9550 cal. BC (11 500 cal. BP). À 9050 cal. BC (11 000 cal. BP), c'est l'espèce de *Botryococcus braunii* qui atteint un maximum à 60%.

1/e (8750 – 6250 cal. BC / 10 700 – 8200 cal. BP) :

On observe une nette progression des proportions de grains de pollens de chêne pédonculé-pubescent et du hêtre. Le noisetier progresse également jusqu'à 7050 cal. BC (9000 cal. BP) avant de diminuer. Le bouleau et l'orme diminuent dès 8750 cal. BC (10 700 cal. BP). De plus, on assiste à une modification de la végétation avec l'apparition de taxons méditerranéens dont le pistachier (*Pistacia*) à 8250 cal. BC (10 700 cal. BP) qui augmente fortement à partir de 7550 cal. BC (9500 cal. BP), du filaire (*Phillyrea*) et du charme-houblon (*Ostrya carpinifolia*) à 7850 cal. BC (9800 cal. BP). La première occurrence de l'érable (*Acer*) à 8050 cal. BC (10 000 cal. BP) est aussi observée. En parallèle, le sapin et le pin après une lente diminution depuis 8250 cal. BC (10 700 cal. BP) progressent de nouveau dès 7050 cal. BC (9000 cal. BP).

Dans le groupe des herbacées, on observe également plusieurs changements avec un pic de chénopodiacées entre 8050 et 7550 cal. BC (10 000 - 9500 cal. BP). C'est également à partir de 7550 cal. BC (9500 cal. BP) qu'apparaissent les premiers pollens de type céréale. La première occurrence de pollens de vigne (*Vitis*) est notée à 7300 cal. BC (9250 cal. BP).

La fermeture du milieu se poursuit ainsi avec la diminution notamment des poacées de 20 %, elles passent à 5 % environ. Seuls quelques taxons comme les cichorioidées et les iridacées progressent jusqu'à des valeurs avoisinant les 5 % chacune.

En région adriatique, le début du Néolithique est marqué par une première phase (6350 – 5500 cal. BC soit 8300 – 7450 cal. BP) de modifications importantes du couvert végétal (**Kacar, 2020**). En effet, on assiste à un remplacement des forêts de chênes par des forêts mixtes. Une légère modification des températures et/ou des précipitations marquent cette période et semble à l'origine de ce changement, en particulier d'ouverture du milieu (**Combourieu-Nebut et al., 2013**). Cependant, ces transformations de toute évidence de causes naturelles pourraient être également combinées à des actions humaines sur l'environnement (**Bradshaw, Hannon, & Lister, 2003 ; Sadori, Jahns, & Peyron, 2011**).

Dans la séquence de Vrana, les premiers pollens de type céréales sont observés vers 7550 cal. BC (9500 cal. BP), soit environ 1200 ans avant le début du Néolithique, démontré par l'archéologie en Croatie du Nord (**Kacar, 2020**).

Des traces précoces d'agriculture, associées à des modifications du couvert végétal, et précédant parfois de plusieurs siècles les datations admises par l'archéologie, ont déjà été trouvées en Europe, notamment en Suisse et en France. Ces découvertes ont soulevé des débats animés entre les chercheurs (voir par exemple les échanges entre **Behre, 2007** et **Tinner et al., 2007**).

L'hypothèse de la présence de pratiques agricoles antérieures aux datations classiques de l'arrivée des grands courants du Néolithique, engendrant des théories telles qu'une proto-agriculture ou un pré-néolithique (**Jeunesse, 2000 ; Richard, 2000 et 2004 ; Tinner et al., 2007**). Ces dates précoces proviennent du plateau suisse, par exemple : Soppensee (**Lotter, 1999**), Lobsigensee (**Ammann, 1985 ; van der Knaap et Ammann, 1997**), Wauvilermoos (**Beckmann, 2004**), Rotsee (**Lotter, 1988**), Bibersee (**Beckmann, 2004**), Wallisellen-

Langachermoos (Haas, 1996), Zurich-Mozartstrasse (Erny-Rodmann et al., 1997), le lac du Mont d'Orge (Tinner et al., 2007), etc.

Tous ces sites font état d'indices polliniques d'anthropisation très anciens, entre 6500 et 6000 cal. BC, avec même quelques grains de pollen de céréales aux environs de 7500 – 7000 cal. BC (Soppensee, Bibersee et Wauwilermoos). Dans l'est de la France, les premiers indices du Néolithique « initial » se situent plutôt dans le VIème millénaire avant J.-C., et le plus souvent dans la seconde moitié (Erera et al., 2004 ; Pétrequin et al., 2009 ; Murgia, 2011 ; Richard et al., 2022).

Dans le cas de Vrana, plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer la différence d'âge obtenue. La principale étant la difficulté de différencier au microscope optique le pollen de céréale de ceux de certaines graminées sauvages. En effet, l'identification du type « *Cerealia* » repose principalement sur la taille du grain de pollen et la taille et de son pore et de l'annulus qui l'entoure. Plusieurs études approfondies ont été entreprises afin de mieux séparer les deux groupes et de trouver des caractéristiques claires et objectives pour distinguer le pollen de « *Cerealia* » (Beug 1961, 2004 ; Andersen 1979 ; Kohler et Lange 1979 ; Moore et al. 1991).

Quatre critères ont été définis dans la clé de Beug (2004) :

Diamètre du pollen	> 37.0 µm (afin d'inclure au moins 98 % des espèces <i>Triticum</i> , <i>Hordeum</i> et <i>Avena</i> ) ; dans l'analyse du pollen, une limite de 40 µm est généralement appliquée, <u>c'est le cas pour ce travail</u>
Diamètre du pore	> 2.7 µm
Largeur de l'annulus	> 2.7 µm
Epaisseur de l'annulus	> 2,0 µm (généralement 3.0 µm)

Cette classification place ainsi en partie le pollen des espèces cultivées de panic (*Panicum*), de sétaria (*Setaria*) et du sorgho (*Sorgho*) dans le type graminées sauvages.

Toujours suivant la taxonomie de **Beug (2004)**, en dehors des céréales cultivées, les espèces suivantes appartiennent ainsi au moins en partie au type pollinique *Cerealia* :

<i>Aegilops ovata</i>	<i>Glyceria plicata</i>
<i>Agropyron caninum</i>	<i>Hordeum murinum</i>
<i>Agropyron intermedium</i>	<i>Lygeum spartum</i>
<i>Avena fatua</i>	<i>Secale montanum</i>
<i>Bromus erectus</i>	<i>Setaria glauca</i>
<i>Bromus inermis</i>	<i>Setaria pumila</i>
<i>Bromus mollis</i>	<i>Triticum aegilopoides</i>
<i>Glyceria fluitans</i>	<i>Triticum dicoccoides</i>

À partir de la liste de plantes présentes sur les îles du Kvarner, notamment celles de Cres et Lošinj, établie en 2008 par **B. Wallnöfer**, il est possible de vérifier si les graminées sauvages à gros pollens et gros pores individualisées par **Beug (tableau ci-dessus)** sont présentes aujourd'hui dans la flore de ces îles du nord de la Croatie.

*Aegilops ovata* est reconnue sur ces îles sous le nom de *Aegilops geniculata* ROTH, parfois même comme *Triticum ovatum* L. ou *Triticum vagans*, c'est une plante des sols secs et des chemins.

*Agropyron caninum*, avec ce nom précis d'espèce, n'existe pas sur ces îles selon Wallnöfer, il ne faut toutefois pas l'éliminer complètement car ce genre complexe comporte des espèces déterminées sous d'autres noms, voire même d'autres genres possibles comme *Elymus*, à l'exemple de la suivante sur la liste.

*Agropyrum intermedium*, connue aussi sous le nom de *Agropyrum glaucum* et surtout selon Wallnöfer comme *Elymus hispidus* (Opitz). C'est une plante des lieux incultes et des prairies sèches.

*Avena fatua* L. est bien présente, c'est également une plante des lieux incultes qui peut aussi être associée aux moissons (folle avoine).

*Bromus erectus* est présent également, il pousse dans les prés et coteaux secs. *Bromus mollis* L. (= *Bromus hordeaceus* L.) est présent et croît dans les prairies et pelouses, et les lieux incultes, mais aussi sur les sables maritimes.

*Glyceria plicata* (Biv) est connue comme une sous-espèce de *Glyceria fluitans*. Cette plante se retrouve plutôt dans les fossés et les marais.

*Hordeum murinum* L. se retrouve sur ces îles par sa sous-espèce *leporinum*, elle pousse dans les lieux incultes et secs, et les prairies dégradées.

*Setaria glauca* L. est reconnue par Wallnöfer sous le nom de *Setaria pumila* (Poir.), plante des cultures et des friches. *Setaria pumila* serait donc l'équivalent de *S. glauca*.

Les autres espèces de la liste de Beug ne figurent pas dans l'inventaire de B. Wallnöfer. Un travail de morphologie pollinique sur les espèces effectivement présentes aujourd'hui pourrait être fait pour vérifier cette hypothèse de graminées sauvages à gros pores.

Ainsi, les pollens de type céréales trouvés dans les sédiments de Vrana à partir de 7550 cal. BC (9500 cal. BP) présentent une taille toujours supérieure à 40 µm (**Annexe 11**). Cette distinction de taille n'est donc pas suffisante pour permettre de préciser avec certitude qu'il s'agit bien de pollens de type « *Cerealia* ». Nous considérons donc qu'il y a de fortes chances que ce type pollinique corresponde à des graminées sauvages. Si c'est le cas elles viennent alors se mélanger aux « vraies » céréales à partir de 6200 – 6000 BC.

Une méthode qui pourrait être utilisée pour permettre l'identification du pollen de « *Cerealia* » est celle de la microscopie à contraste de phase. Elle fournit des caractéristiques supplémentaires à partir de la structure fine de la paroi pollinique et aide à distinguer certains types. Cependant, même avec cette méthode, certains types ainsi distingués comprennent également quelques herbacées sauvages. Ainsi, si la combinaison des caractéristiques de taille et de contraste de phase tend à améliorer l'identification, elle ne permet pas de distinguer avec

certitude certains pollens de graminées sauvages des graminées cultivées. C'est pourquoi, l'ajout du suffixe -type reste nécessaire.

À défaut de pouvoir réellement trancher la question en microscopie, il devient alors nécessaire d'associer ces pollens de type céréale avec d'autres marqueurs anthropiques. Les auteurs cités plus haut ont tous insisté sur la nécessité d'associer ces pollens de type céréale à d'autres indices polliniques d'anthropisation et pas seulement les herbacées messicoles et rudérales. Il est ainsi important de relier ces pollens de type de céréale aux variations anormales de certains taux de pollens d'arbres, à l'augmentation d'arbustes pionniers qui colonisent les zones abandonnées après ces phases agricoles ou encore à la recherche de macro-restes végétaux comme [Haas \(1996\)](#) sur le site de Wallisellen-Langachermoos et [Schaal \(Petrequin et al., 2009\)](#) sur le site de Chalain.

Pour le site de Vrana, l'évolution de la courbe de genévrier apporte des informations complémentaires comme celle des spores de champignons coprophiles. L'apparition des premiers pollens de type céréale intervient alors que le milieu est en cours de fermeture avec une diminution notamment des chénopodiacées et de l'armoise et au tout début d'une phase de progression du genévrier et des spores de champignons coprophiles. Ces pollens de type céréale apparaissent donc trop tôt par rapport à l'ouverture du milieu signée dans les taux de pollens d'arbres et appuyée par les taux en hausse de genévrier.

Cependant, ces pollens type céréale apparaissent aussi au milieu d'une phase de transformation importante de la végétation avec la première occurrence du pistachier, du filaire, du charme-houblon et de l'érable. Ces modifications semblent coïncider avec celles déjà observées par d'autres auteurs ([Kacar, 2020](#) ; [Combourieu-Nebut et al., 2013](#)). De plus, ces premiers pollens de type céréale sont présents dans des proportions relativement élevées autour de 5 % alors que dans la plupart des sites du début du Néolithique où ces indices anciens d'anthropisation sont trouvés, les proportions sont de l'ordre de 1 ou 2 % maximum.

Une solution qui permettrait d'obtenir plus d'informations sur ces pollens de type « *Cerealia* » serait éventuellement de mener des analyses génétiques ou de tracer des molécules spécifiques.

Pour finir, il faut envisager la possibilité d'une éventuelle pollution lors du forage et/ou lors du traitement chimique des échantillons. Toutefois, un soin extrême a été pris pour chaque échantillon prélevé, le sédiment en contact avec le tube de PVC a été nettoyé consciencieusement.

Si des pollutions avaient eu lieu (qui pourraient provenir de niveaux plus récents), d'autres taxons auraient également été impactés, or cela ne semble pas être le cas. Enfin, une contamination par un transport longue distance lors du dépôt reste pour le moment difficile à détecter et très peu probable en de telles quantités.

Des études récentes proposent une modification génétique des taxons de poacées et l'apparition de proto-céréales par le biais des effets du surpâturage sur les sols et les strates herbacées par des grands troupeaux d'herbivores ([Andrieu-Ponel et al., 2021](#)). Les auteurs tentent alors de démontrer que les céréales peuvent avoir eu une lignée significativement plus longue et plus diversifiée depuis 2,3 Ma. Des hominidés anciens auraient selon ces auteurs pu bénéficier de la disponibilité de ces proto-céréales, riches en nutriments, ainsi que de diverses autres plantes comestibles, ouvrant la voie, dans la région du Moyen-Orient, à un processus de domestication, qui a atteint son plein épanouissement au cours du Néolithique. Si ces hypothèses méritent d'être envisagées, elles doivent impérativement être confrontées aux données archéologiques et carpologiques.

L'apparition de la vigne cultivée (*Vitis vinifera subsp. sativa Beck.*) il y a environ 6000 – 8000 ans et l'impossibilité de la distinguer en microscopie optique de sa forme sauvage (*V. vinifera subsp. silvestris*) en raison d'une trop grande similarité du grains de pollen peut-être également évoquée ici. Dans ce cas précis, seules des analyses ADN et/ou moléculaires, et une analyse carpologique lorsque c'est possible, peuvent permettre de faire la distinction entre les deux types.

Selon les analyses moléculaires récentes ([Aradhya et al., 2003](#) ; [Arroyo-Garcia et al., 2006](#)), les premières vignes domestiquées seraient apparues pendant la période Néolithique au Proche-Orient, bien qu'il soit possible que plusieurs événements de domestication indépendants se soient produits dans le Proche-Orient et au sud-ouest de l'Europe ([Arroyo-Garcia et al., 2006](#)). Les premiers pépins de raisin domestiquées sont datés à environ 8000 BP sur des sites archéologiques géorgiens et turcs ([This et al., 2006](#)). La véritable première évidence d'une

production de vin a été datée entre 5450 – 5050 BC (7400 – 7000 BP) sur le site de Hajji Firuz (Iran).

Ces espèces domestiquées se seraient ensuite progressivement propagées jusqu'en Europe, des régions transcaucasiennes vers la Basse Mésopotamie, puis l'Égypte jusqu'aux civilisations méditerranéennes (McGovern, 2004 ; McGovern et al., 1996 ; Zohary et Horf, 2000 ; Gismondi et al., 2016). Des restes de pépins de raisin cultivés ont ainsi été découverts au Néolithique en Europe (This et al., 2006). Sur la péninsule italienne, les vignes cultivées ont été introduites dans les colonies du Sud par des contacts et des échanges avec les Grecs. Puis, sous l'influence de la civilisation Romaine, *Vitis vinifera ssp. sativa* s'est étendue à l'intérieur des terres, vers le centre et le nord, et a également atteint de nombreuses régions tempérées européennes, comme l'Allemagne (Forni, 2012 ; Marvelli et al., 2013).

Pour conclure, la limite entre vigne cultivée et sauvage reste très incertaine, voire impossible en palynologie, et est principalement contrainte pour l'heure par les découvertes archéologiques et carpologiques. Ainsi, dans le cadre de cette étude la limite à partir de laquelle on juge que la vigne est cultivée est placée vers 6000 cal. BC (8000 cal. BP). La vigne plus ancienne distinguée dans le diagramme pollinique est donc considérée comme sauvage.

1/f (6250 – 4550 cal. BC / 8200 – 6500 cal. BP) :

Cette dernière sous-zone de la ZP 1 est marquée par une chute importante du chêne pédonculé-pubescent de 50 à 30 % environ. L'espace disponible permet le développement d'arbustes pionniers héliophiles comme le genévrier qui passe de 10 à 55 % environ. Cette période semble donc marquée par une ouverture du milieu. Quelques taxons comme le chêne vert, le charme, le hêtre et le charme-houblon progressent également. De plus, on remarque l'apparition dans le bassin versant de Vrana des pollens d'oléacées proches de l'olivier (*Olea*) dès 5535 cal. BC (7485 cal. BP). Enfin, les cichorioidées, les chénopodiacées et les iridacées diminuent à l'inverse des éricacées qui progressent. Les herbacées ne représentent plus que 10 % de l'assemblage pollinique. Le reste de l'assemblage est constitué à 60 % d'arbustes, 30 % d'arbres dont 10 % de conifères.

Dans cette sous-zone, les spores de champignons coprophiles de type *Sporormiella* montrent trois phases d'augmentation notées respectivement à 6050, 5550 et 4800 cal. BC



(8000, 7500 et 6750 cal. BP) ; elles coïncident avec les pics du genévrier. Les sordariacées ne présentent que deux phases d'augmentation à 5550 et 4800 cal. BC.

L'apparition des premiers grains de pollens d'oléacées proche de l'olivier cultivé est observée dans les sédiments du lac Vrana vers 5535 cal. BC (7485 cal. BP). L'olivier est considéré comme une espèce native de l'est du bassin méditerranéen qui s'est ensuite propagée le long des côtes méditerranéennes.

Selon la littérature disponible, durant les périodes glaciaires du pléistocène, le genre *Olea* s'est concentré sur le pourtour méditerranéen dans des zones refuges climatiquement plus favorables (Suc et al., 1984 ; Fauquette et al., 1999 ; Terral et al., 2009).

Au début de l'Holocène, le retour à des conditions plus favorables a permis la reconquête progressive d'*Olea* à de nouvelles niches écologiques. Puis son extension a été favorisée vers 5050 – 4050 BC (7000 – 6000 BP) par les activités humaines (Diez et al., 2015 ; Lebreton et al., 2015). Le principal centre de domestication de l'olivier a été identifié au nord-est du Levant (frontière syro-turque) bien que la partie centrale du bassin méditerranéen ait récemment été considérée comme un centre local de domestication (Diez et al., 2015). L'olivier cultivé se serait ensuite diffusé progressivement le long des côtes vers l'ouest.

Comme pour le cas des pollens de céréale et de vigne, le principal problème rencontré est l'identification certaine des pollens d'oléacées. La distinction entre des pollens d'oliviers cultivés avec des pollens d'oliviers sauvages est impossible par une simple observation au microscope optique ou par des mesures de leur dimension. De plus, la forme du pollen d'olivier peut rappeler d'autres espèces de pollens d'oléacées. Chacun de ces pollens présentent en effet une exine réticulée et une taille de grain quasiment similaire. La distinction peut être d'autant plus compliquée lorsque les pollens sont mal conservés et qu'ils sont en partie altérés comme c'est souvent le cas ici. La détermination avec précision du pollen d'olivier n'est donc possible qu'en microscopie électronique à balayage.

En conclusion, l'apparition des premières oléacées dans les sédiments de Vrana est antérieure à la période d'extension de l'olivier cultivé depuis le nord-est du Levant donnée par la littérature. Ces pollens pourraient donc éventuellement correspondre à des pollens d'*Olea*

sauvages ou d'autres oléacées. Ainsi, pour l'interprétation ne sont considérés comme cultivés, les pollens d'oléacées comptés à partir de 4000 BC environ (6000 BP).

**ZP 2 (4550 – 2018 cal. BC/AD / 6500 – (-68) cal. BP)**

2/a (4550 – 1650 cal. BC / 6500 – 3600 cal. BP) :

Dans cette deuxième zone pollinique, d'importants changements sont visibles avec l'augmentation très nette du chêne vert qui passe de 5 à 15 % et du chêne pédonculé-pubescent qui passe de 30 à 50 %. En parallèle, le genévrier chute brusquement à des valeurs inférieures à 5 % ; le noisetier diminue également. Les taux de sapin augmentent légèrement de 2 à 10 %. Les autres taxons d'arbres et d'herbacées varient très peu à l'exception des iridacées qui progresse jusqu'à 2250 cal. BC (4200 cal. BP) avant de diminuer. Le total de grains de pollen compté est ainsi composé par près de 89 % d'arbres dont 10% de conifères, 10 % d'herbacées et 1 % d'arbustes. On observe donc pour cet épisode une fermeture progressive du milieu. Enfin, les spores de champignons coprophiles diminuent rapidement.

2/b (1650 cal. BC – 450 cal. AD / 3600 – 1500 cal. BP) :

Depuis 1650 et jusqu'à 50 cal. BC (3600 – 2000 cal. BP), le chêne vert diminue avant d'augmenter de nouveau pour atteindre un maximum de 20 % à 950 cal. AD (1000 cal. BP). Le chêne pédonculé-pubescent quant à lui diminue progressivement depuis 1050 cal. BC (3000 cal. BP). L'orme, le noisetier, le filaire, le bouleau, le charme-houblon, le hêtre et le charme progressent très légèrement à partir de 1650 cal. BC (3600 cal. BP), tout comme le genévrier mais dès 50 cal. BC (2000 cal. BP). L'aulne augmente brusquement vers 1710 cal. BP. La courbe de l'olivier devient continue et augmente à partir de 550 cal. BC (2500 cal. BP). La première occurrence du noyer (*Juglans regia*) est notée à environ 250 cal. BC (2130 cal. BP) et celle du châtaignier (*Castanea sativa*) à environ 175 cal. AD (1710 cal. BP).

Parmi les herbacées, on observe une augmentation de l'armoise, des plantains, des poacées, brassicales et des éricacées. On peut noter également un pic de céréales jusqu'à 10 % vers le milieu du VIème siècle avant J.-C (2500 cal. BP). Enfin, on observe une nette augmentation des spores de champignons coprophiles.

2/c (450 – 1450 cal. AD / 1500 – 500 cal. BP) :

Cette période est marquée par une baisse générale du chêne vert de 20 à 5 % environ et du chêne pédonculé-pubescent de 50 à 25 %. D'autres taxons arboréens comme l'aulne, le charme, l'ostryer, le hêtre et le noisetier sont en nette progression. Au contraire, l'olivier diminue tout comme le châtaignier. Le genévrier augmente quant à lui très légèrement et ses taux deviennent plus continus. Les spores de champignons coprophiles atteignent plusieurs maximums. Enfin, *Tetrahedron* augmente brusquement à environ 80 % entre 450 et 1150 cal. AD (1500 – 800 cal. BP)

2/d (1450 – 2018 cal. AD / 500 – (-68) cal. BP) :

Le chêne vert et le chêne pédonculé-pubescent entament une légère hausse respectivement vers 1850 cal. AD (100 cal. BP) et 1700 cal. AD environ (250 Cal. BP). L'olivier, le châtaignier, la vigne et le pin augmentent rapidement. L'aulne, le charme, l'ostryer, le hêtre diminuent. Le genévrier profite de l'espace nouvellement disponible et atteint jusqu'à 25 % à environ 1700 cal. AD (250 cal. BP) puis entame une rapide diminution.

Concernant les herbacées, les poacées, les plantains, les astéracées et brassicales ont tendance à augmenter particulièrement à partir de 1550 cal. AD (400 cal. BP). On peut noter une très légère hausse des céréales. On remarque également dans cette sous-zone, de nouveaux pics de spores de champignons coprophiles de type *Sporormiella* et Sordariacées. On assiste donc dans cette dernière période à la réouverture progressive du milieu avec un regain des cultures et des pâtures. L'assemblage pollinique est constitué à 75 % d'arbres dont 10 % de conifères, 10 % d'arbustes et 15 % d'herbacées. Enfin, *Tetrahedron* atteint un maximum à 90 % durant cette période.

## III.2 Partie 2 : Le lac Omišalj, île de Krk

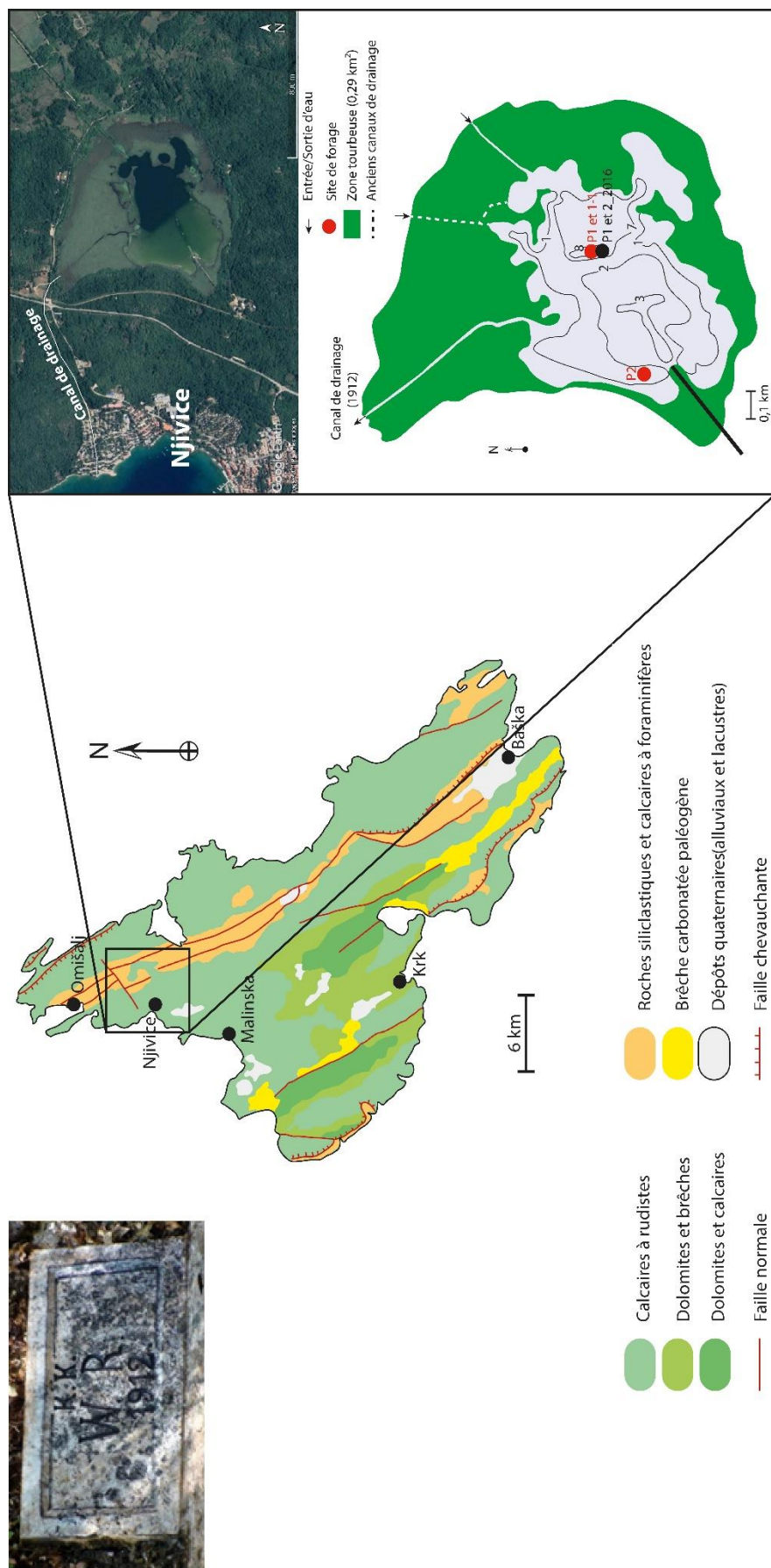
### III.2.1 Données physico-chimiques

Le lac Omišalj (Njivice ou Omisaljско jezero) est une cryptodépression se situant près de la ville de Njivice, sur l'île de Krk (45°10'12.13 " N ; 14°33'51.14" E ; **Figure 55**). Il couvre une superficie de 0,35 km<sup>2</sup> et représente un volume moyen de 1,5 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. Son réservoir se divise en deux sous-bassins séparés par un canal sous-lacustre étroit : un premier bassin d'une profondeur maximale de 8 m à l'est, et un second peu profond à l'ouest de 3 m maximum (**Figure 55**).

Les premières recherches sur le lac ont été menées par **Cubich (1874)**. Ces travaux sont ensuite repris et développés par **Gavazzi (1904)** qui détaillera davantage la macro-végétation et les communautés planctoniques du lac Omišalj. Depuis, un certain nombre d'études écologiques et biologiques ont été faites (**Trinajstić, 1965 ; Petrik et Meštrov, 1968 ; Petrik et al., 1971 ; Justić, 1981; Meštrov et Justić, 1983 ; Justić et al., 1984, 1986 et 1991 ; Kerovec et al., 2000b ; Gligora et Plenković-moraj, 2003 ; Gligora et al., 2003 ; Thèse d'Aleksandar Popijač, 2003**). À noter, qu'aucune étude paléoenvironnementale n'est référencée dans la littérature à ce jour.

Le bassin versant du lac Omišalj (20 km<sup>2</sup>) est majoritairement calcaire et draine les eaux de toute la partie centrale carbonatée de l'île de Krk (**Figure 55 ; Golubović et al., 1962 ; Loušin et Prvanović, 1965 ; Pavlin et al., 1968**). L'apport en eau n'est pas constant et uniforme dans tout le bassin versant. Lors des fortes pluies (en hiver), un écoulement de surface se produit à l'est du lac drainant les eaux des zones de flysch du Mali et de Veliki Lug. Les eaux sont ensuite transportées jusqu'au lac par le biais d'un étroit ruisseau. Près du bord sud du lac, deux sources souterraines jaillissent en continu dans le lac lui-même et apportent avec elles des alluvions. Enfin, l'eau excédentaire est évacuée à l'ouest par un canal de drainage relié à la mer et construit en 1912 puis prolongé en 2000 – 2001 (**Figure 55**).

Le niveau du lac Omišalj se situe à environ 1,5 m.a.s.l. Lorsque le niveau dépasse 2,4 m.a.s.l, les eaux s'écoulent alors par le canal de drainage aménagé. Le maximum d'eau a été enregistré par **Gavazzi (1904)** à 4,5 m.a.s.l. Depuis 1970, le niveau du lac a considérablement diminué en raison du pompage intensif, brisant le canal de drainage menant à la mer.



Le lac Omišalj est un lac eutrophe dont les rives sont bordées d'une large bande de tourbe (0,29 km<sup>2</sup> ; **Pavlin et al., 1968**) et d'une ceinture de roseaux de type *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. et cladium des marais *Cladium mariscus* (L.) Pohl. La surface du lac est en grande partie recouverte de nénuphars (*Nuphar lutea*). En profondeur, la macrovégétation sous-lacustre est absente.

En été, le lac est soumis à une stratification thermique verticale. L'épilimnion peut-être ainsi délimité à environ 4 m de profondeur pour le sous bassin le plus profond (est). Dans la partie ouest et moins profonde du lac, aucune stratification n'est observée. Cette partie peut donc être considéré comme un environnement relativement homogène tout au long de l'année.

### III.2.2 Historique de l'anthropisation récente

Le lac d'Omišalj a été cartographié depuis 1774 (**Figure 56**) et connaît d'importantes transformations anthropiques depuis 1970 où un remblai a été construit afin de le rehausser d'un mètre et permettre d'augmenter son volume.

En 1972, une station d'épuration a été construite près du lac. Jusqu'en 1999, des sels d'aluminium utilisés dans le traitement des eaux ont été relâchés, polluant le réservoir d'Omišalj. Des particules gélatineuses riches en Al, se sont déposées près de la rive ouest du lac. Ces éléments, remis en suspension lors des évènements pluvieux, ont ensuite recouvert l'intégralité du fond du lac. Pour pallier ce problème, l'Al a été ensuite remplacée par des sels de fer.

Jusqu'en 1999, le lac de Omišalj était la principale source d'eau potable de la population autochtone sur toute la partie nord-est de l'île de Krk. Cette ressource naturelle a été depuis abandonnée en raison d'une mauvaise gestion de son bassin versant (pâturage intensifs des moutons, plusieurs réseaux de drainage) qui a entraîné une dégradation de la qualité des eaux (eutrophisation, forte concentration de bactéries fécales dans l'eau, **Torres 1999 et 2000 ; Beauregard et al., 2002**). D'autre part, les sédiments ont été largement perturbés par plusieurs dragages et même par le naufrage d'une barge...

Récemment, la zone d'Omišalj a été classée Natura2000 en raison de sa diversité écologique. Grâce notamment au diagnostic de **Torres (1999)**, des recherches sont menées pour

développer à long terme des techniques de bio-manipulation et phyto-remédiation afin de réhabiliter les eaux lacustres et développer une gestion durable de cette ressource.

Cependant, l'eau est un facteur important en milieu insulaire pour le développement économique et le tourisme. Ainsi, les habitants de l'île de Krk sont actuellement contraints d'acheminer de l'eau du continent par le biais de conduites souterraines et sous-marines et de pomper en partie les sources karstiques.



Figure 56. Evolution du lac Omišalj d'après les cartes anciennes : première campagne militaire (1774-1775) ; seconde campagne militaire (1821 – 1824) ; troisième campagne militaire au 1:25000 (1869 – 1887) ; carte de 1910 au 1:200000 ([www.mapire.eu](http://www.mapire.eu))

### III.2.3 OMI\_2018

Sur le lac Omišalj, La première campagne de forages a été effectuée en 2016, afin d'échantillonner plusieurs carottes de surface dans la partie profonde du lac (OMI\_P1\_2016 et OMI\_P2\_2016). Ces séquences ont fait l'objet de plusieurs datations afin d'estimer l'âge de la séquence sédimentaire. Cependant, les dates obtenues montraient plusieurs inversions. La seconde campagne en 2018 a permis quant à elle d'effectuer un carottage profond de 3 m

environ (OMI\_2018\_1-1, OMI\_2018\_1-2) et de deux carottages de surface (OMI\_2018\_P1 et OMI\_2018\_P2) dont une en zone littorale (**photo 9 ; Figure 55**).



*Photo 8. Campagne de forage sur le lac Omišalj à l'automne 2018*



### **III.2.4 Résultats**

#### *III.2.4.1 Carotte composite*

Lier à des problèmes de corrélation seul les sections de carotte OMI\_2018\_1-1 et 1-2 ont été exploitées. Dans la suite de ce manuscrit, la séquence est ainsi appelée OMI\_2018.

#### *III.2.4.2 Sédimentologie de la carotte OMI\_2018*

Les sédiments du lac Omišalj (OMI\_2018) sont relativement homogènes et ne présentent pas de véritables grandes variations (**Figure 57**). Deux unités lithologiques peuvent être cependant discernées.

La première unité (295 – 27 cm) est composée d'un dépôt de gyttja comprenant de nombreux morceaux de racines (249, 239 et 237 cm), des cuticules de plantes (281, 279, 263, 253, 157, 154, 153 et 150 cm) et de débris de végétaux aquatiques (295, 293, 275, 273, 271, 217, 215, 183, 179, 126, 125, 124, 123, 120, 119, 118, 117, 113, 109, 108, 107, 105 et 75 cm). De rares morceaux de bois (203, 165, 99, 95 et 87 cm) et quelques graines à 155 cm ont également été trouvés. Les teneurs en eau ne varient pas drastiquement le long de la carotte. Dans cette unité, la teneur en eau augmente progressivement et passe de 64 à 75 % environ avant de chuter brusquement à 27 cm à 66 %. Enfin, quelques laminations centimétriques sont visibles à 290, 282, 270, 255 et 250 cm de profondeur.

La seconde unité (27 – 0 cm) est composée de sédiments argileux de couleur brun clair. Aucun macrorestes végétaux n'a été trouvé pour cette intervalle de profondeur et la teneur en eau augmente brusquement jusqu'à atteindre 76 %.

#### *III.2.4.3 Modèle d'âge/profondeur*

La chronologie récente des trente premiers centimètres a été établie à l'aide d'un modèle CRS au plomb (**Figure 58 et 59**). Une décroissance progressive de l'activité du plomb est observée jusqu'à 25 cm (**Figure 58**). Les taux les plus importants de césium 137 sont observés entre 16,5 et 0 cm avec deux pics principaux à 16,5 et 1,5 cm (**Figure 60**). Ces résultats apparaissent suspects en particulier sur le sommet à 1,5 cm où le pic survient beaucoup trop proche de la surface pour correspondre à l'évènement de Tchernobyl de 1986. Le césium 137 est donc fortement susceptible d'avoir été influencé par une remobilisation du sédiment. Le

choix a donc été fait de l'exclure du modèle d'âge final. L'âge ainsi estimé du plomb est donc d'environ 1858 AD (92 cal. BP) à 25 cm.

Au total, quinze échantillons ont été datés par ARTEMIS (Lyon, France) et le laboratoire de radiocarbone de Poznań (Pologne) afin de tenter d'établir la chronologie de OMI\_2018 (**Tableau 5**).

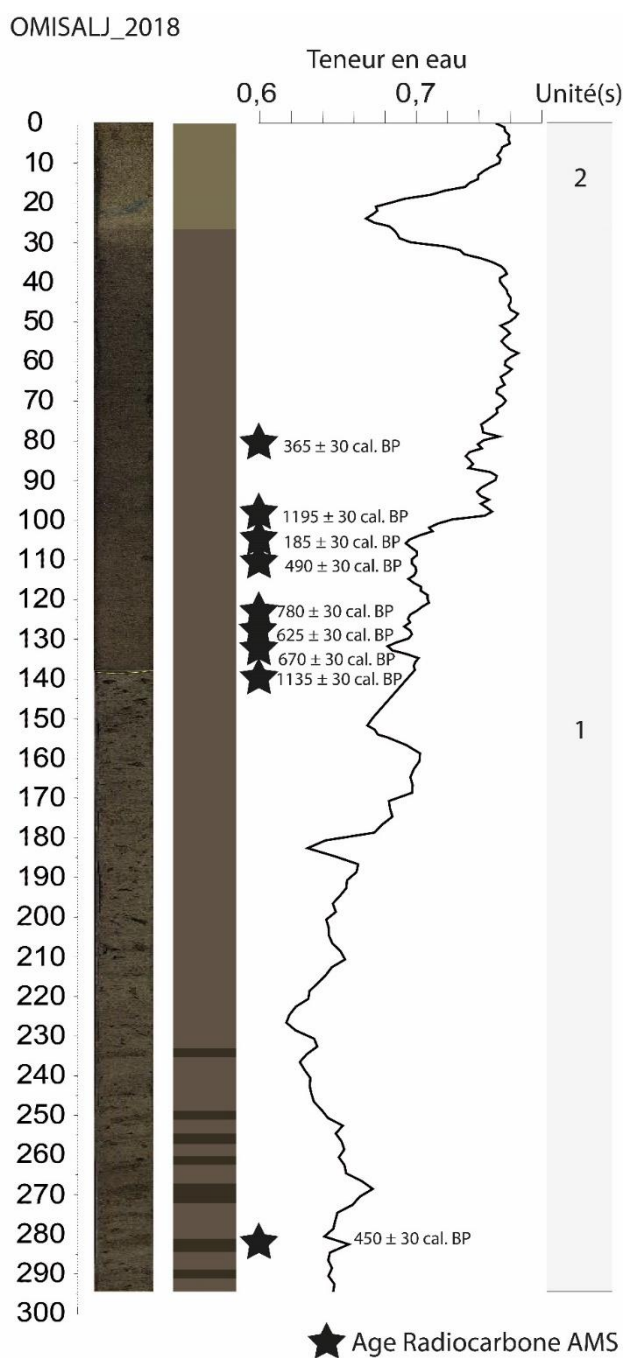


Figure 57. Log stratigraphique et teneur eau de la carotte OMI\_2018

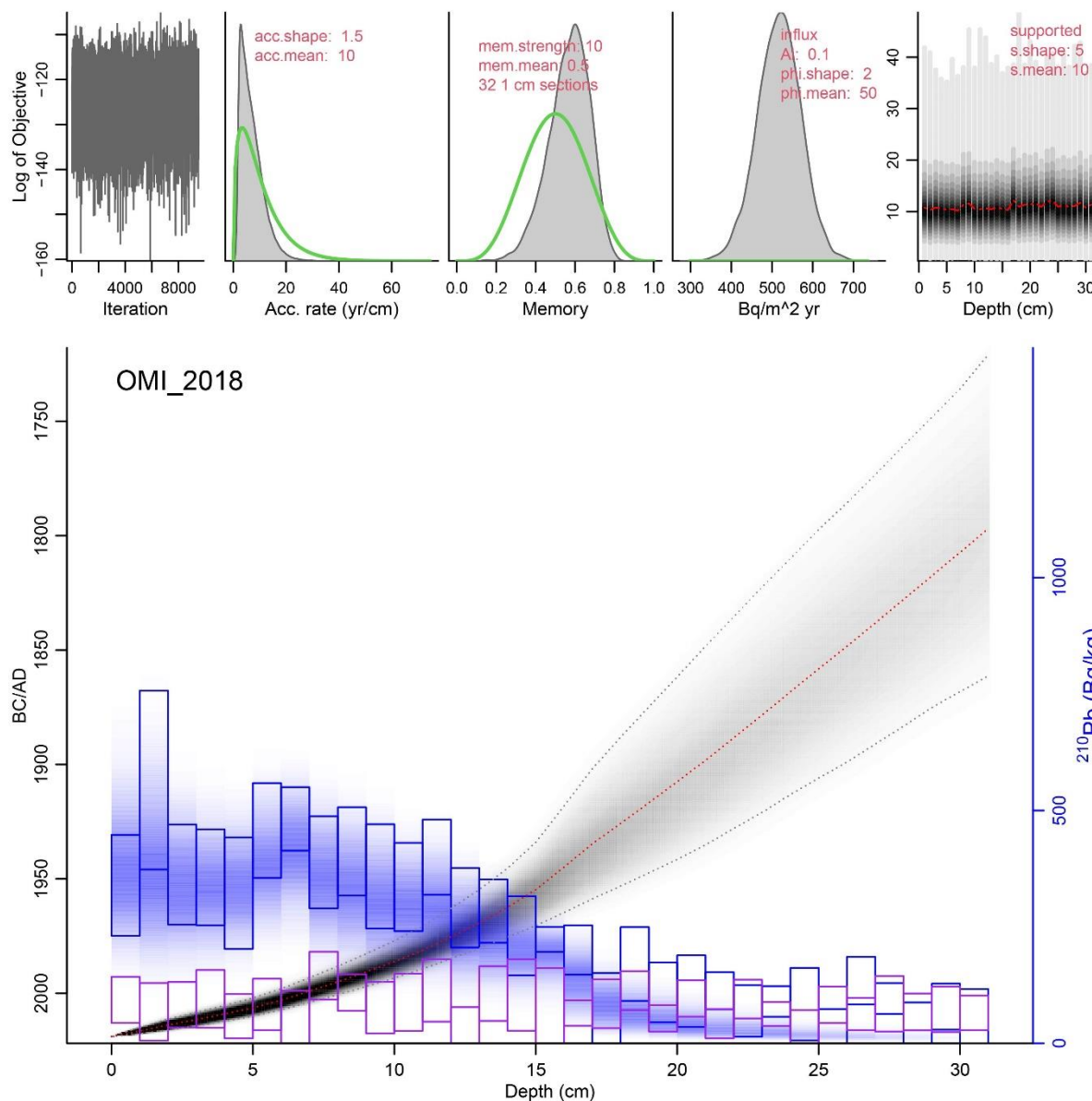


Figure 58. Modèle d'âge au plomb du lac Omišalj (OMI\_2018), tracé à l'aide de package BACON intégré dans Rstudio comprenant la courbe du plomb totale (violet), le radon en équilibre (rose) et le modèle d'âge CRS obtenu manuellement sous Excel (vert) et calculer avec PLUM (gris)

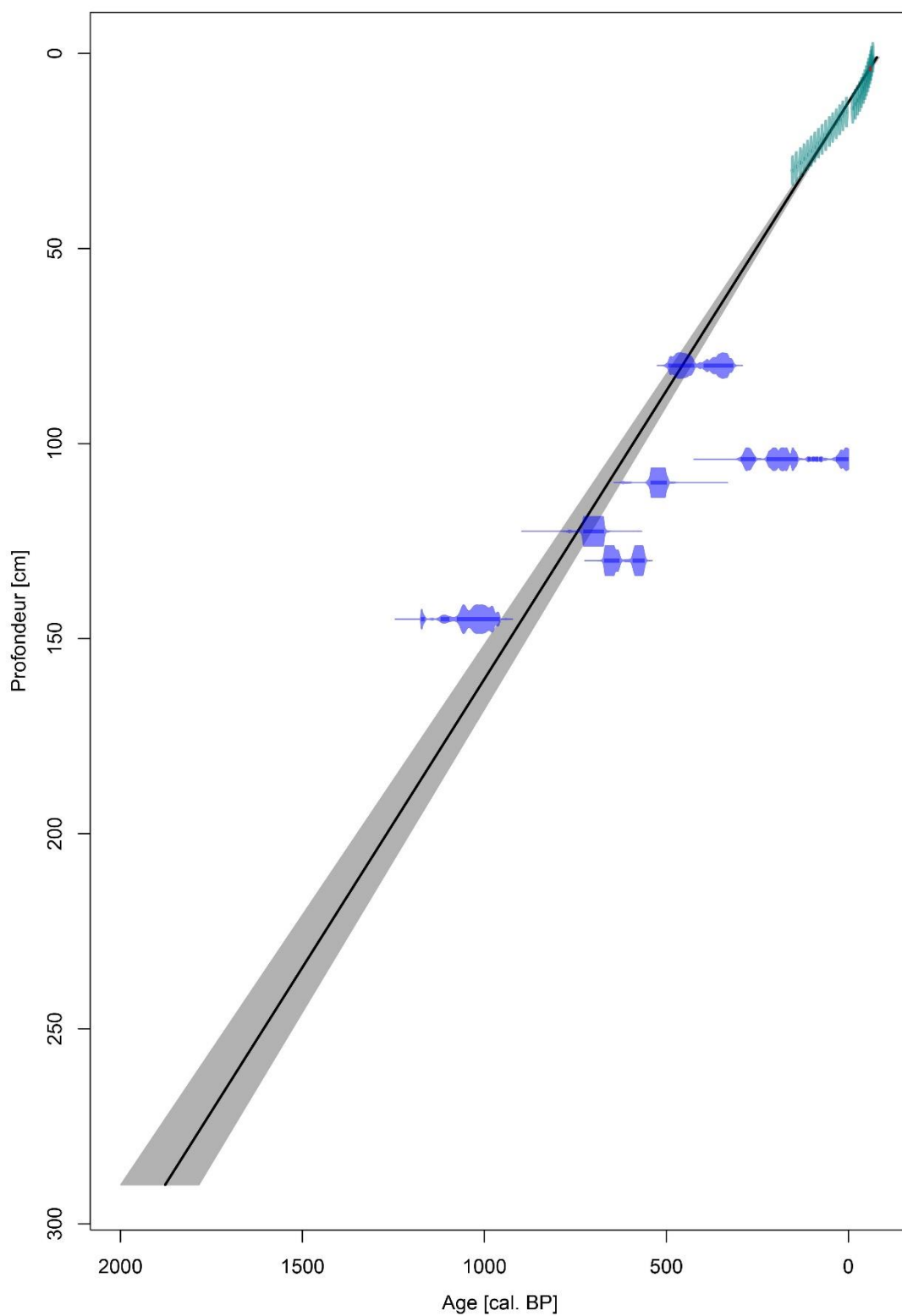
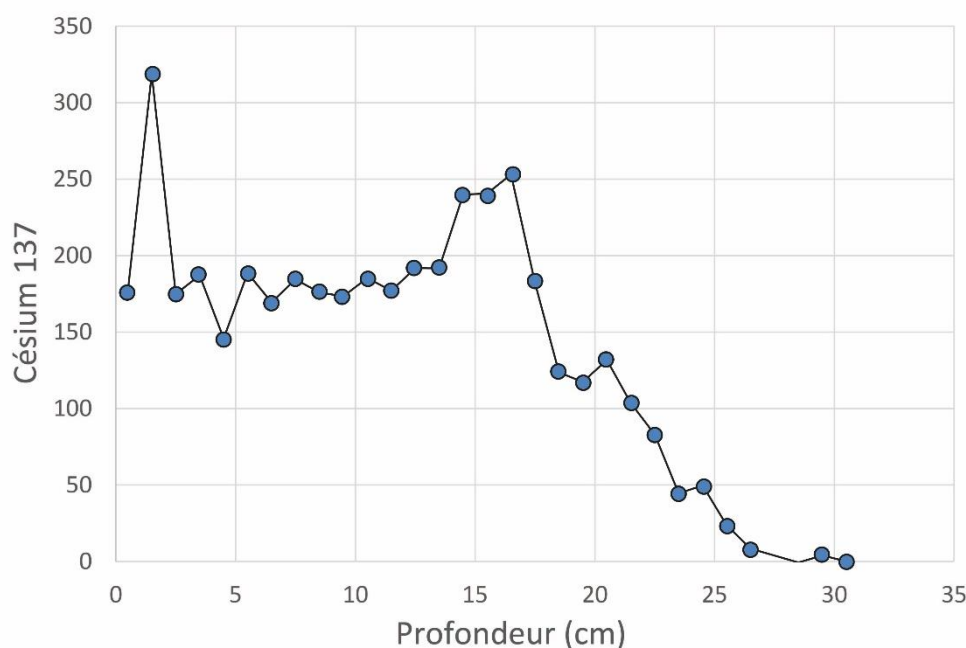


Figure 59. Modèle d'âge obtenu des dates radiocarbones sur les sédiments du lac Omišalj (OMI\_2018)



*Figure 60. Activité du césium 137 sur les trente premiers centimètres de la carotte OMI\_2018*

Les résultats obtenus n'ont cependant pas permis l'établissement d'un modèle d'âge fiable. L'ensemble des dates radiocarbone présentent de multiples inversions. Les raisons peuvent être nombreuses :

- les sédiments d'Omišalj contenaient de rares macrorestes terrestres identifiables. Le matériel utilisé pour la datation a donc été essentiellement de la matière végétale non-identifiée sans toute vraisemblance d'origine aquatique (feuilles de macrophytes, **Annexe 12**) ;

- les sédiments ont été trop fortement perturbés par les activités humaines du début du XXème – XXIème siècle (travaux de sur-élévation des rives du lac, pompage et pâturage intensif, etc.) ;

- le lac Omišalj est un système complexe alimenté par des eaux de surface et des eaux souterraines qui jaillissent directement dans les eaux du lac. Ces eaux souterraines ont très certainement eu une influence sur le vieillissement des âges radiocarbone.

Si l'on tente d'établir un modèle d'âge avec la package CLAM du logiciel R à partir des datations obtenues sur la séquence complète sans en exclure alors les sédiments les plus profonds (295 cm) seraient datés par extrapolation et en admettant un taux de sédimentation relativement constant vers 40 cal. AD (1910 cal. BP ; **Figure 59**).

*Chapitre III / Partie 2 : Le lac Omišalj, île de Krk*

Bien évidemment cette date reste très approximative au regard des importantes incertitudes. Cependant, cette date pourrait se justifier notamment à l'aide des analyses palynologiques. En effet, dans le dernier échantillon palynologique mesuré (295 cm), plusieurs pollens de noyer et de châtaignier ont été comptés or nous savons d'après la littérature disponible que ces deux essences apparaissent approximativement pendant la période gréco-antique. Ainsi, si l'on admet qu'il n'y a eu aucune remobilisation et/ou pollution des sédiments, le remplissage sédimentaire ne peut être dans tous les cas antérieurs à cette période. Cependant, par soucis de précision, l'ensemble des résultats obtenus sur la carotte OMI\_2018 sont décrits en fonction de la profondeur et non en fonction d'un modèle d'âge/profondeur.

Code laboratoire	Profondeur (cm)	Matériel	Age 14C ± 1σ (BP 1950)	Intervalles calibrés à 95.4%	Référence
OMI2018					
OMI P1					
SacA-61056	80	Matière végétale	365 ± 30	AD 1453-1635	Cette étude
SacA-61057	100	Bois	1195 ± 30	AD 707-950	Cette étude
SacA-61058	104	Bois	185 ± 30	AD 1653 - 1950	Cette étude
SacA-61059	110	Matière végétale	490 ± 30	AD 1404 - 1452	Cette étude
SacA-61060	122-123	Matière végétale	780 ± 30	AD 1219 - 1280	Cette étude
SacA-61061	128	Matière végétale	625 ± 30	AD 1295 - 1399	Cette étude
SacA-61062	130	Bois	670 ± 30	AD 1357 - 1392	Cette étude
OMI P2					
SacA-62540	21-22	Bois	3185 ± 30	BC 1506 - 1411	Cette étude
SacA-62541	45-46	Charbon	3540 ± 30	BC 1959 - 1751	Cette étude
SacA-62542	70-71	Matière végétale	3035 ± 30	BC 1402 - 1210	Cette étude
SacA-62543	95-96	Matière végétale	4185 ± 30	BC 2889 - 2636	Cette étude
OMI 1-2					
Poz-129838	0	Matière végétale	1135 ± 30	AD 774 – 993	Cette étude
Poz-129839	145	Matière végétale	450 ± 30	AD 1413 - 1480	Cette étude
OMI2016 (P2)					
Lyon-1635	90-91	Matière végétale	1635 ± 30		Cette étude
Poz-82806	124-124,5	Fragment de feuille	620 ± 50		Cette étude

*Tableau 5. Résultats des datations au radiocarbone des sédiments du lac de Omišalj (Krk). En jaune, les dates exclues du modèle d'âge/profondeur de OMI\_2018*

#### *III.2.4.4 Analyse diagraphique*

Le diagramme Q7/4 obtenu des sédiments du lac Omišalj (OMI\_2018) révèle la présence de quatre grandes types de sédiments (dépôt de matière organique de type mélanoidine, dépôt de matière organique fraîche de type chlorophylle a et ces produits dérivés, dépôt argileux et dépôt riches en fer ; **Figure 61**). Les échantillons appartenant aux dépôts riches en fer sont caractérisés par de fortes valeurs de leur dérivés premières à 435 et 525 nm correspondant à la signature de la Goethite et à 555 et 575 nm correspondant à la présence d'Hématite. Les dépôts de matière organique de type Mélanoidine ont quant à eux une dérivée première croissante entre 550 et 700 nm (**Figure 61**). La Mélanoidine est un pigment brun lié à la dégradation de la matière organique. C'est un composé qui se forme principalement lors du processus d'humification des sols, bien que dans certains cas, il puisse se former dans le milieu aquatique (**Aycard et al., 2003 ; Debret et al., 2011**). Plus précisément, les sédiments de l'unité 2 (295 – 27 cm) contiennent principalement des argiles, des dépôts ferreux et des dépôts de matière organique (chlorophylle a et ces produits dérivés, mélanoidine) alors que les sédiments de l'unité 1 (27 – 0 cm) semblent surtout composés de matière organique de type chlorophylle a et ses produits dérivés.

L'échantillonnage de OMI\_2018 a été effectué tous les deux centimètres de 295 jusqu'à 138 cm puis par tranche centimétrique jusqu'au sommet. Chaque échantillon a ensuite été congelé à -80 °C puis lyophilisé. Cela a permis de mener des analyses notamment de perte au feu présentées dans la **Figure 62**. Les résultats obtenus montrent peu de variations de la teneur en matière organique, en carbonates et en éléments minérogéniques dans les sédiments. Dans l'unité lithologique 1, la matière organique augmente progressivement de 16 à 24 %, les carbonates oscillent en moyenne autour de 35 % avec un pic à 56 % à 32 cm. Enfin, les éléments minérogéniques diminuent graduellement de 48 à 25 % à 32 cm. La susceptibilité magnétique varie peu entre 2 et -4 SI.

Dans l'unité 2, la matière organique et les carbonates présentent un creux à 20 cm respectivement à 12 % et 35 %. Les éléments minérogéniques augmentent brusquement à 20 cm à 55 %. La susceptibilité magnétique augmente rapidement de -1 à 3,5 SI avant de redescendre brusquement à -5 SI.

# Diagramme Q7/4

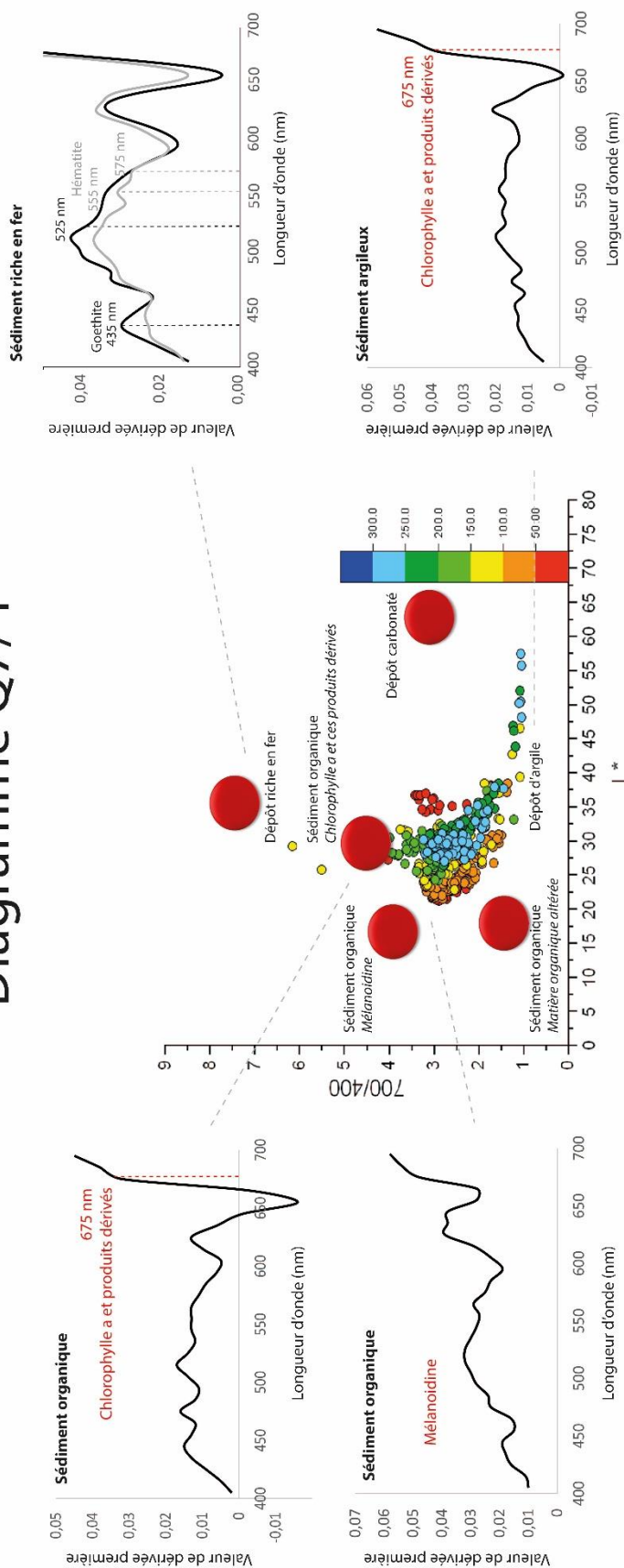


Figure 61. Diagramme Q7/4 obtenu des sédiments d'Omišalj (OMI\_2018)



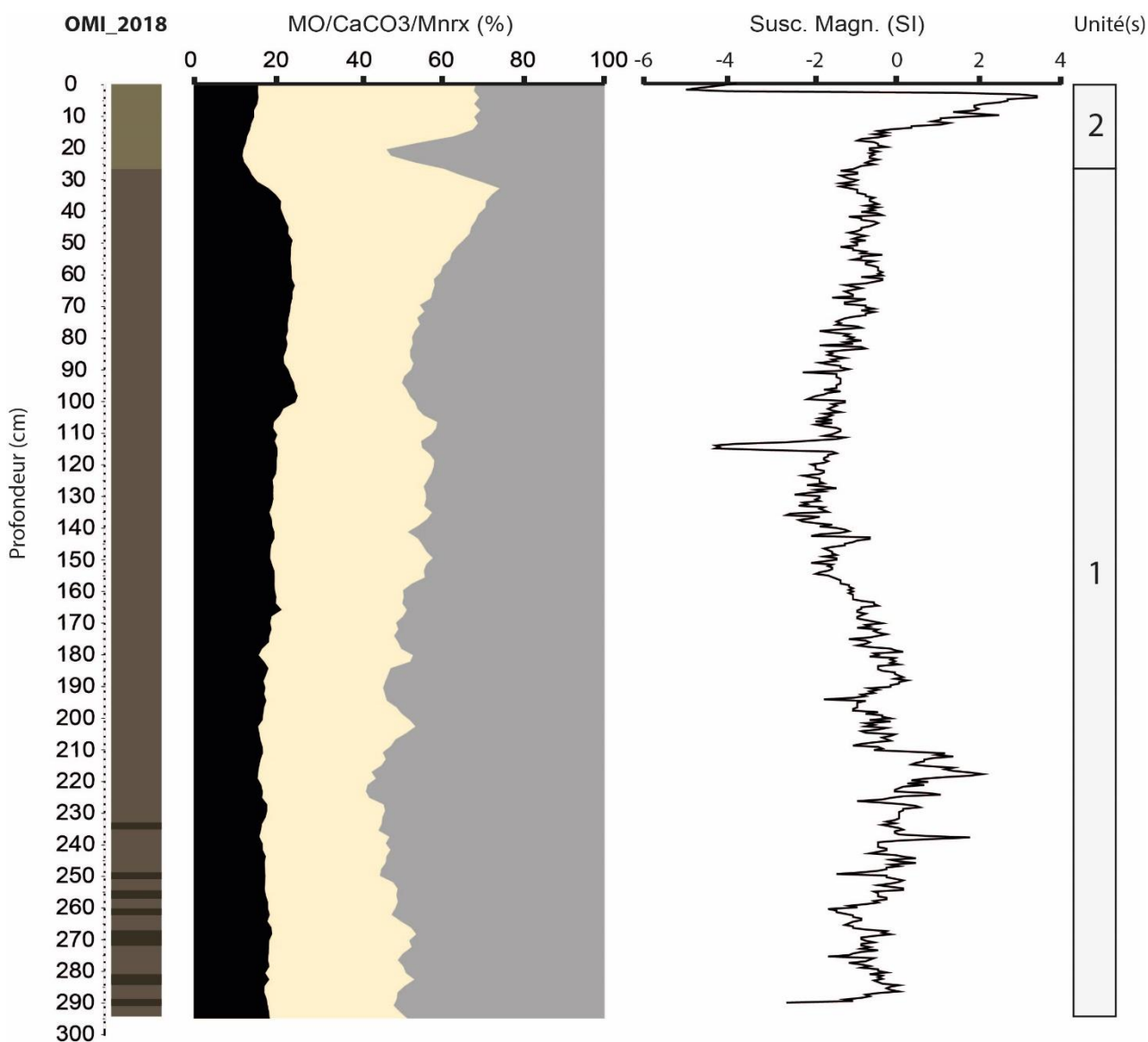


Figure 62. Résultats de l'analyse de perte au feu (matière organique, carbonates, éléments minérogéniques) et de la susceptibilité magnétique de OMI\_2018

### III.2.4.5 Analyse palynologique

Les analyses palynologiques ont été menées ponctuellement tous les 5 cm environ jusqu'à 295 cm sur la carotte OMI\_2018. Le diagramme pollinique obtenu (**Figure 63**) permet de discerner deux zones polliniques (zone 1 (Z1) entre 295 et 60 cm et zone 2 (Z2) entre 60 et 0 cm).

Zone 1 (295 – 60 cm) :

La végétation est principalement constituée de feuillus dont du chêne pédonculé-pubescent (25 à 30 % environ). Dans une moindre mesure, on retrouve également du chêne vert (5 %), de l'ostryer (5 – 10 %), du hêtre (10 % en moyenne), de l'olivier (5 %) et dans de faibles proportions (moins de 5 %) du bouleau, du noisetier, de l'aulne, du châtaignier, du noyer, du filaire et du pistachier. Les proportions de l'ensemble de ces taxons restent relativement constantes dans tout cet intervalle. Seul le châtaignier semble montrer une légère diminution à 120 cm. Le sapin (5 – 10 %) et le pin (2 à 4 %) dominent le groupe des conifères ; le genévrier (9 – 16 %) celui de arbustes et les poacées (5 % en moyenne) celui des herbacées. La présence de pollens de type « *Cerealia* » (5 % en moyenne) et de plusieurs indices polliniques d'anthropisation (armoïse, plantain, oseille, ambroisie, centaurée) indique que des activités humaines importantes ont lieu pour cette période dans le bassin versant du lac Omišalj. Les fortes proportions de spores de champignons coprophiles (*Sporormiella* et Sordariacées) confirment la présence à proximité du lac de bétail. D'après le modèle d'âge/profondeur obtenu, cette phase se situerait entre 40 et 1630 cal. AD.

Zone 2 (60 – 0 cm) :

Cette deuxième zone est marquée par une légère ouverture du milieu avec la baisse progressive des chênaies et l'augmentation jusqu'à 20 % du genévrier. D'autres essences d'arbres présentent également une petite diminution comme le hêtre, l'olivier, le sapin et le noisetier. Au contraire, l'ostryer, le bouleau et le pin tendent à augmenter. Parmi le groupe des herbacées, les poacées augmentent progressivement jusqu'à 10 % à 20 cm avant de diminuer à 5 % et l'ambroisie progresse en particulier sur les 30 derniers centimètres. Les pollens de type « *Cerealia* » restent à des valeurs constantes. Enfin, les proportions de spores de champignons coprophiles montrent une diminution importante. L'impact des activités humaines sur la végétation est donc bien visible notamment par la présence de nombreux IPA et d'une phase de défrichement mais les activités pastorales semblent moins favorisées. Cette phase d'ouverture correspondrait suivant le modèle d'âge/profondeur à la période entre 1630 à 2018 cal. AD environ.



### III.3 Partie 3 : Les lacs d'Osor et de Punta Secca

#### III.3.1 Généralités

Les recherches menées sur l'archipel du Kvarner ont amené au forage et l'analyse de petits systèmes lacustres, potentiellement plus sensibles et plus réactifs à l'anthropisation du milieu. Au sud de l'île de Cres et près la ville d'Osor, se situent entre 1 et 4 m a.s.l des petites dépressions lacustres ; le lac d'Osor d'une surface de 0,02 km<sup>2</sup> (0,23 km de long ; 0,12 km de large) et le lac Punta Secca de 0,01 km<sup>2</sup> (0,11 km de long ; 0,07 km de large ; **Photo 10 ; Figure 64 et 65**). Ils correspondent à des « dolines » qui ont été submergées lors de l'élévation du niveau marin au début de l'Holocène (**Brunovic et al., 2019**). Episodiquement, ils peuvent encore être inondés par des entrées d'eau marine depuis le système karstique profond. Ces entrées d'eau salée peuvent être à l'origine de nombreuses perturbations de la stratigraphie, de la bioturbation et de l'évolution de la végétation de ces lacs. Leurs eaux saumâtres sont faiblement profondes (~50 cm pour Osor ; ~40 cm pour Punta Secca) et leur salinité diffère suivant les pénétrations d'eau de mer et des précipitations qui diluent leurs eaux. Enfin, leur encaissant est principalement composé de calcaire. Ces deux lacs sont pourvus de ceintures tourbeuses d'épaisseurs variables (1000 – 1700 m<sup>2</sup>) et la faible profondeur d'eau permet le développement d'une végétation lacustre. Ces deux lacs sont peuplés de foraminifères (*Haplophragmoides canariensis* et *Trochammina inflata* pour le lac Punta Secca et *Ammonia tepida* pour le lac d'Osor ; **Brunovic et al., 2019**)



Photo 9. Lac de Punta Secca.

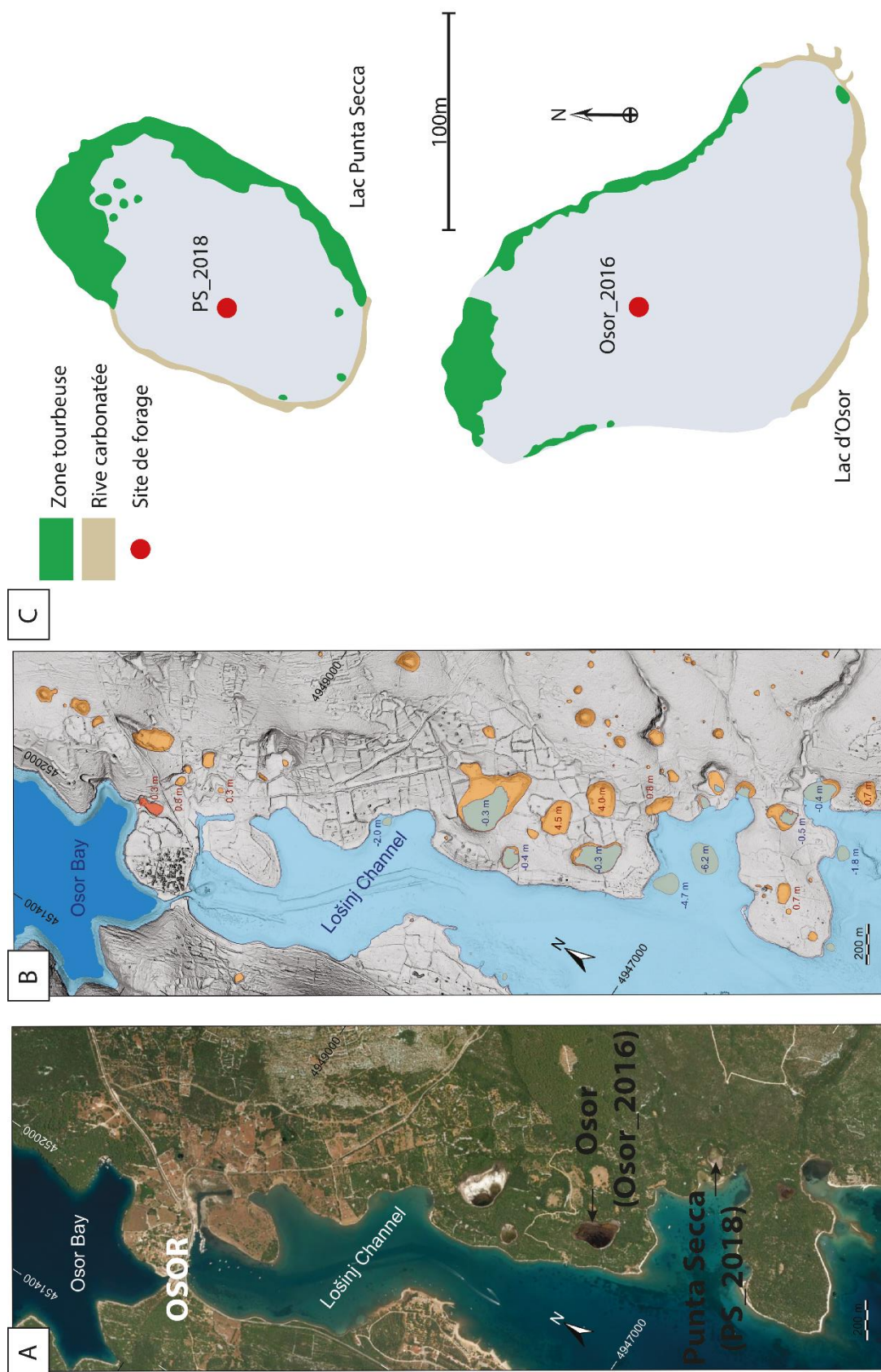


Figure 64. Localisation des lacs d'Osor et de Punta Secca avec (A) Image Google Earth 2020, (B) Visualisation obtenue par analyse laser. Les couleurs beiges correspondent à des dépressions fermées (dolines), les chiffres bleus indiquent les profondeurs sous le niveau de la mer et les chiffres rouges les altitudes au-dessus du niveau de la mer. L'illustration est obtenue de [Dragan et al., 2019](#), (C) Sites de forage et morphologie du lac Punta Secca et de Osor.



Figure 65. Localisation des lacs Punta Secca et d'Osor sur la carte de la seconde campagne militaire de 1821 – 1824 et de 1869 – 1887 (illustrations obtenues du site <https://maps.arcanum.com>)

### III.3.2 Résultats

#### III.3.2.1 Sédimentologie des carottes OSOR\_2016 et PS\_2018

Les forages des lacs d'Osor (OSOR\_2016) et de Punta Secca (PS\_2018) ont été effectués au point les plus profonds soit sous environ 40 cm d'eau (**Figure 64**).

*Remarque : la carotte OSOR\_2016 a été échantillonnée en amont de cette thèse en utilisant un carottier d'interface. L'échantillonnage pour chacune des analyses a donc été menée ponctuellement le long de la séquence sur le sédiment humide et non pas sur un échantillon homogène lyophilisé comme appliqué pour les séquences VRA\_2018, PS\_2018 et OMI\_2018.*

La sédimentologie de la carotte OSOR\_2016 (115 cm) se divise en trois unités lithologiques (**Figure 66**) :

- une première unité (115 – 97 cm) brun clair sans laminations apparentes et comprenant quelques graviers carbonatés. La densité est relativement élevée autour de 0,9 g/cm<sup>3</sup> ;

# OSOR\_2016

(Lac d'eau saumâtre)

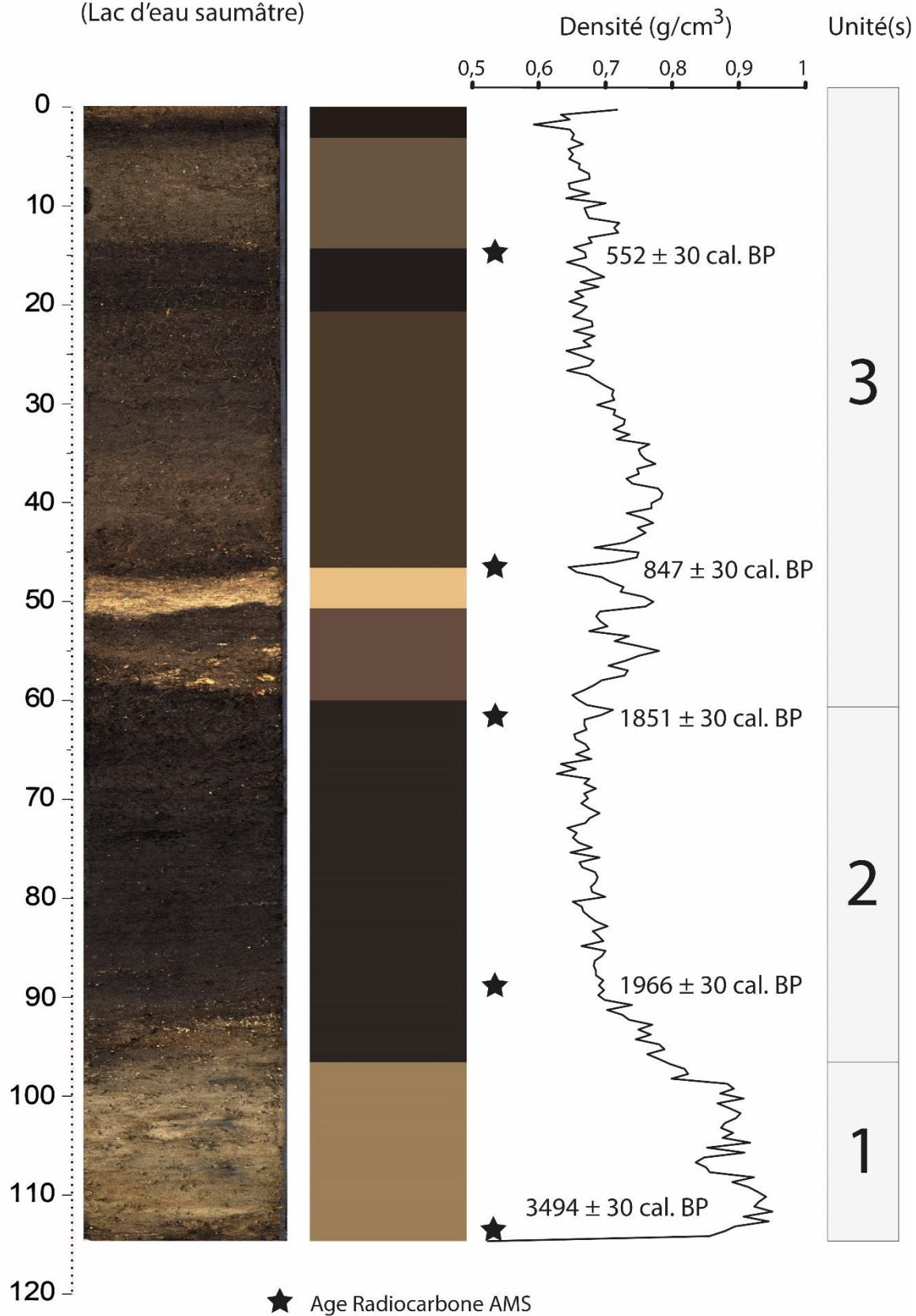


Figure 66. Unités sédimentaires et densité des sédiments de la carotte OSOR\_2016

# PS\_2018

(Lac d'eau saumâtre)

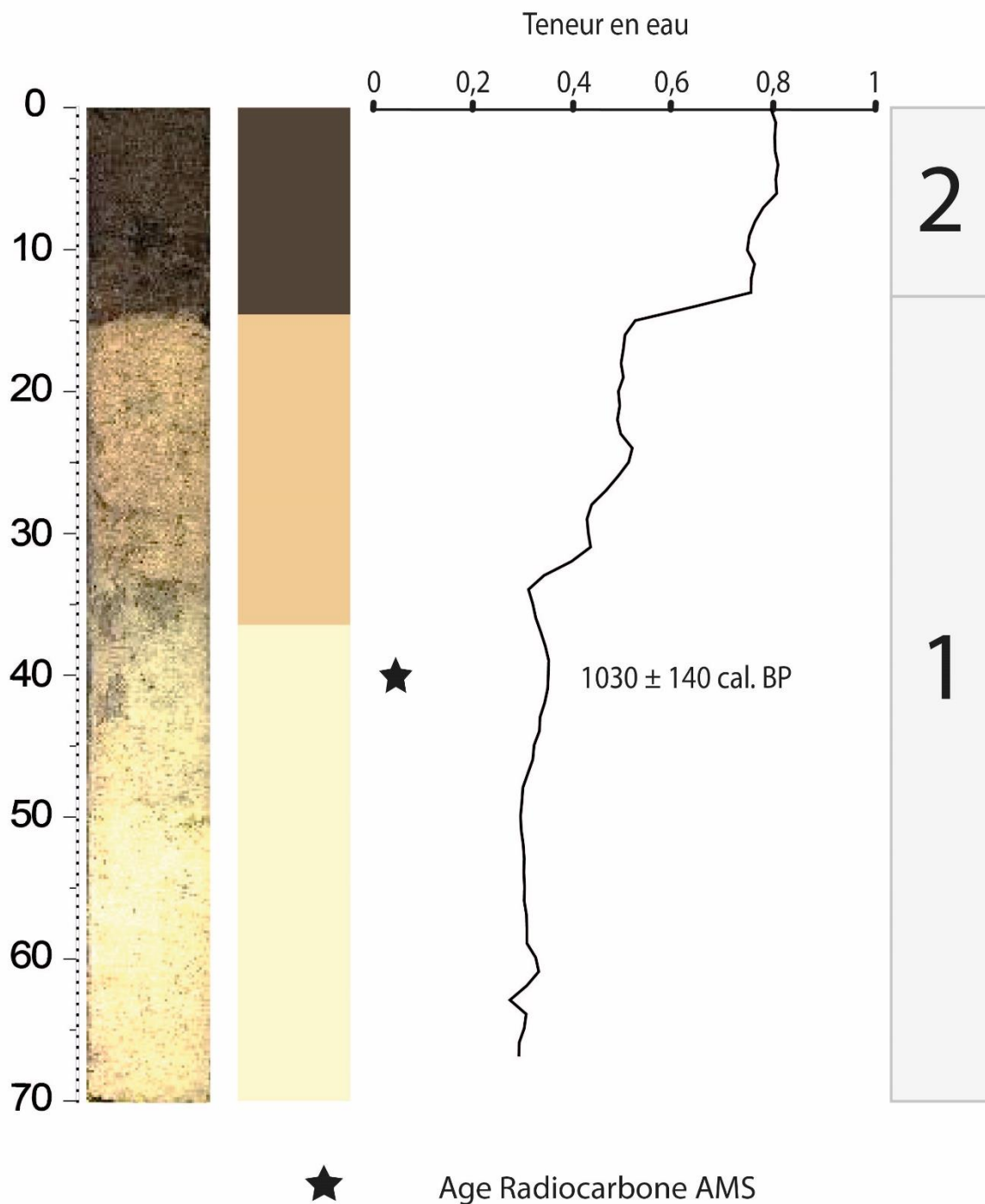


Figure 67. Unités sédimentaires et variations de la teneur en eau de la carotte PS-2018



- l'unité 2 (97 – 60 cm) est un dépôt de type gyttja, de couleur brun foncé et comprenant quelques laminations millimétriques plus sombres. Le sédiment apparaît moins compact et avec une densité plus faible autour de  $0,7 \text{ g/cm}^3$  ;

- l'unité 3 (60 – 0 cm) correspond à des sédiments de couleur brun clair à brun foncé notamment entre 20 et 15 cm et entre 3 et 0 cm. Un niveau carbonaté beige clair est également visible entre 52 et 47 cm où une augmentation de densité à  $0,77 \text{ g/cm}^3$  est observée.

La sédimentologie de la carotte PS\_2018 (70 cm) se compose de deux unités lithologiques distinctes présentées dans la **Figure 67** :

- l'unité 1 (70 – 15 cm) se compose de sédiments carbonatés de couleur beige très clair à clair et très compact avec quelques restes de gastéropodes. La teneur en eau augmente progressivement de 30 % à 50 %. Elle se compose de rares restes coquillés et ne comprend pas de macrorestes végétaux. Un unique morceau de bois a été trouvé à 40 cm ;

- l'unité 2 (15 – 0 cm) est constituée de dépôts de gyttja brun foncé riches en éléments organiques dont des restes racinaires, de feuilles de plantes aquatiques. Quelques gastéropodes sont également présents. La teneur en eau dans cette unité est relativement élevée autour de 80 %. Les gyttjas se forment généralement à faible profondeur, là où la photosynthèse et le développement de tapis végétal est possible. Cette succession sédimentaire reflète ainsi le comblement progressif (eutrophisation) du bassin de Punta Secca.

### *III.3.2.2 Modèle d'âge/profondeur*

La recherche de macrorestes terrestres datables dans les sédiments du lac d'Osor et de Punta Secca s'est avérée extrêmement compliquée en raison de leur quasi absence. En effet, une forte concentration de restes organiques a été retrouvée mais se sont principalement des restes racinaires et des morceaux de végétaux aquatiques. Ce type de macrorestes n'est pas réellement adéquate pour la datation au radiocarbone car ils sont systématiquement influencés par des effets réservoirs.

Ainsi, le modèle d'âge/profondeur de OSOR\_2016 a été défini sur la base de cinq datations au radiocarbone effectuées au laboratoire de radiocarbone de Poznań (Pologne) et au

centre de datation au radiocarbone ARTEMIS (Lyon, France ; **Tableau 6**). Une datation en apparence trop récente a dû être retirée. Le remplissage sédimentaire de OSOR\_2016 recouvre ainsi les 3500 dernières années environ (**Figure 68**).

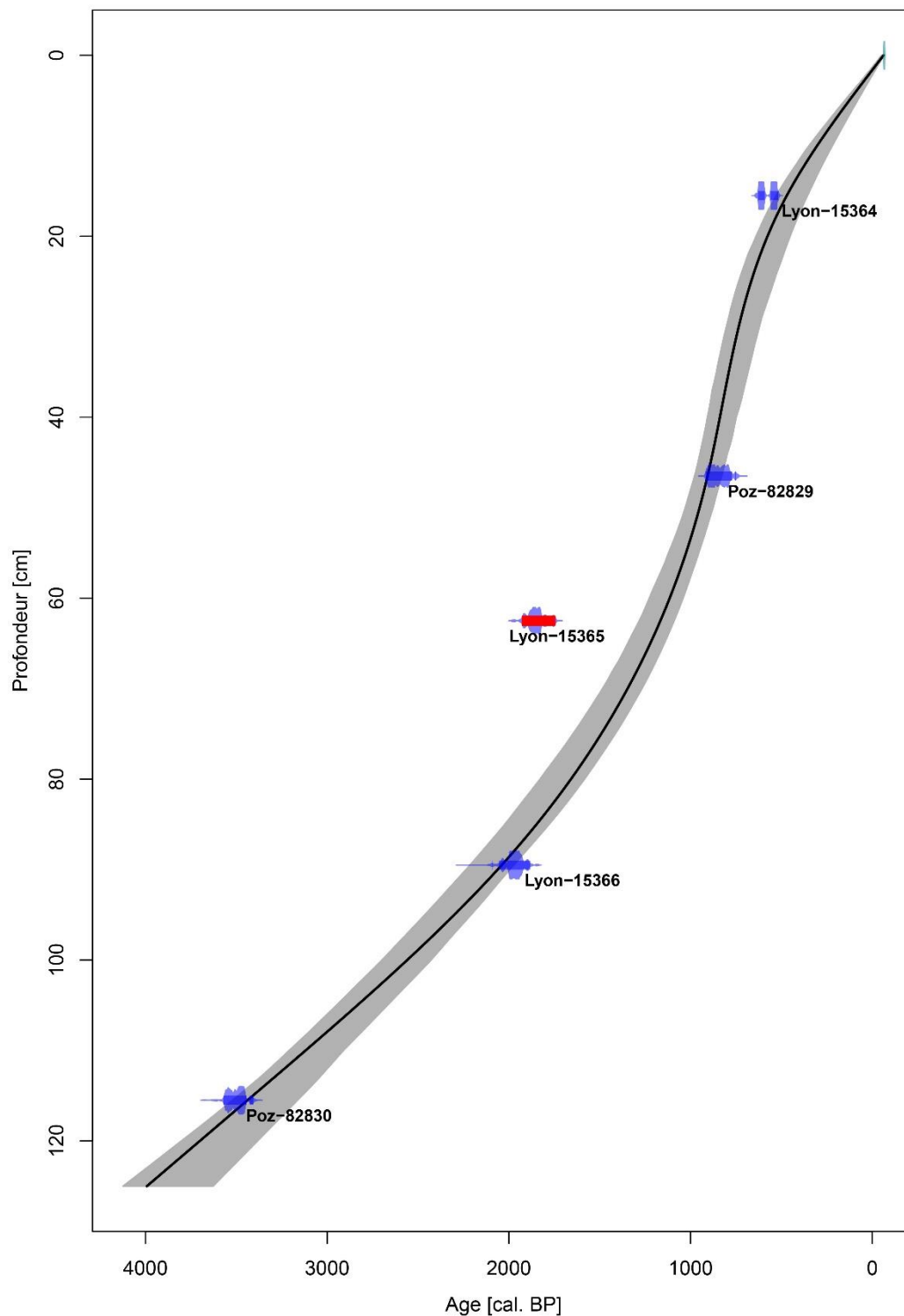
Code laboratoire	Profondeur (cm)	Matériel	Age $14C \pm 1\sigma$ (BP 1950)	Intervalles calibrés à 95.4%	Référence
OSOR_2016					
Lyon-15364	15 – 16	Brindille	$550 \pm 30$	AD 516 – 630	Cette étude
Poz-82829	46 – 47	Bois et graines	$930 \pm 30$	AD 749 – 918	Cette étude
Lyon-15365	62 – 63	Brindille	$1930 \pm 30$	AD 1745 – 1927	Cette étude
Lyon-15366	89 – 90	Brindille	$2030 \pm 30$	BC 1882 – 2096	Cette étude
Poz-82830	115 – 116	Brindille	$3280 \pm 30$	BC 3412 – 3568	Cette étude
PUNTA SECCA_2018					
Poz-129795	40	Bois	$1030 \pm 140$	AD 687 – 1265	Cette étude

Tableau 6. Résultats des datations au radiocarbone des sédiments du lac Punta Secca et de Osor (Cres). En jaune, la datation rejetée du modèle d'âge/profondeur de Osor\_2016.

Pour l'heure et bien que cela soit insuffisant, le modèle d'âge/profondeur de la carotte de surface de Punta Secca (PS\_2018) a été contraint à l'aide d'un modèle CRS au plomb sur les quinze premiers centimètres (**Figure 69**). En effet, l'activité du Plomb sur le sommet de la carotte décroît régulièrement bien que la marge d'erreur reste relativement élevée (**Figure 69**). L'activité du césium 137 est plus chaotique sans pic réellement distinct (**Figure 70**). Il ne peut donc pas être intégré au modèle d'âge/profondeur final. Sur le reste de la séquence, le modèle d'âge/profondeur est fixé à l'aide d'une unique datation radiocarbone (**Tableau 6**). Aucun autre macroreste n'a été trouvé malgré une fouille systématique des sédiments lyophilisés. De plus, la seule date obtenue à 40 cm présente une barre d'erreur importante ( $\pm 140$  ans) en raison d'un problème survenu lors du traitement chimique de l'échantillon avant datation. Ainsi, par extrapolation de cette date radiocarbone, les sédiments de Punta Secca sont datés à 67 cm à environ 460 cal. BC (2410 cal. BP ; **Figure 71**).

Cependant, en raison du peu de datations disponibles notamment sur le de lac Punta Secca, les dates fournies dans la suite du mémoire pour la description des données diagraphiques, micro- et macro-scopiques, etc. sont données à titre indicatif. In fine, d'autres datations seront nécessaires afin de mieux contraindre leur modèle d'âge. De plus, une difficulté supplémentaire pour la datation de leurs sédiments est la présence très probable de nombreux

événements érosifs du fait de leur faible profondeur d'eau (e.g. piétinement des sédiments de fond par des troupeaux de moutons et/ou animaux sauvages, d'entrées ponctuelles d'eau marine, et par une bioturbation difficile à évaluer).



*Figure 68. Modèle d'âge/profondeur de OSOR\_2016 estimé à partir de quatre dates au radiocarbone. La base de la séquence est datée à 115 cm à 1500 cal. BC (3500 cal. BP).*

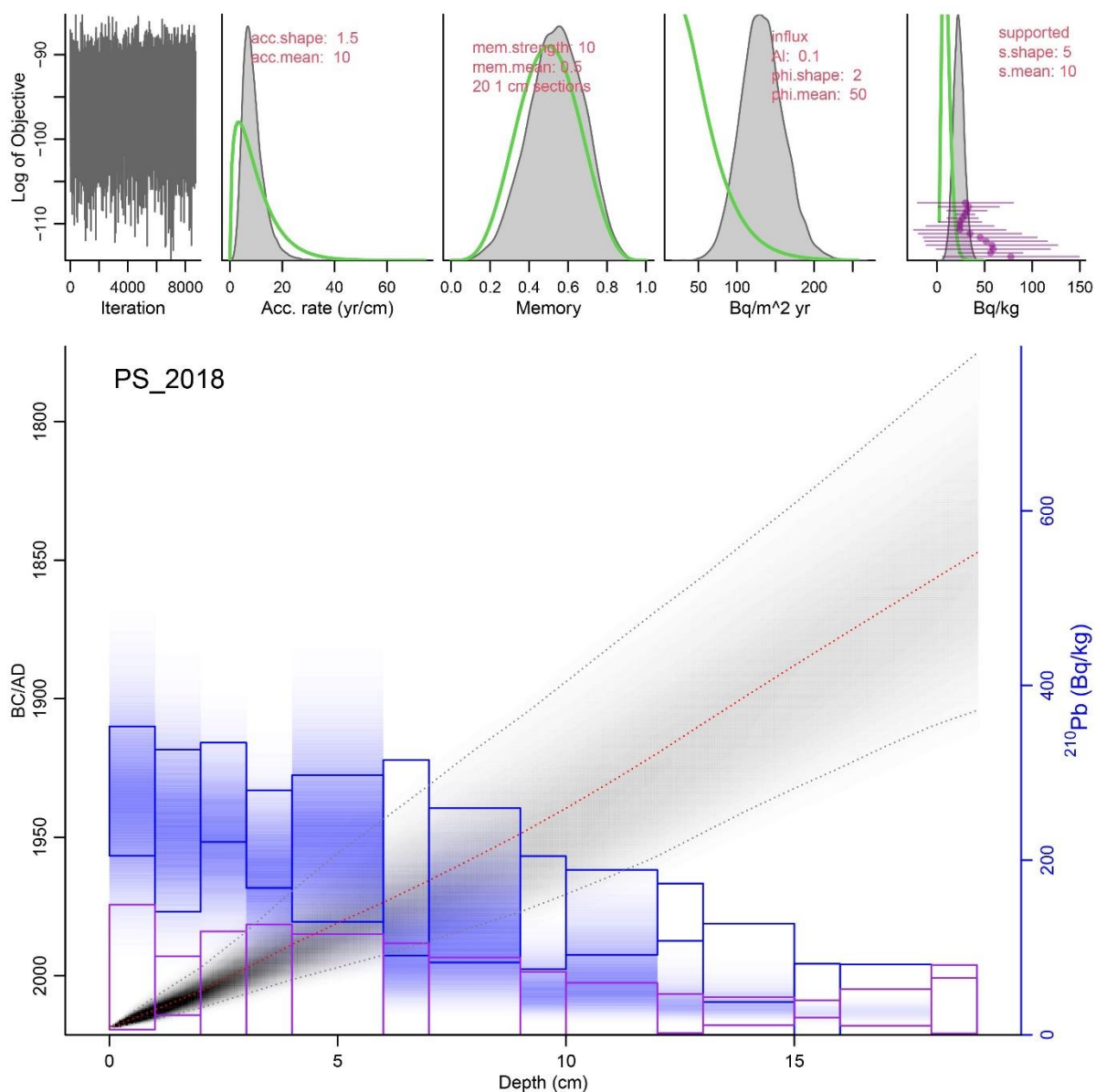
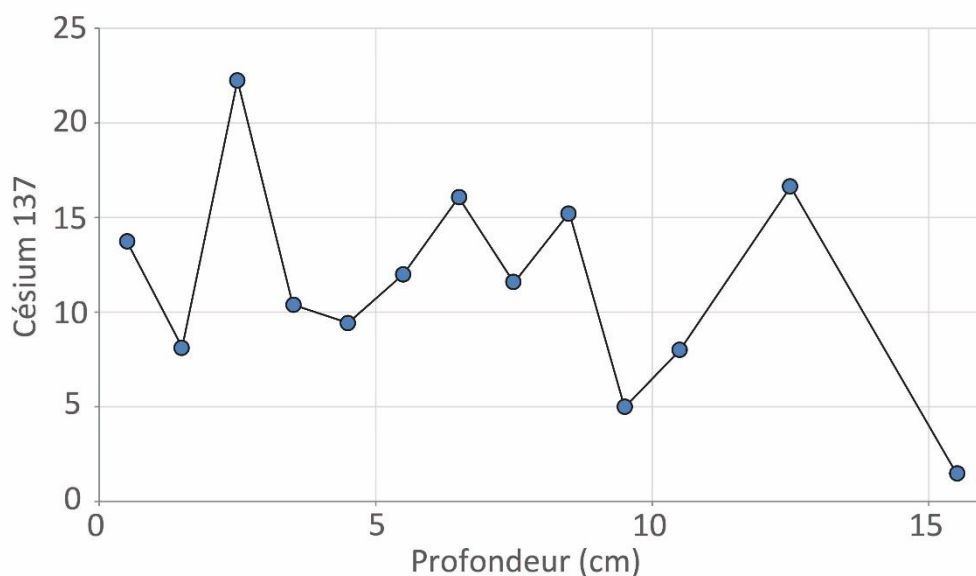


Figure 69. Modèle d'âge au plomb du lac Punta Secca (PS\_2018), tracé à l'aide de package BACON intégré dans Rstudio comprenant la courbe du plomb totale (violet), le radon en équilibre (rose) et le modèle d'âge CRS obtenu manuellement sous Excel (vert) et calculé avec PLUM (gris)



*Figure 70. Activité du césium 137 sur les quinze premiers centimètres de la carotte PS\_2018*

### *III.3.2.3 Analyse diagraphique*

Les diagrammes Q7/4 de OSOR\_2016 et de PS\_2018 sont présentés respectivement dans la **Figure 72** et **73**. Ils permettent de connaître la nature générale des sédiments sans procéder à une analyse destructive. Ainsi, les sédiments de Osor (OSOR\_2016) se répartissent parmi cinq grands types de sédiment (le pôle de la matière organique de type mélanoidine\*, le pôle de la matière organique altérée, le pôle de la chlorophylle a et de ces produits dérivés, le pôle des carbonates et le pôle des argiles) avec une forte prédominance de la mélanoidine. Plus précisément, l'unité 1 apparaît comme un mixte de ces cinq pôles, l'unité 2 se compose principalement de sédiments riches en matière organique altérée et l'unité 3 est un mélange entre des dépôts d'argiles et des dépôts de carbonates.

Les sédiments du lac Punta Secca (PS\_2018) sont composés des cinq mêmes grands pôles mais avec cependant une prédominance des carbonates (**Figure 73**). Plus précisément, les sédiments les plus profonds entre 70 à 20 cm (soit l'unité 1) sont préférentiellement composés de carbonates. Les vingt centimètres supérieurs de la carotte PS\_2018, soit l'unité 2, sont composés d'un mélange d'argiles et de sédiments organiques (chlorophylle a et de ces produits dérivés, mélanoidine, matière organique altérée).

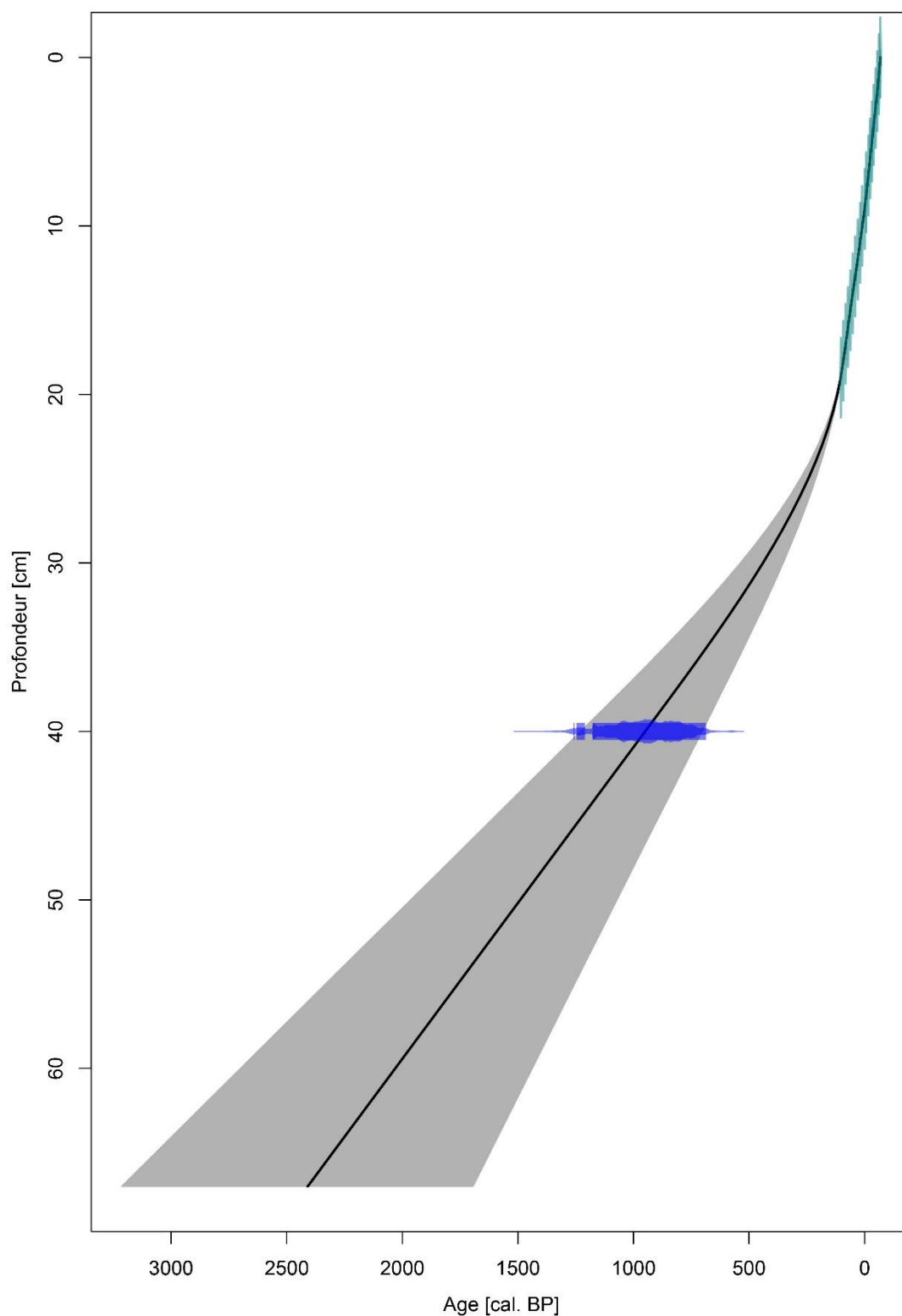


Figure 71. Modèle d'âge/profondeur obtenu sur la carotte de Punta Secca (PS\_2018) d'après une seule datation au radiocarbone. Les sédiments seraient datés à 67 cm à environ 460 cal. BC (2410 cal. BP)

# Diagramme Q7/4

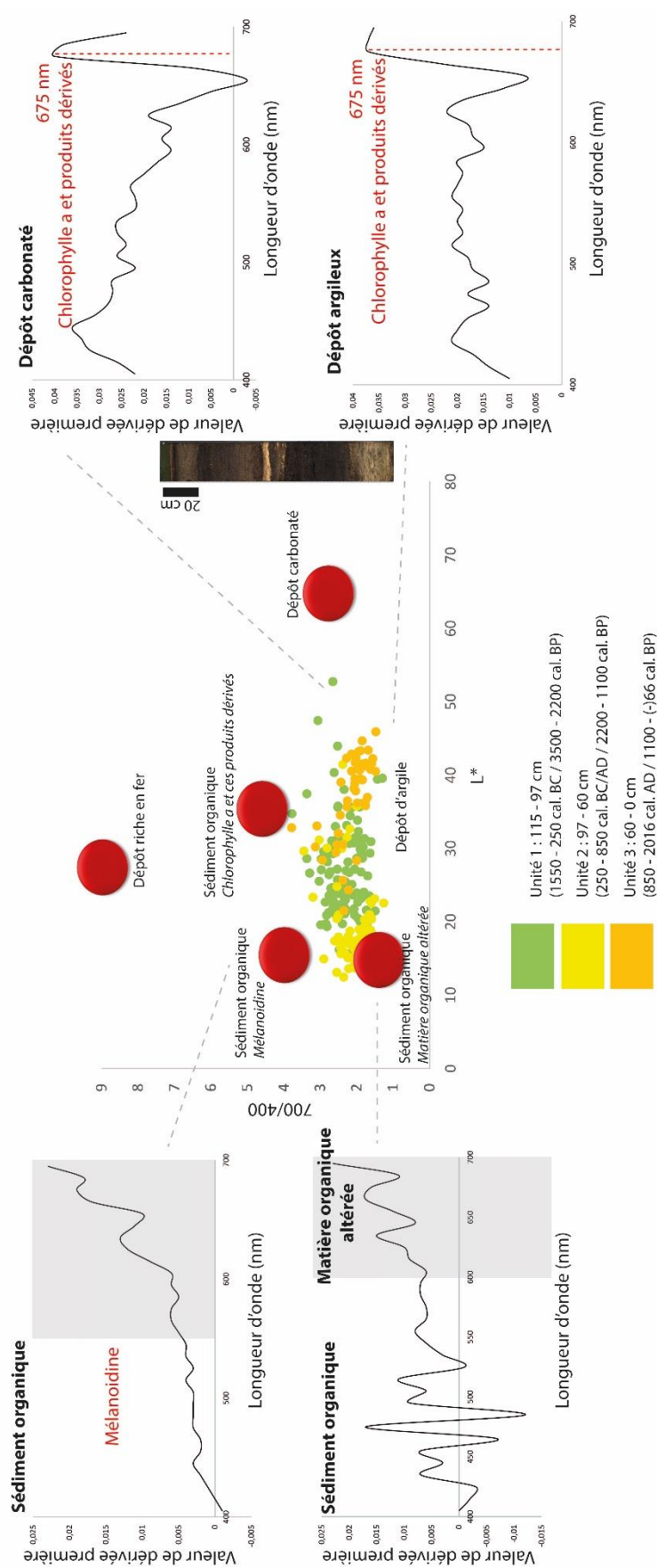


Figure 72. Diagramme Q7/4 des sédiments de OSOR (OSOR\_2016)

# Diagramme Q7/4

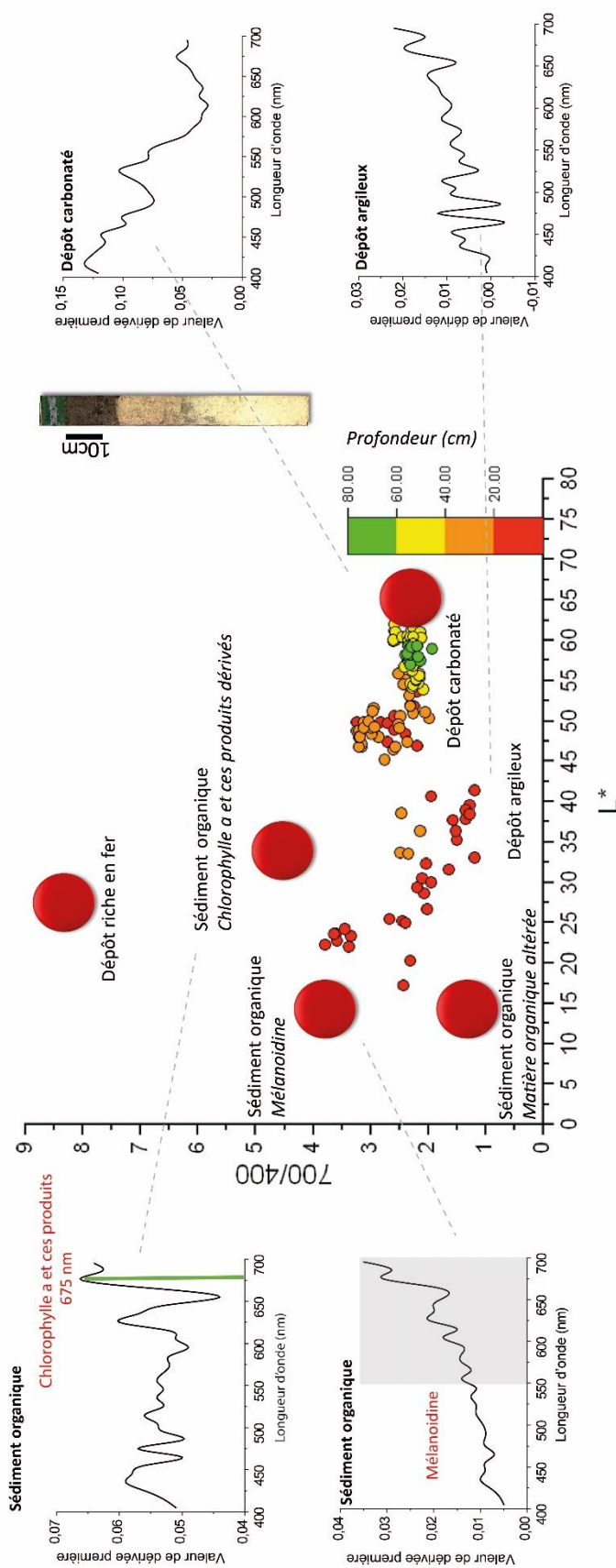
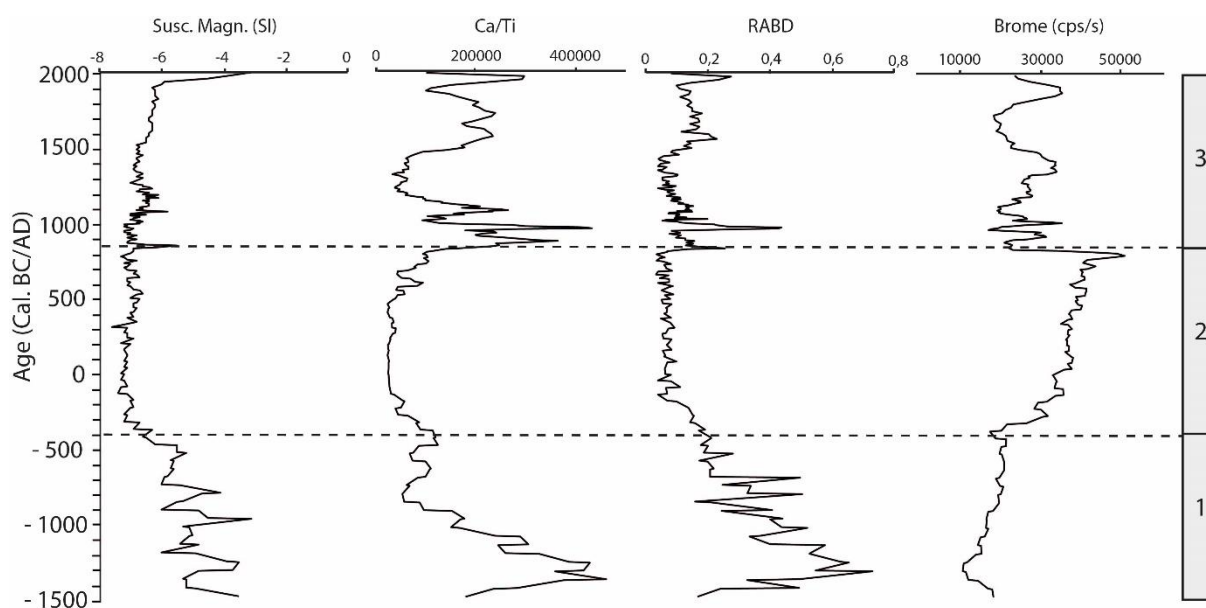


Figure 73. Diagramme Q7/4 des sédiments de Punta Secca (PS\_2018)



Afin de compléter les premiers résultats obtenus des diagrammes Q7/4, l'utilisation de marqueurs sédimentaires complémentaires sont nécessaires. Ici, seule la susceptibilité magnétique pour la détermination des apports détritiques, le Ca/Ti pour décrire les apports de carbonates authigéniques, l'indice de chlorophylle a et ses produits dérivés (RABD) pour décrire la productivité primaire et le brome pour le contenu en matière organique ont été tracés suivant les modèles d'âge/profondeur respectifs (**Figure 74** et **75**). Pour les résultats de la carotte PS\_2018 les données de perte au feu pour caractériser le contenu en matière organique, en carbonates et en éléments minérogéniques ainsi que le rapport  $\ln(\text{Br}/\text{Ti})$  pour décrire les entrées d'eaux marines ont été ajoutées (**Figure 75**).



*Figure 74. Analyse diagraphique des sédiments du lac d'Osor (OSOR\_2016) avec de gauche à droite, la susceptibilité magnétique pour la description des apports détritiques, le rapport Ca/Ti pour la production de carbonates authigéniques, l'indice de Chlorophylle (RABD) pour décrire les phases de productivité primaire et l'élément du brome pour le contenu en matière organique.*

Ainsi, pour OSOR\_2016, trois zones se dessinent entre 1500 cal. BC et 2016 cal. AD environ. La période entre 1500 et 400 cal. BC environ (Zone 1) est caractérisée par une forte érosion des sols (susceptibilité magnétique élevée) et une importante productivité primaire (pic de la RABD à 1350 cal. BC) qui vont graduellement diminuer pour atteindre un minimum à 400 cal. BC environ. On remarque que la productivité primaire est très bien corrélée à la production de carbonates authigéniques (Ca/Ti). La matière organique (élément du brome) augmente lentement. L'unité 2, soit entre 400 cal. BC et 850 cal. AD environ, montre une très

faible érosion des sols. La productivité primaire et la production de carbonates authigéniques affichent de faibles valeurs. La matière organique continue d'augmenter graduellement pour atteindre un pic à 800 cal. AD environ. Enfin, dans l'unité 3 (entre 850 et 2016 cal. AD environ), on remarque de plus grandes variations des paramètres sédimentaires. Premièrement, une augmentation brève de l'érosion des sols avec un pic à 850 (SM à -5 SI) et 2000 cal. AD (SM à -3 SI). Deuxièmement, la productivité primaire et les carbonates authigéniques liés à celle-ci sont marqués par trois hausses successives, une première entre 850 et 1200 cal. AD, une seconde entre 1450 et 1900 cal. AD et un dernier pic à 1950 cal. AD. Enfin, la matière organique (brome) chute brusquement à 850 cal. AD avant d'augmenter et atteindre un premier maximum à 1400 cal. AD, chute à nouveau avant d'atteindre un second maximum à 1850 cal. AD.

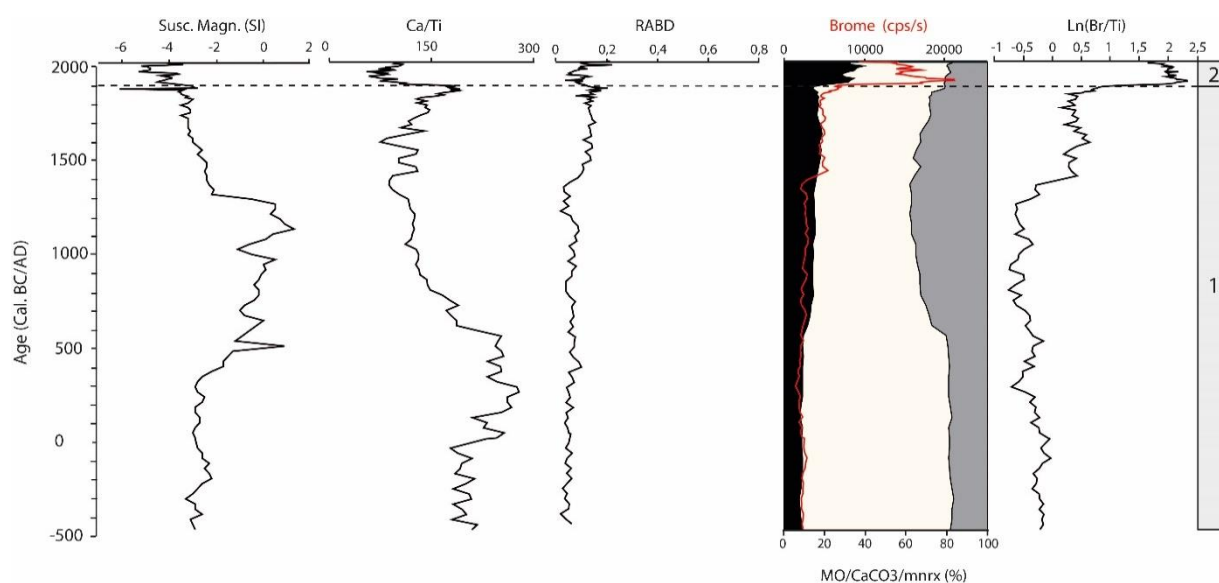


Figure 75. Analyse diagraphique des sédiments de Punta Secca (PS\_2018) avec de gauche à droite, la susceptibilité magnétique pour la description des apports détritiques, le rapport Ca/Ti pour la production de carbonates authigéniques, l'indice de Chlorophylle (RABD) pour décrire les phases de productivité primaire, l'élément du brome et la perte au feu pour le contenu en matière organique et enfin  $\ln(\text{Br}/\text{Ti})$  pour décrire les entrées d'eaux marines.

Les sédiments du lac Punta Secca (PS\_2018) ont quant à eux été échantillonnés par tranches successives de 1 cm puis lyophilisés à  $-80^{\circ}\text{C}$ . Cet échantillonnage a ainsi permis une analyse continue en perte au feu. Les résultats peuvent être décrits suivant deux zones distinctes. La zone 1 (entre 460 cal. BC et 1900 cal. AD) est caractérisée par une forte érosion des sols entre 300 et 1300 cal. AD. Au contraire du lac d'Osor, la production de carbonates authigéniques n'est pas complètement corrélée à la productivité primaire. Deux fortes augmentations du rapport Ca/Ti sont observées (entre 0 et 600 cal. AD et entre 1600 et 1900 cal. AD). La productivité primaire est en progression constante avec une nette phase

d'augmentation entre 1300 et 1900 cal. AD. Enfin, les teneurs de la matière organique obtenues de la perte au feu suivent les mêmes tendances que celles du brome. Le sédiment dans cet intervalle contient donc environ 10 % de matière organique avec une légère hausse à 15 % à partir de 600 cal. AD. Les carbonates sont majoritairement présents (70 – 75 %) entre 500 cal. BC et 600 cal. AD. Puis, ils chutent progressivement à 45 %. Les éléments minérogéniques sont présents autour de 15 % en moyenne de 460 cal. BC à 600 cal. AD, ils augmentent ensuite fortement pour atteindre un maximum à 37 % à 1200 cal. AD environ. Enfin, les fortes valeurs du rapport  $\ln(\text{Br}/\text{Ti})$  dès 1350 cal. AD peuvent laisser suggérer des entrées d'eaux marines dans le bassin du lac Punta Secca.

La zone 2 (entre 1900 et 2018 cal. AD) est marquée par une hausse importante du contenu en matière organique (30 à 40 %) et une baisse de l'érosion des sols jusqu'à 2000 cal. AD ou elle augmente ensuite. Dès 1900 cal. AD, la productivité primaire décroît et la production de carbonates authigéniques diminue avant d'entamer une légère hausse à partir de 1950 cal. AD. Les résultats de perte au feu indiquent une légère diminution des carbonates et des éléments minérogéniques. Enfin, le rapport  $\ln(\text{Br}/\text{Ti})$  augmente fortement dans cet intervalle.

### *III.3.2.4 Analyse palynologique*

#### Lac d'Osor (OSOR\_2016)

L'analyse palynologique et des macrocharbons de bois de OSOR\_2016 a été menée ponctuellement tous les 4 cm. Le diagramme pollinique obtenu se divise ainsi en trois zones polliniques distinctes (**Figure 76**).

La zone 1 (d'environ 1490 à 490 cal. BC) est caractérisée par un milieu relativement fermé comprenant environ 85 % d'arbres dont 10 % de conifères, 5 % d'arbustes et 10 % d'herbacées. La végétation est dominée par des chênaies (chêne pédonculé-pubescent et chêne vert). En plus des pollens de type « Cerealia », la présence de plusieurs IPA est observée dont du plantain et de l'armoise. Les autres herbacées sont quant à elles dominées par des poacées et des chénopodiées. Quelques spores de champignons coprophiles sont visibles, marqueurs d'activités pastorales. Enfin, les échantillons pour cette période contiennent entre 10 et 15 % de macrocharbons. Cette période peut donc être décrite comme une phase très forestière comprenant quelques traces de mise en culture et d'élevage. Cette période d'environ un millénaire couvrirait une partie de l'âge du Bronze et le début de l'âge du Fer. Le signal incendie

relativement important laisse suggérer l'usage du feu pour défricher les surfaces destinées à l'agriculture.

La seconde zone (490 cal. BC à 1000 cal. AD) est marquée par l'ouverture nette du milieu. On observe une augmentation des proportions du genévrier jusqu'à atteindre 10 à 15 % et des herbacées jusqu'à 15 % environ. Les arbres, et en particulier les chênaies, diminuent à hauteur de 70 %. Cependant, quelques taxons méditerranéens comme le pistachier et l'olivier progressent. Deux essences d'arbres apparaissent également dans la végétation, le châtaignier à 300 cal. BC et le noyer à 800 cal. AD. Enfin, la vigne augmente progressivement jusqu'à 5 % et les pollens de type céréale et de seigle (*secale*) jusqu'à 2 %. Les proportions de macrocarbons diminuent progressivement jusqu'à atteindre moins de 5 %. Cette phase couvrant une partie importante de l'âge du Fer, de l'Antiquité et du Haut Moyen Âge est ainsi marquée par un important impact de l'homme sur le milieu avec la transformation graduelle d'une forêt à un milieu ouvert prairial et comprenant de nombreuses cultures diversifiées.

La troisième zone (1000 à 2016 cal. AD) montre une accélération de l'ouverture du milieu avec l'augmentation jusqu'à des valeurs de 40 % de genévrier et à 20 % des herbacées. Les chênaies continuent ainsi de décroître au profit notamment du pistachier et de l'olivier. Les proportions d'armoise et de plantain progressent.

Le signal incendie continue de diminuer lentement. Cette troisième phase est donc marquée par de forts impacts de l'homme sur la végétation mais les taux très importants de genévrier indiquent aussi des phases d'abandon et d'enfrichement des zones proches. Un modèle d'âge plus précis permettrait de comprendre certains événements particuliers comme la chute du genévrier vers 1000 cal. AD suivi d'un pic de chénopodiacées qui pourraient correspondre à une entrée marine importante qui aurait durablement modifié la teneur en sel des sols et favorisé ainsi les plantes halophiles en grande partie représentées par les chénopodiacées.

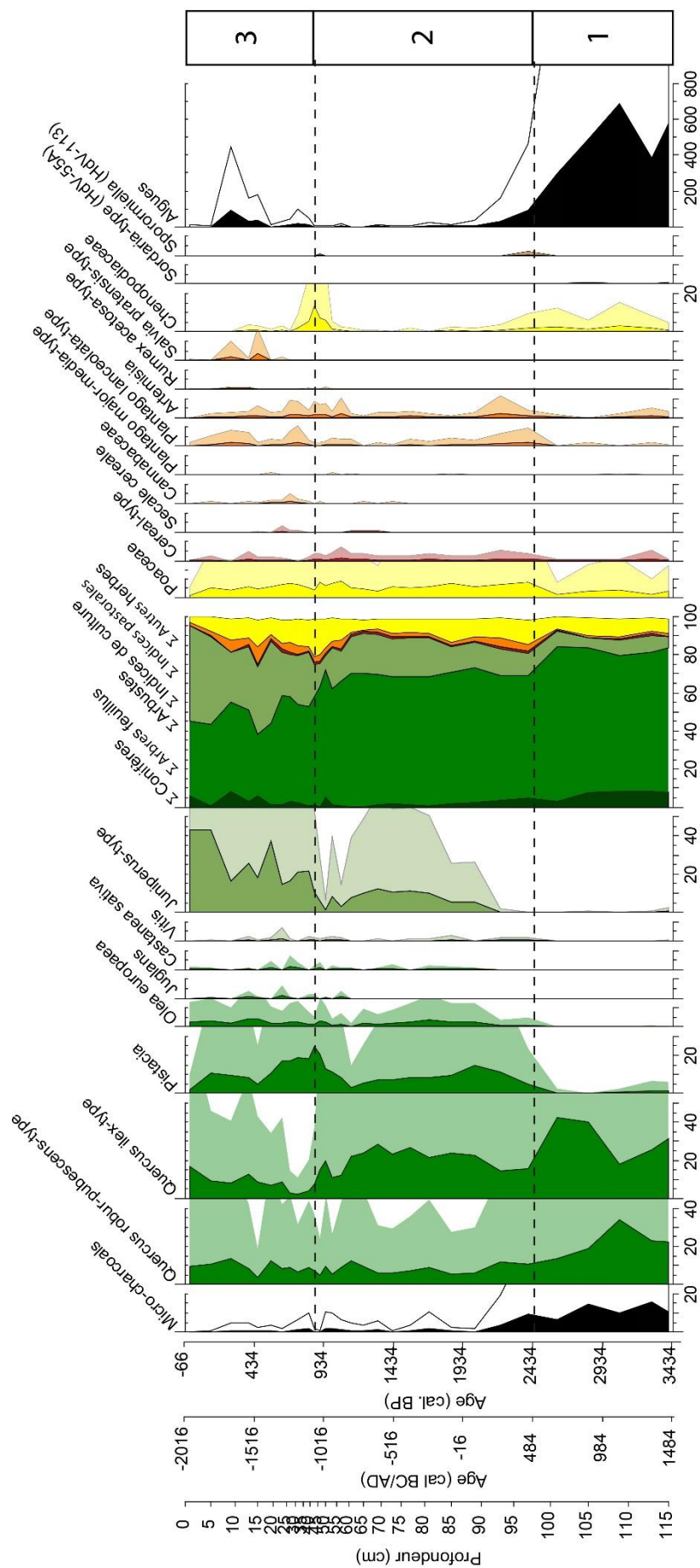


Figure 76. Diagramme pollinique obtenu des sédiments du lac d'Osor (OSOR\_2016). Analyse effectuée par Benjamin Diètre.

Lac Punta Secca (PS\_2018)

L'analyse palynologique de PS\_2018 a été menée ponctuellement tous les 10 cm environ. Le diagramme pollinique ainsi obtenu se divise en deux grandes zones polliniques distinctes (**Figure 77**) :

La zone 1 (140 cal. BC – 400 cal. AD) principalement dominée par des arbres (55 – 70 %) en particulier du chêne vert et du chêne pédonculé-pubescent, du pin et du sapin. Le reste de la végétation est constituée d'herbacées (poacées, cichorioidées, etc.). Les pollens de type céréales sont présents en de très de fortes proportions (15 % en moyenne) et sont accompagnés d'indices polliniques d'anthropisation dont l'armoise, le plantain lancéolé et les centaurées. Des pollens de châtaignier sont également présents dès 140 cal BC environ.

La zone 2 (400 – 2018 cal. AD) est marquée par une importante ouverture du milieu. Les proportions d'arbres (en particulier les chênes) diminuent jusqu'à 25 % au profit du genévrier qui augmente jusqu'à 65 % environ. Plusieurs taxons méditerranéens profitent de l'espace nouvellement disponible pour se développer, c'est le cas notamment du pistachier et de l'olivier. Quelques pollens de noyer sont retrouvés dès 1000 cal. AD. La vigne augmente également entre 1000 et 1900 cal. AD environ. Les pollens de type céréale vont décroître progressivement jusqu'à atteindre moins de 5%. Les premières spores de champignons coprophiles apparaissent vers 1800 cal. AD environ. Dans les sédiments apparaissent également des restes de foraminifères indicateurs d'un éventuel changement dans la colonne d'eau (plus saline et/ou saumâtre) vers 1000 cal. AD. L'apparition des chénopodiacées et le fort rapport  $\ln(\text{Br}/\text{Ti})$  sur cet intervalle laissent également suggérer une entrée d'eau marine.

Ainsi, cette période est caractérisée par la diminution des cultures de céréales au profit d'un développement des activités pastorales et de certaines essences (olivier, vigne, pistachier, noyer et châtaignier). Mais là aussi, la forte proportion de genévrier pourrait indiquer la présence de zones plus enfrichées comme on peut les retrouver aujourd'hui dans cette partie de l'île.

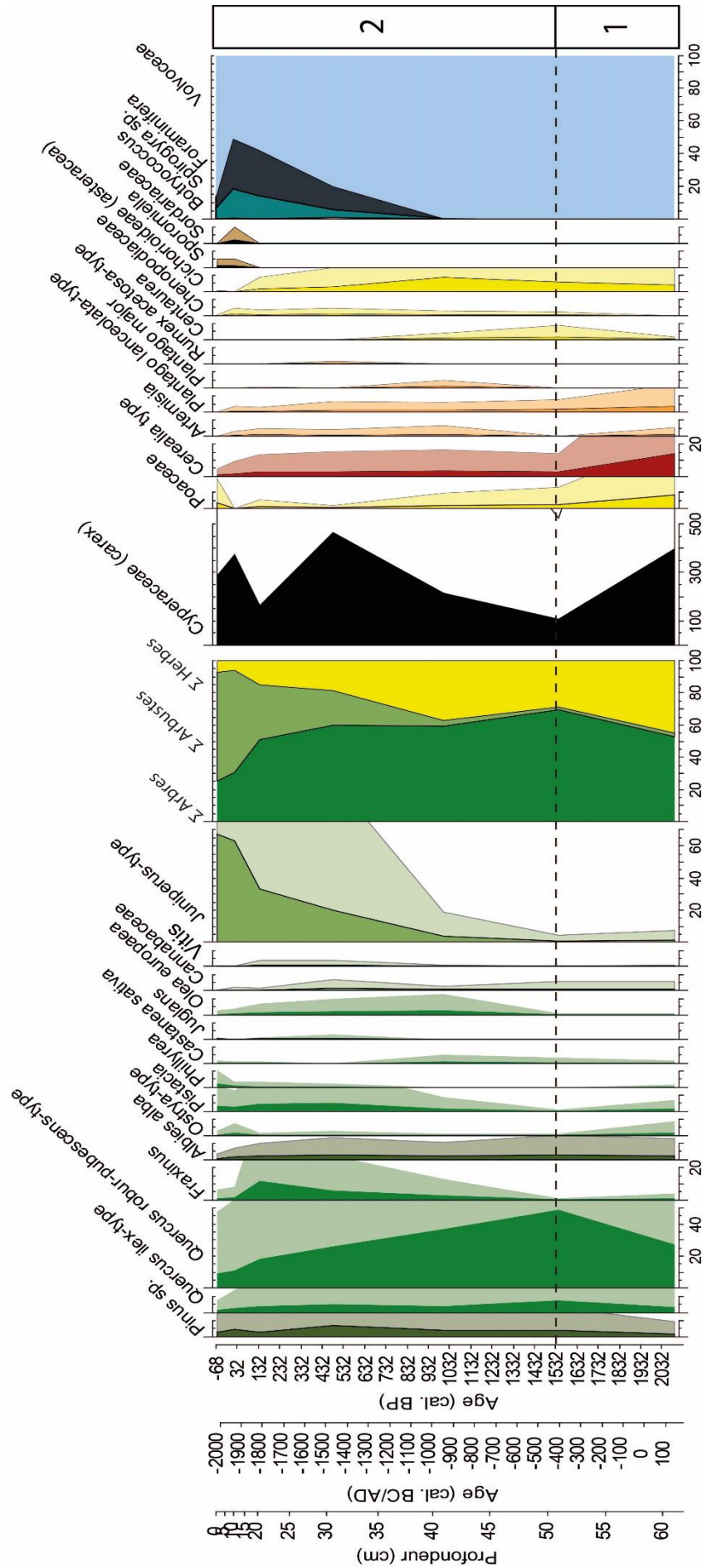
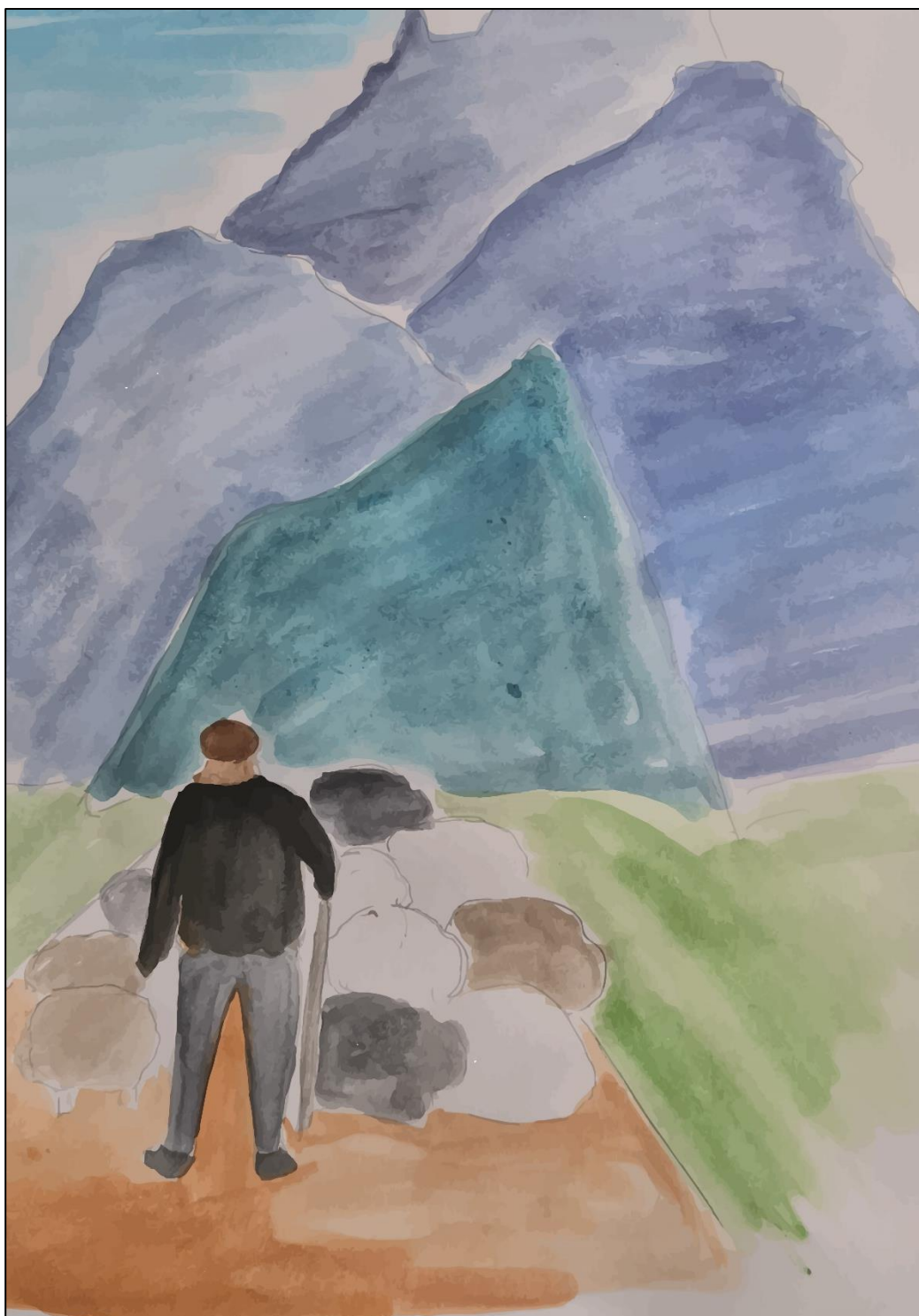


Figure 77. Diagramme pollinique obtenu des sédiments du lac Punta Secca (PS\_2018)





## **IV. : Discussion**



*Transhumance d'après mélodie.rousseau©*

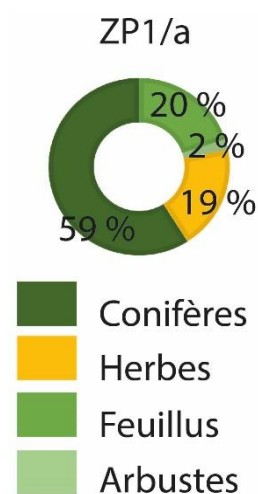
Afin de discuter des résultats, l'ensemble de la séquence prélevée du lac Vrana (VRA\_2018) a été divisé en six fenêtres temporelles correspondant aux ouvertures et aux fermetures du milieu soit (les bornes chronologiques sont bien sûr à prendre avec une certaine incertitude) :

- 28 050 – 20 150 cal. BC (30 500 – 22 100 cal. BP) ;
- 20 150 – 12 050 cal. BC (22 100 – 14 000 cal. BP) ;
- 12 050 – 6250 cal. BC (14 000 – 8200 cal. BP) ;
- 6250 – 4550 cal. BC (8200 – 6500 cal. BP) ;
- 4550 cal. BC – 1150 cal. AD (6500 – 1500 cal. BP) ;
- 1500 – 2018 cal. AD (1500 – (-68) cal. BP).

Un aperçu de ces fenêtres temporelles ainsi que des unités lithologiques, palynologiques et sédimentaires est fourni dans la **Figure 78**. La caractérisation de la végétation suivant différents biomes a également été ajoutée (espèces méditerranéennes, mésothermiques\*, microthermiques\*, eurythermiques\*, le reste des herbes et la steppe). Les résultats obtenus des lacs de Punta Secca, de Osor et d'Omišalj sont présentés ponctuellement dans le texte en raison de leur histoire plus courte et de leur modèle d'âge moins précis.

### 1/ Les forêts de conifères du Pléniglaciaire (28 050 – 20 150 cal. BC / 30 500 – 22 000 cal. BP)

La zone ZP1/a correspond à une section riche en pollens de conifères (59 % de pin et de sapin) et, dans une moindre mesure, la présence de pollens d'arbres à feuilles caduques (20 % de chêne pédonculé-pubescent, d'aulne, d'orme, de charme, de noisetier, de bouleau et de hêtre). Cet assemblage évoque un milieu relativement fermé, formé forêts de conifères. Cette période intervient juste avant le dernier maximum glaciaire durant le Stade Isotopique 3 (SIO3) associé dans la littérature à une phase moins froide du Pléniglaciaire ([Sidall et al., 2008](#)). Le pin est une espèce eurythermique qui pousse aujourd'hui dans des régions où la température de l'air et les précipitations descendent à des valeurs similaires à l'environnement glaciaire. Cependant, la présence d'arbres thermophiles comme le chêne paraît en contradiction avec les environnements glaciaires typiques mais



plusieurs enregistrements polliniques méditerranéens l'ont déjà mise en évidence pour cette période (**Bortolami et al., 1977 ; Magri et al., 1999 ; Carrion et Van Geel, 1999**). Cela indique qu'une certaine humidité a persisté induite éventuellement par la présence des montagnes proches de la mer. La présence de spores de champignons coprophiles vers 21 550 cal. BC (23 500 cal. BP) peut laisser penser que de grands herbivores pouvaient paître ponctuellement dans le bassin versant de Vrana (voir par exemple **Van Asperen et al. 2021**).

Les résultats obtenus pour le rapport Mn/Fe montrent que, pendant cette période, les eaux du lac étaient faiblement oxygénées et peu propices au développement d'une productivité primaire importante. Cependant, le lac Vrana n'était pas dépourvu de vie, la présence d'espèces d'algues vertes notamment *Volvocaceae*, *Botryococcus braunii* et *Pediastrum* a pu être relevée. Des taxons que l'on peut régulièrement retrouver dans les environnements arctiques et/ou du pléniglaciaire (**Fredskild 1983 ; Bjorck et al. 1993 ; Komarek et Jankovska, 2001 ; Weckström et al., 2010 ; Turner et al., 2014**). D'après les résultats de la perte au feu et de la susceptibilité magnétique, le bassin de Vrana recevait de forts apports d'éléments détritiques non magnétiques (carbonates, quartz). Le  $\delta^{13}\text{C}$  montre quant à lui que les rares entrées de matière organique étaient majoritairement d'origine terrestre. Ces marqueurs pris ensemble laissent penser que le lac devait être à ce stade très peu profond semblable à un étang ou un marécage. Nous pouvons aisément supposer que le niveau d'eau était donc largement fluctuant suivant les années et/ou les saisons soumettant les berges carbonatées à de forts processus d'érosion.

Cette phase la plus ancienne du lac Vrana est étayée par trois dates radiocarbone à  $24\,350 \pm 730$  BP,  $19\,510 \pm 390$  BP et  $18\,450 \pm 480$  BP mesurées sur des échantillons de sédiment total (bulk). Ces dates restent cependant à confirmer en raison de la difficulté à estimer un âge réservoir en-delà de 12 860 cal. BC (14 600 cal. BP). Dans le but de publier cette première partie du remplissage de Vrana, la graphitisation des échantillons avant datation devrait préciser la chronologie en améliorant les marges d'erreur. Ce paysage s'est développé dans la seconde moitié du Paléolithique qui, à notre connaissance, ne correspond à aucun site connu sur l'île de Cres.

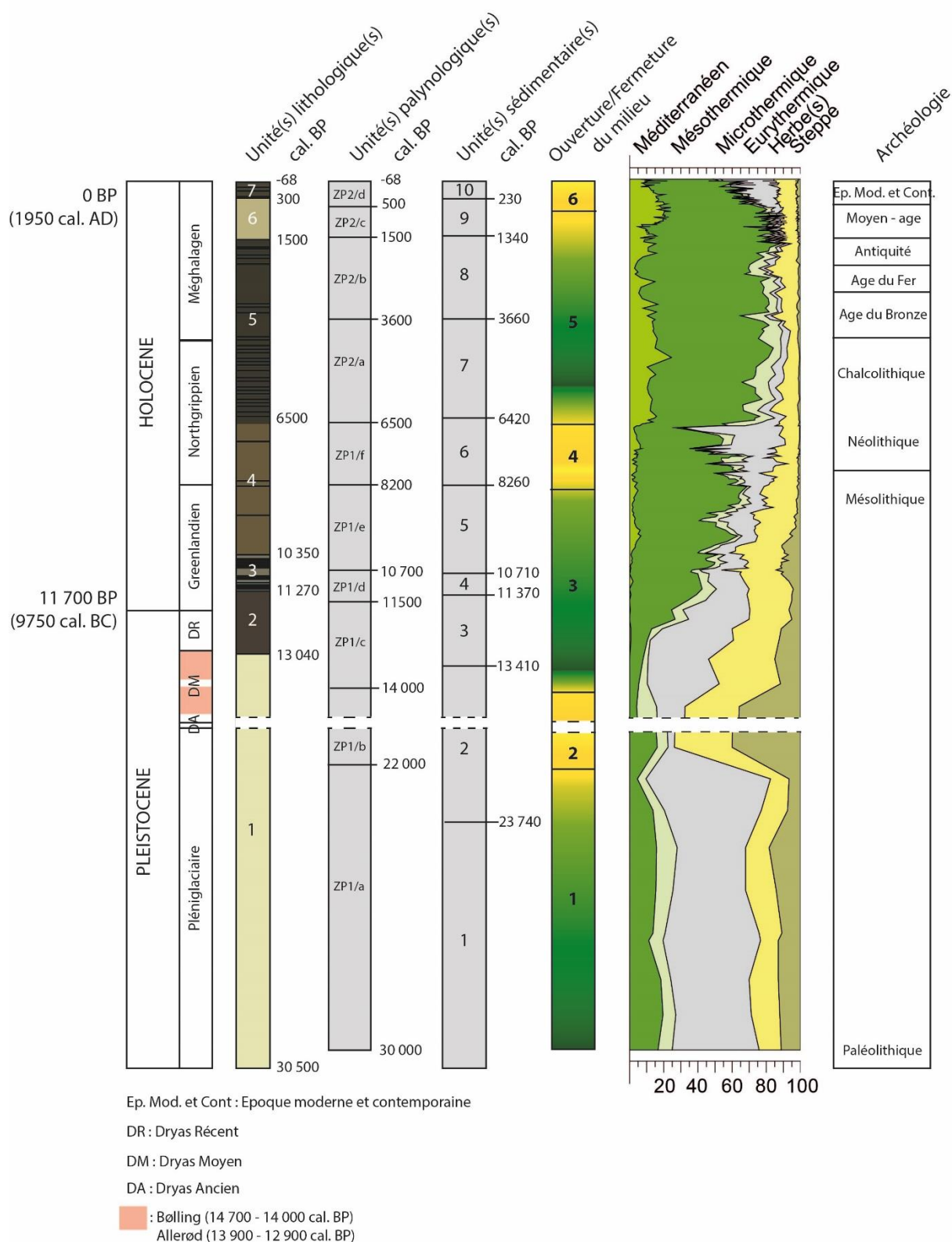
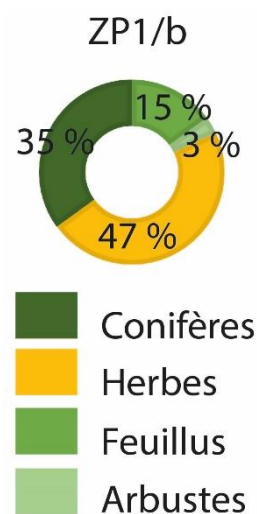


Figure 78. Synthèse des principaux résultats de VRA\_2018 avec les unités lithologiques, palynologiques et sédimentaires. La végétation est classée suivant différents biomes que sont les espèces méditerranéennes, mésothermiques, microthermiques, eurythermiques, les herbacées et la steppe.

## **2/ L'environnement steppique du dernier maximum glaciaire (20 150 – 12 050 cal. BC soit 22 100 – 14 000 cal. BP)**

La zone ZP1/b marque un changement brutal dans la végétation. Le milieu jusqu'alors complètement fermé s'ouvre en quelques millénaires pour former un environnement steppique principalement dominé par des herbacées (47 %) dont des graminées sauvages et de l'armoise. Bien que réduites, les forêts de conifères restent une composante importante des paysages (35 %). Le dernier maximum glaciaire correspond à un climat plus froid et sec ([Bortolami et al., 1977](#)). La régression constante des forêts et l'aridification du climat ont alors certainement joué un rôle sur l'augmentation des flux dans le bassin versant d'éléments carbonatés et minérales déjà accrue



par la faible profondeur du lac. Progressivement, l'oxygénation de la colonne d'eau s'améliore laissant la possibilité à l'activité biologique de se développer. Les valeurs de plus en plus négatives du  $\delta^{13}C$  démontrent que l'influence lacustre est de plus en plus importante. Le lac Vrana devient donc lentement un peu plus profond et pérenne. Au sein de cet intervalle, les écarts entre les datations radiocarbone obtenues suggèrent la présence d'une lacune sédimentaire. Cette deuxième phase correspond à la fin du Paléolithique supérieur.

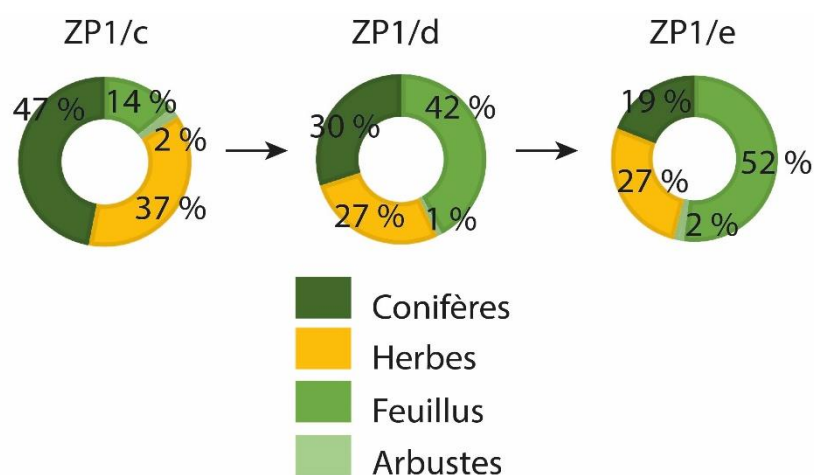
## **3/ Formation du lac Vrana et développement de la végétation tempérée et méditerranéenne (12 050 – 6250 cal. BC soit 14 000 – 8200 cal. BP)**

Dans la (ZP1/c), la diminution des herbacées (37 %) notamment des poacées et le développement du pin reflète un nouveau changement du couvert végétal. À la fin du Paléolithique et au Mésolithique, l'environnement passe alors de paysages steppiques à de grandes forêts de conifères (47 % du total des pollens).

Au Dryas récent, un léger rebond des steppes est visible suggérant l'installation brève d'un milieu plus aride. L'apparition et les flux importants de macrocharbons de bois dans les sédiments entre 11 050 et 10 050 cal. BC (13 000 et 12 000 cal. BP) suggèrent que des incendies se sont régulièrement déclarés pour cette période sur l'île de Cres ralentissant certainement le développement des forêts tempérées. Une certaine confiance peut être placée ici dans le modèle d'âge/profondeur calibré à l'aide de cinq datations radiocarbone obtenues de macrofossiles

terrestres. Plusieurs études menées sur des lacs italiens et grecs (ex. Ioannina, Lago Grande di Monticchio, Lagaccione et Valle di Castiglione ; [Fletcher et al., 2010](#) ; [Combourieu-Nebout et al., 2013](#)) tendent d'ailleurs à montrer au Dryas récent qu'un recul des forêts tempérées déjà installées depuis un millénaire environ et le développement d'un environnement steppique a lieu. Sur l'île de Cres, cette forêt tempérée ne s'est pas encore réellement développée. Toutefois, l'évolution du paysage est décrite ici avec seulement deux échantillons palynologiques. L'amélioration de la résolution à l'avenir serait donc à envisager pour cette partie de la séquence. Cependant, un changement est perceptible dans certains marqueurs sédimentaires, on voit par exemple très clairement que le flux détritique diminue, conséquence probable de la chute des précipitations. Des recherches sur l'Adriatique tendent également par le biais des Alcénones à montrer une chute des températures ([Sicre et al., 2020](#)).

L'amélioration des conditions climatiques (plus chaudes et plus humides) permet le développement progressif du chêne pédonculé-pubescent puis l'apparition du chêne vert autour de 11 050 cal. BC (13 000 cal. BP). L'île de Cres se couvre alors progressivement d'une chênaie dense où se développent de nombreuses espèces. D'autres essences tendent quant à elles à diminuer, c'est le cas notamment du hêtre, du charme, du bouleau et de l'aulne.



Les apports d'éléments détritiques magnétiques (portés principalement par les argiles) augmentent très lentement attestant d'une légère hausse de l'érosion dans le bassin versant. La présence de graines de nénuphars, de racines, de gastéropodes et la forte proportion dans les sédiments de pollens de plantes de zones humides comme *Carex* suggèrent que le lac Vrana garde un environnement relativement palustre jusqu'au début de l'Holocène. À partir de 11 460 cal. BC (13 410 cal. BP) un pulse de carbonates, de matière organique et d'éléments

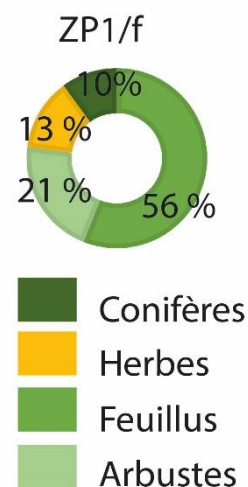
minérogéniques reflète la mise en eau rapide et pérenne du lac. Les autres résultats tendent d'ailleurs à arriver aux mêmes conclusions : le pic de  $\delta^{13}\text{C}$  indique une hausse de l'accumulation de matière organique lacustre et le pic de Mn/Fe indique une meilleure oxygénation de la colonne d'eau. Cette hausse du niveau de l'eau de Vrana coïncide avec la hausse du niveau marin et l'isolation de l'archipel du Kvarner dans la mer Adriatique. En effet, les masses d'eaux marines jouent un rôle important de « balance hydraulique » sur les masses d'eaux douces permettant ainsi leur maintien dans le bassin de Vrana (dont le fond est aujourd'hui situé à  $-58$  m a.s.l.).

À partir d'environ 11 460 cal. BC (13 410 cal. BP), l'érosion dans le bassin versant est en constante augmentation. La végétation s'adapte graduellement aux nouvelles conditions du milieu. Dans la zone ZP1/d, l'aulne, le bouleau, l'orme, le tilleul et le noisetier se développent rapidement, favorisés par un climat plus humide. Puis, dans la zone ZP1/e, la chênaie atteint son extension maximale vers 6250 cal. BC (8200 cal. BP). Durant le Mésolithique, une végétation plus diversifiée se met alors progressivement en place. Des taxons méditerranéens dont le pistachier à 8250 cal. BC (10 200 cal. BP), le filaire ou encore l'ostryer à 7850 cal. BC (9800 cal. BP) apparaissent successivement en quelques siècles. D'autres essences, comme l'érable font également leur apparition dans les paysages du Kvarner vers 8050 cal. BC (10 000 cal. BP). Au contraire du bouleau et de l'orme, cette période profite à certains arbres et arbustes déjà présents comme le hêtre et le noisetier.

C'est donc dans un milieu relativement fermé que se seraient installés les premiers agriculteurs néolithiques. L'occurrence des premiers pollens de type céréales a eu lieu à 7550 cal. BC (9500 cal. BP) et ceux de la vigne à 7300 cal. BC (9250 cal. BP). Comme vu précédemment (**Chapitre III.1.5**), bien que quelques autres signaux polliniques d'anthropisation soient présents au même moment, ces deux indices sont trop précoces en référence aux données archéologiques et paléobotaniques locales et régionales. Vu la robustesse du modèle d'âge dans ces niveaux (cette période est contrainte par treize dates radiocarbones dont six ont été menées sur des macrorestes terrestres), il est alors difficile d'évoquer une pollution par des sédiments plus récents. Il est fort probable que se sont des grains de pollen morphologiquement très proches des formes cultivées qui se retrouvent dans ces niveaux. Une analyse microscopique plus poussée et d'éventuelles recherches de biologie moléculaire pourraient proposer des pistes plus précises.

#### 4/ Les évènements climatiques holocènes (6250 – 4550 cal. BC soit 8200 – 6500 cal. BP)

Dans la zone ZP1/f, correspondant au Néolithique, les forêts de chênes diminuent très rapidement, elles sont remplacées par des étendues dominées par le genévrier qui profite des nouveaux espaces disponibles et relativement ouverts pour croître. Ces changements s'accompagnent d'une augmentation nette des spores de champignons coprophiles et d'apports détritiques importants (argiles, carbonates et minérogéniques). La colonne d'eau présente une légère hausse de son oxygénation. Les flux très faibles de macrocharbons de bois suggèrent que les incendies ne sont pas à l'origine de ce changement mais que d'autres moteurs sont à l'œuvre. En effet, ce changement apparaît



synchrone à la formation dans la Mer Adriatique de dépôts sapropéliques\*. Ces sapropels se sont formées en raison d'un refroidissement progressif de la mer dû au ralentissement de la circulation océanique, elle-même induite de la hausse des précipitations (**Figure 79**). Ce refroidissement n'est pas continu mais est ponctué par de brèves phases de réchauffement. Dans le lac Vrana, l'augmentation des précipitations se traduit donc par la hausse des apports détritiques argileux, la hausse de l'oxygénation de ces eaux et la baisse des températures. Tout ceci expliquerait en partie la diminution progressive et marquée des chênaies. Néanmoins, il ne faut pas sous-estimer dans ce processus l'impact croissant des agriculteurs néolithiques comme le montre la hausse des spores de champignons coprophiles, signe d'une probable augmentation de l'élevage ou peut-être également de la présence de grands herbivores à proximité du lac Vrana. Toutefois, la hausse des précipitations au cours de cette période pourrait avoir pour conséquence de sur-représenter *Sporormiella* et les *Sordariacées* en raison d'un lessivage plus important des sols qui entraînerait ces spores vers le lac lors d'épisodes de pluies plus intenses. Les premiers pollens d'oléacées proches de l'olivier apparaissent dans les paysages du Kvarner quelques millénaires plus tard vers 5535 cal. BC, soit 7485 cal. BP, lorsque le climat s'adoucit de nouveau. Cet intervalle est calibré à l'aide de quatre dates radiocarbone (10 375 ± 45 BP, 10 400 ± 35 BP, 10 540 ± 45 BP et 11 370 ± 140 BP).



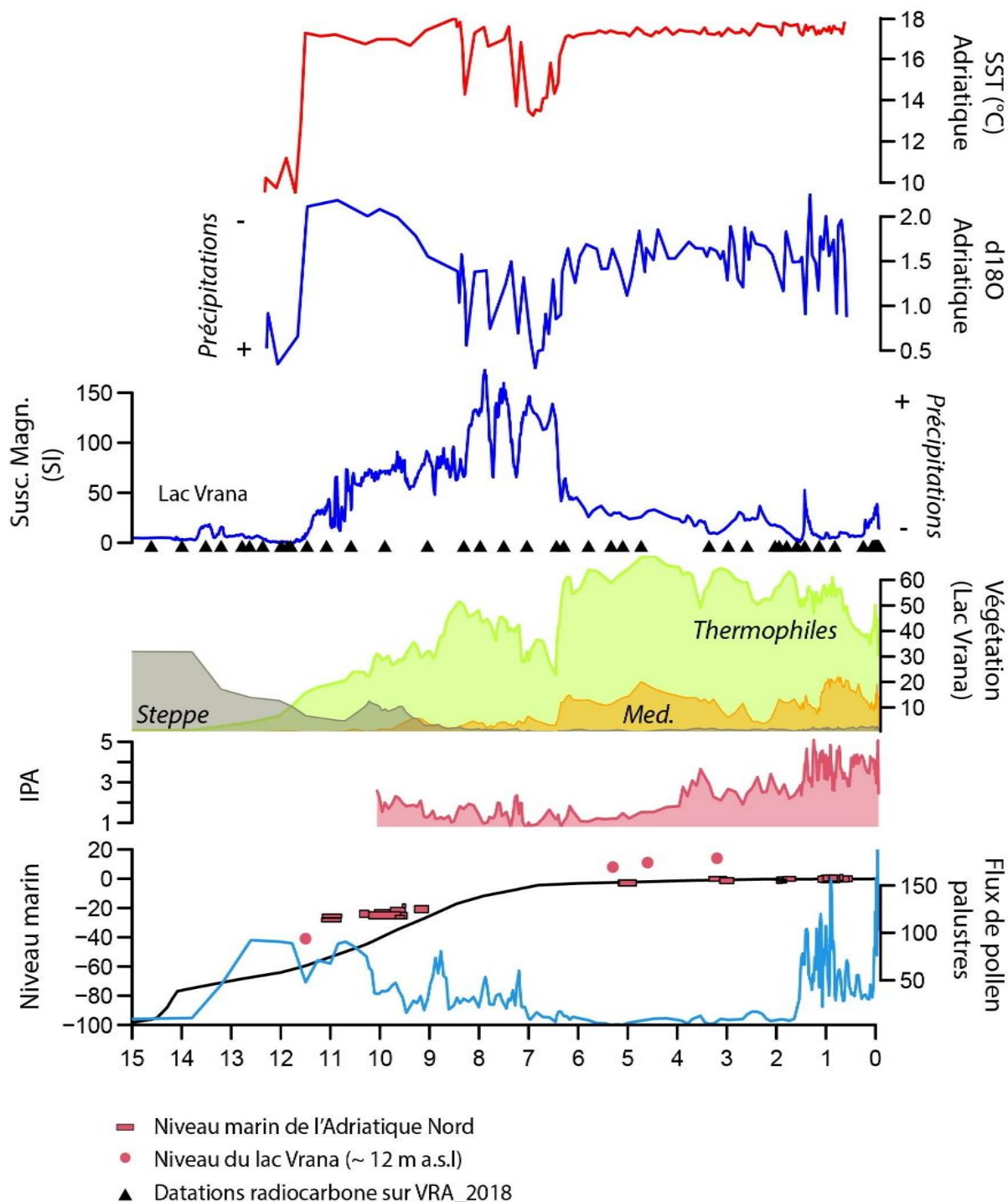
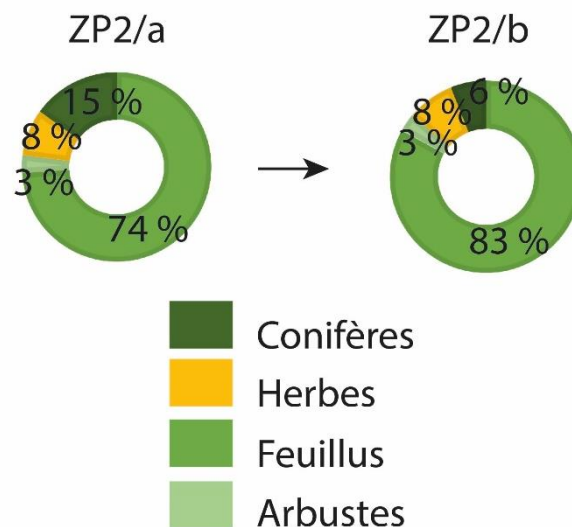


Figure 79. Les forêts thermophiles de Cres dans leur contexte avec de bas en haut, le flux de pollen palustre du lac Vrana comparé à l'évolution du niveau marin général et de l'Adriatique Nord ; évolution des proportions d'IPA et de la végétation dans le bassin versant de Vrana (espèces steppiennes, thermophiles, méditerranéennes) ; susceptibilité magnétique de VRA\_2018 ; d180 et température de surface (SST des eaux de l'Adriatique)

### 5/ L'anthropisation de l'archipel du Kvarner (4550 cal. BC – 1150 cal. AD soit 6500 – 800 cal. BP)

Dans la zone ZP2/a, un nouveau changement important de la végétation a lieu : le paysage se referme. En effet, à partir de ce qui correspond au Néolithique moyen jusqu'au milieu de l'âge du Bronze (1650 cal. BC soit 3600 cal. BP), les chênaies ne cessent de se développer. L'évènement climatique 2250 cal. BC (4200 cal. BP), n'est pas visible dans le diagramme pollinique et/ou dans les résultats des analyses sédimentaires et géochimiques de VRA\_2018. Cette absence

peut être le résultat combiné de la moins bonne résolution du modèle d'âge et de l'échantillonnage. En effet, cet évènement très bref est encadré par deux datations radiocarbone. La première est obtenue à 123 cm (VRA-P\_98) et donne un âge calibré à 4740 cal. BP (marge d'erreur : 4590 – 4855 cal. BP). La seconde se situe à 113 cm (VRA-P\_88) avec un âge calibré à 3345 cal BP (marge d'erreur : 3070 – 3590 cal. BP). Chaque environnement lacustre peut également avoir une réponse différente face à un changement climatique aussi bref (Bini et al., 2019). Cet évènement n'a pu être tout simplement pas très marqué dans le bassin versant de Vrana.



Dans la zone ZP2/b, et sur une très longue période, soit du milieu de l'âge du Bronze et jusqu'au milieu du Moyen Âge, les forêts de chênes vont lentement régresser. Cette diminution est directement causée par les défrichements réguliers et de plus en plus étendus, pour l'utilisation du bois (chauffage, bâtiments, proto-industrie...) et/ou pour ouvrir de nouveaux espaces à l'agriculture (Schmidt et al., 2001 ; Kranjc, 2009). Cette ouverture est également visible dans les sédiments de Osor et de Punta Secca.

Deux épisodes plus marqués d'ouverture du milieu sont observés vers 1550 cal. BC (3500 cal. BP) au cours de l'âge du Bronze et entre 550 et 50 cal. BC (2500 – 2000 cal. BP), à la fin de l'âge du Fer – début de l'Antiquité.

Cette deuxième ouverture qui débute vers 550 cal. BC (2500 cal. BP) coïncide avec un pic d'érosion et une forte hausse des pollens d'olivier et de céréales ; ces changements correspondant à une exploitation plus importante de ces deux taxons. D'après **Nicod (2003)**, l'implantation en Adriatique des Grecs à partir des environs de 300 BC (2250 BP) a permis le développement de l'olivier ainsi que l'extension des pâturages et l'accélération des défrichements. Est-ce que la hausse des cultures sur l'archipel du Kvarner n'est pas issue de l'importation par les grecs bien qu'il n'y ait pas de preuves de leur installation sur les îles ?

Les sédiments des lacs d'Osor et de Punta Secca présentent également des proportions importantes de pollens de céréales (Osor, 2 % ; Punta Secca, 15 %). La première occurrence du noyer (*Juglans regia*) est observée quelques siècles plus tard autour de 250 cal. BC (2200 cal. BP). Les études génétiques et palynologiques récentes ont démontré une extension du noyer dans toute l'Europe depuis plusieurs refuges en altitude après 550 cal. BC environ (2500 cal. BP) (**Pollegioni et al., 2017 ; Sadori et al., 2013**). Une dispersion principalement portée par les grecs et les romains qui généralisent l'utilisation des noix (**Bottema, 1980**). L'évolution des proportions de noyer est ainsi étroitement reliée à leur gestion par l'homme (**Mercuri et al., 2013 ; Pollegioni et al., 2017**). Enfin, l'Antiquité est surtout marquée par l'augmentation de l'aulne autour du lac vers 235 cal. AD (1715 cal. BP) qui peut être le signe d'une phase légèrement plus humide. L'apparition du châtaignier vers 175 cal. AD (1715 cal. BP) souligne son exploitation par l'homme à travers tout l'empire romain. Les sédiments du lac d'Osor présentent des résultats similaires avec une hausse de l'aulne entre 1000 cal. BC et 1000 cal. AD (3000 et 1000 cal. BP) et une apparition du châtaignier autour d'Osor à environ 300 cal. BC (2250 cal. BP). La petite différence peut être expliquée par le modèle d'âge moins précis à Osor.

La multiplication du nombre de datations sur la séquence VRA\_2018 a permis l'établissement d'un modèle d'âge/profondeur très robuste. Cette analyse à haute résolution et en continu de la sédimentologie et de la palynologie a permis de caractériser avec précision les modifications de la végétation et de l'environnement.

Le développement ci-dessous, couvrant la période comprise entre l'Antiquité et le haut Moyen Âge est issu d'une publication dans *Antiquité Tardive* :

**L'homme et son environnement. L'approche interdisciplinaire sur l'évolution des territoires insulaires de l'archipel du Kvarner, Croatie (Extrait)**

Čaušević-Bully, M., Massa, C., Rousseau, M., Bichet, V., Richard, H., & Novak, M. (2021).

**1. L'approche paléo-environnementale**

Dès l'époque romaine, l'ancienne cité d'*Apsoros* (Osor) était un centre prospère situé au centre des routes de commerce maritime reliant les principaux ports du nord de l'Adriatique. Cependant, malgré l'abondante littérature consacrée à l'évolution de la cité et à son importance politique, économique et militaire, les informations disponibles sur les pratiques alimentaires des habitants et les pratiques agricoles sont partielles et discontinues. Notamment, nous ne savons pas si les multiples bouleversements politiques et socio-culturels qui ont émaillées l'histoire de la ville – de son développement par les romains jusqu'à son intégration dans l'Empire byzantin, en passant par la conquête des ostrogoths – ont eu une incidence sur les pratiques agro-pastorales de la région, suite à une évolution des modes de subsistance des populations locales ou en réponse à des demandes à plus grandes échelles.

Les études paléoenvironnementales consistent à l'identification des conditions environnementales passées (végétation, climat, écologie, érosion, etc.) qui ont été conservées dans un « enregistrement » sédimentaire, généralement des sédiments lacustres ou de la tourbe, au moment de l'accumulation du sédiment. L'intégration de ces données avec les connaissances archéologiques et historiques peut contribuer à une meilleure compréhension des changements socio-économiques des populations passées et de leurs interactions avec le milieu naturel. Dans le cadre du projet IATEKA, les séquences sédimentaires lacustres de 4 lacs ont été prélevées sur les îles de Krk et de Cres afin de fournir un enregistrement continu de l'utilisation des sols et de l'évolution des paysages au cours du temps.

Dans cet article nous présentons les résultats des analyses des sédiments du lac Vrana (*Vransko jezero*), situé près de la ville d'Osor, entre le 1er siècle avant J.C. et le VIIIe siècle après J.C. Les sédiments, récupérés par forage, ont été découpés en tranches de 1 cm et analysés pour leur contenu en pollen, spores (notamment de champignons coprophiles), particules de charbons, carbonates et matière organique. Toutes ces données permettent d'évaluer l'évolution de la végétation régionale et de reconstituer les phases d'emprises et déprises agro-

pastorales ainsi que leurs conséquences sur l'érosion des sols. La chronologie des dépôts est obtenue à partir de l'interpolation entre six datations au radiocarbone. L'intervalle de confiance des âges, défini par les limites entre lesquelles se trouve leur vraie valeur au seuil de probabilité de 68 %, a une amplitude de 100 ans entre le I<sup>er</sup> siècle avant J.C. et II<sup>e</sup> siècle après J.C., puis augmente jusqu'à 250 ans au cours des V<sup>e</sup> et VI<sup>e</sup> siècles, et enfin décroît de nouveau à 100 ans vers le VIII<sup>e</sup> siècle.

## **2. Les indicateurs du paysage et de l'activité agricole**

L'abondance relative des grains de pollen et des spores donne un aperçu des caractéristiques du paysage passé. Le diagramme pollinique révèle un environnement relativement fermé et forestier avec 90 % d'arbres et arbustes. Les taxons observés sont caractéristiques d'une forêt de type chênaie (chêne, orme, tilleul, érable, frêne) comprenant des espèces méditerranéennes (chêne vert, charme houblon, pin, pistachier, olivier) ; le chêne pédonculé et le chêne pubescent dominant la végétation (**Figure 80**).

Les effets de l'agriculture sur la végétation et le paysage sont classiquement décrits par les indices polliniques d'anthropisation (IPA, **Figure 80**). Ils correspondent à la somme des abondances relatives des plantes cultivées, tel que les céréales, et plantes rudérales qui poussent spontanément dans les milieux fréquentés par l'homme, tel que le plantain, l'armoise, ou encore l'oseille, à la suite de défrichements et à l'introduction d'animaux domestiques. Sur la période d'étude, on note une présence constante des IPA, autour de 5 %, indiquant un milieu clairement anthropisé. D'autres indicateurs importants sont les spores de champignons coprophiles, variant ici entre 2 et 15 %. Ces champignons se développent dans les déjections des herbivores et sont donc largement présents dans les pâturages.

Les données palynologiques confirment donc la continuité de l'occupation du bassin versant du lac par l'homme entre le I<sup>er</sup> siècle avant J.C. et le VIII<sup>e</sup> siècle après J.C.

## **3. Le lac Vrana à l'époque romaine**

*Première période : introduction et développement de nouvelles cultures (50 cal. BC – 300 cal. AD)*

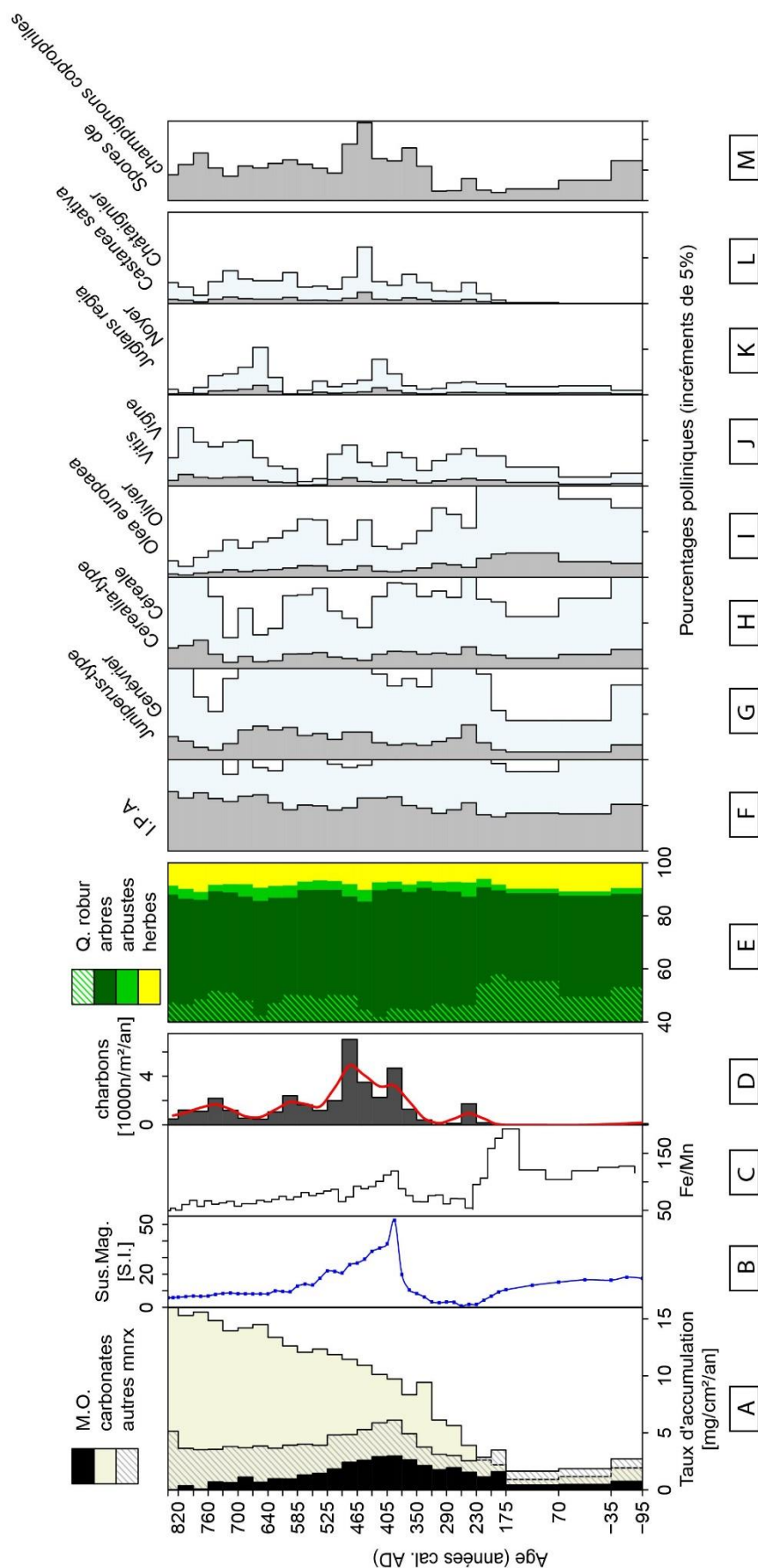


Figure 80. Données sédimentologiques, macro-charbons, pollens et NNP : Reconstruction des changements dans le bassin versant du lac Vrana et changements dans la composition des sédiments incluant : (A) Flux total de carbone organique et taux de sédimentation, (B) Susceptibilité magnétique (SM), (C) Oxygénation de la colonne d'eau avec le rapport Fe/Mn, (D) Flux des macrocharbons, (E à M) abondance relative des indices polliniques d'anthropisation (IPA), des pollens (*Juniperus*, *Cerealia*-type, *Olea europaea*, *Vitis*, *Juglans regia*, *Castanea sativa*) et des macrofossiles non polliniques (spores de champignons coprophiles comprenant *Sporormiella* et *Sordariaceae*)

Les proportions de pollen d'olivier sont en constante augmentation depuis 50 avant notre ère (BC) avec un maximum de 3,3 % atteint vers 150 cal. AD. Cette augmentation est vraisemblablement liée à son exploitation pour la fabrication d'huile d'olive comme ailleurs en méditerranée (Kaniewski et al., 2012 ; Mercuri et al., 2013). Des bassins de décantation pour l'huile et des amphores destinées à son stockage ont en effet été découverts aux alentours de cette période sur l'île voisine de Krk (Kopáčková, 2020). La vigne est également en nette progression depuis 70 cal. AD environ. Les données polliniques obtenues sont similaires au site de Mirne (Istrie, Kaniewski et al., 2016) qui montre un essor de l'oléiculture et de la viticulture autour du 1er siècle après J.-C., développé à grande échelle par les romains pour répondre à une demande régionale ou locale. L'huile d'olive était quant à elle, destinée à être exportée dans des amphores vers le Nord de l'Italie et la région du Danube. L'apparition marquée du châtaignier vers 175 cal. AD suggère fortement son exploitation sur l'île de Cres dès le IIe siècle après J.C. bien qu'aucune preuve archéologique n'atteste de réelles « châtaigneraies » sur l'archipel du Kvarner. À la même époque, l'olivier amorce une graduelle diminution, de 3,3 % vers 150 cal. AD jusqu'à seulement 0,1 % vers 800 cal. AD, ce qui pourrait correspondre à un abandon progressif de son exploitation. Vers la fin du IIe siècle, une expansion du genévrier, arbuste héliophile, de 0,7 à 1,3 %, accompagné d'un fléchissement du chêne pédonculé et/ou pubescent (de 55 à 50 %) indique une légère ouverture du milieu. Cette ouverture s'accompagne de l'augmentation des céréales, de la vigne et de l'ensemble des IPA, suggérant une progression des cultures et des prairies. L'apparition des premiers charbons de bois indique que le feu a dû être utilisé pour défricher. Notons également l'accumulation de carbonates lacustres qui débute au cours du IIIe siècle et qui ne cessera d'augmenter jusqu'à la fin de la période couverte ici. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette hausse de productivité primaire : l'apport de nutriments (phosphore) lié aux activités humaine (Schmidt et al., 2001), une augmentation des températures, ou encore une augmentation du niveau du lac liée aux changements du niveau marin (Faivre et al., 2019). Cette hausse de niveau a augmenté la surface des zones littorales peu profondes et productives du lac dans sa partie nord (Figure 80).

#### ***Deuxième période : intensification des pratiques (300 – 550 cal. AD)***

Au cours du IVe siècle après J.C., la diminution des céréales et l'augmentation des spores de champignons coprophiles suggèrent un développement des activités pastorales aux dépens

des surfaces cultivées. Les flux de matière minérale détritique et de matière organique atteignent des valeurs maximales de 6 et 3 mg/cm<sup>2</sup>/an, respectivement. Cette augmentation est accompagnée d'un pic de susceptibilité magnétique (jusqu'à 50 SI vers 370 cal. AD) causée par une augmentation de la concentration des grains magnétiques dans le sédiment, marqueur d'une érosion plus importante des sols au cours de cette période. De plus, la diminution synchrone du genévrier, du chêne pédonculé-pubescent et la nette augmentation des flux de charbons soulignent que cette érosion est probablement la conséquence de défrichements par le feu, augmentant l'exposition des sols aux ruissellements et au piétinement par les herbivores domestiques. Néanmoins, une période humide mise en évidence dans des enregistrements paléoclimatiques régionaux implique également une amplification climatique du ruissellement et de l'érosion (Bungten et al., 2011 ; Welc et al., 2019).

Le début de cet épisode d'intensification agricole peut être mis en relation avec la consolidation des frontières romaines au cours du III<sup>e</sup> siècle et l'importance stratégique prise par la région. Des changements de pratiques agricoles, suite à la prise du pouvoir par les ostrogoths, entre la fin du Ve siècle et le début du VI<sup>e</sup> pourraient également être évoqués pour expliquer le pic d'activité pastorale dans le bassin versant du lac de Vrana. Pour l'instant, la marge d'erreur de la chronologie ne permet pas d'attribuer avec certitude les changements observés à des événements historiques aussi précis.

#### **4. Déprise pastorale à l'époque byzantine : (550 – 900 cal.AD)**

Une nouvelle progression du chêne pédonculé-pubescent et du genévrier est enregistrée. Elle est accompagnée d'une diminution des spores de champignons coprophiles et des indicateurs d'érosion des sols, qui restent cependant 2 à 4 fois plus élevés qu'avant le II<sup>e</sup> siècle. Ces d'indices démontreraient une déprise pastorale et une légère fermeture du milieu. Une chute abrupte de la vigne au milieu du VI<sup>e</sup> siècle de notre ère et une augmentation des céréales au cours du VIII<sup>e</sup> siècle sont également visibles.

#### **5. Les apports de l'enregistrement du lac d'Osor**

La petite dimension du système lacustre d'Osor le rend potentiellement plus sensible et plus réactif à l'anthropisation du milieu. Cependant, la plus faible résolution des analyses



palynologiques et du modèle chronologique par rapport à l'enregistrement de Vrana empêche une comparaison détaillée des événements.

Les premiers résultats montrent un milieu plus ouvert que le centre de l'île de Cres du 1<sup>er</sup> siècle avant J.C. au VIII<sup>e</sup> après J.C, avec 68 % de pollen d'arbres contre 90 % pour Vrana. Les défrichements ont probablement été plus importants sur cette partie de l'île qui est plus proche de la ville d'*Asporus*. La vigne et les céréales ont été cultivées en continu durant cette période, avec une hausse de la proportion de vigne après 50 cal. BC. L'olivier montre une tendance similaire à celle de Vrana : une augmentation progressive depuis le Ve siècle avant J.C. avec un maximum au début du III<sup>e</sup> siècle après J.C, puis une lente diminution jusqu'au VIII<sup>e</sup> siècle. Enfin, les très faibles proportions de spores de champignons coprophiles (moins de 0,1%) indiquent un pastoralisme très limité dans le bassin versant du lac d'Osor jusqu'au VIII<sup>e</sup> siècle, la zone étant probablement privilégiée pour les cultures. Cette dépression, très proche de la mer, a aussi été influencée par des entrées marines qui perturbent la végétation propre à cette zone humide qui devient plus halophile épisodiquement.

## **Conclusion**

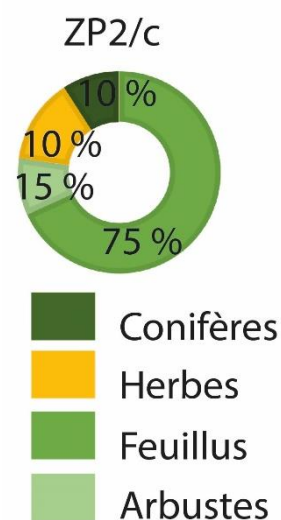
À travers l'analyse de sédiments lacustres, l'approche paléoenvironnementale permet de mettre en évidence l'évolution des paysages anciens en lien avec le contexte climatique et les changements socio-culturels, bien que la chronologie des dépôts sédimentaires soit peu précise à cette échelle de temps court. Cependant, le modèle d'âge développé sur Vrana reste plus robuste que pour le lac d'Osor. Du 1<sup>er</sup> siècle avant J.C. au II<sup>e</sup> siècle après J.C., la culture de l'olivier occupe une place importante dans l'agriculture locale. L'influence culturelle romaine se distingue par l'introduction du noyer et les premiers défrichements au II<sup>e</sup> siècle après J.C., puis au III<sup>e</sup> siècle après J.C., avec la hausse des cultures de céréales, de la vigne et l'introduction du châtaignier.

Au IV<sup>e</sup> siècle après J.C. l'élevage du bétail est privilégié au profit des cultures de céréales. Cet événement pourrait coïncider avec la mise en place de la Liburnie en région-bouclier, potentiellement pour répondre aux demandes des troupes armées. L'accession des ostrogoths au pouvoir à la fin du IV<sup>e</sup> après J.C. peut être également évoquée. Toutefois, les incertitudes sur le modèle chronologique limitent l'attribution certaine de ces phénomènes à

l'un ou à l'autre de ces faits historiques. Enfin, à l'époque byzantine, la culture des céréales est plus largement favorisée sur cette île.

### 6/ Intensification des pratiques agropastorales au dernier millénaire (1150 – 2018 cal. AD soit 800 – (-68) cal. BP)

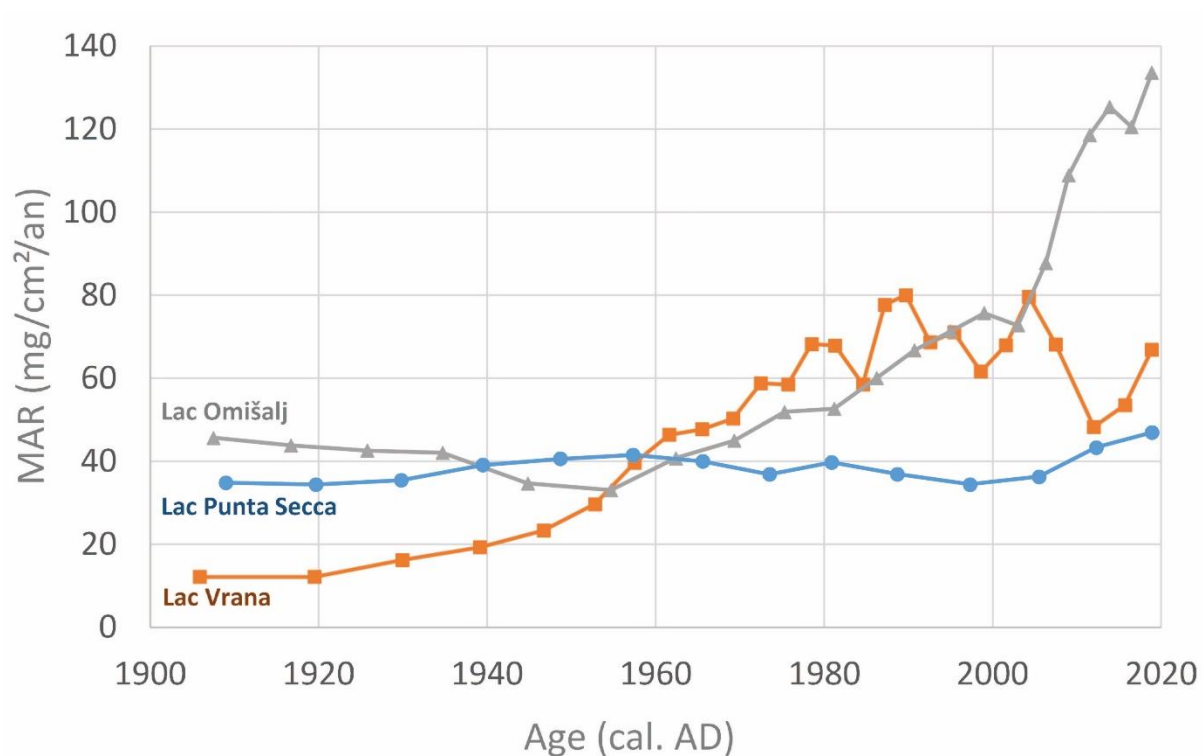
Depuis le milieu du Moyen Âge environ (zone ZP2/c), comme le démontre également **Beug (1977)** en Istrie, les chênaies ne cessent de diminuer, remplacées progressivement par des forêts de conifères et de vastes étendues d'arbustes, souvent épineux, dans lesquelles domine le genévrier. Les zones ouvertes, non cultivées, sont occupées par des pâtures souvent pauvres et sèches. Les données palynologiques de VRA\_2018 montrent aussi la hausse des pollens de vigne et d'olivier résultat d'une intensification de leur exploitation. Les mêmes tendances sont observées sur les sites d'Osor et de Punta Secca. L'archéologie atteste justement qu'au cours du XIII<sup>ème</sup> siècle après J.-C., sous la domination de Venise, les populations du littoral mais aussi des îles ont cherché à augmenter le rendement des productions d'huile d'olive et de vin (**Nicod, 2003**).



La progression des spores de champignons coprophiles observée est le signe d'un regain des activités pastorales. Ce changement intervient justement alors que l'archipel du Kvarner est en pleine phase de transformation. Au XII<sup>ème</sup> siècle, la féodalisation des îles est en cours d'achèvement. Celle-ci entraîne une complète réorganisation du territoire avec la délimitation de nouvelles parcelles agricoles, vignobles, forêts et pâturages ainsi que la construction de nombreuses maisons de bergers éparpillés sur l'ensemble de l'archipel (**Protić, 2014 et 2015**). La hausse des apports d'éléments détritiques minérogéniques et organiques dans le bassin versant de Vrana peut donc être la conséquence directe d'activités humaines plus importantes. Plus récemment, au XVIII<sup>ème</sup> siècle, la construction d'un ensemble de terrasses sur l'île de Cres a permis le développement des cultures fruitières. Enfin, dès le XIX<sup>ème</sup> et jusqu'au début du XX<sup>ème</sup> siècle, la démographie des îles augmente fortement entraînant le regain des activités économiques liées à l'élevage du mouton. La culture de l'olivier est également privilégiée afin de compenser la crise du phylloxéra. La plantation récente de pin a largement contribué à son extension sur l'île de Cres. Cette dernière période montre très clairement une modification de

l'environnement, conséquence d'une pression agropastorale importante. L'ensemble de cette période est calibré à l'aide de quatre dates radiocarbone et des mesures de plomb 210.

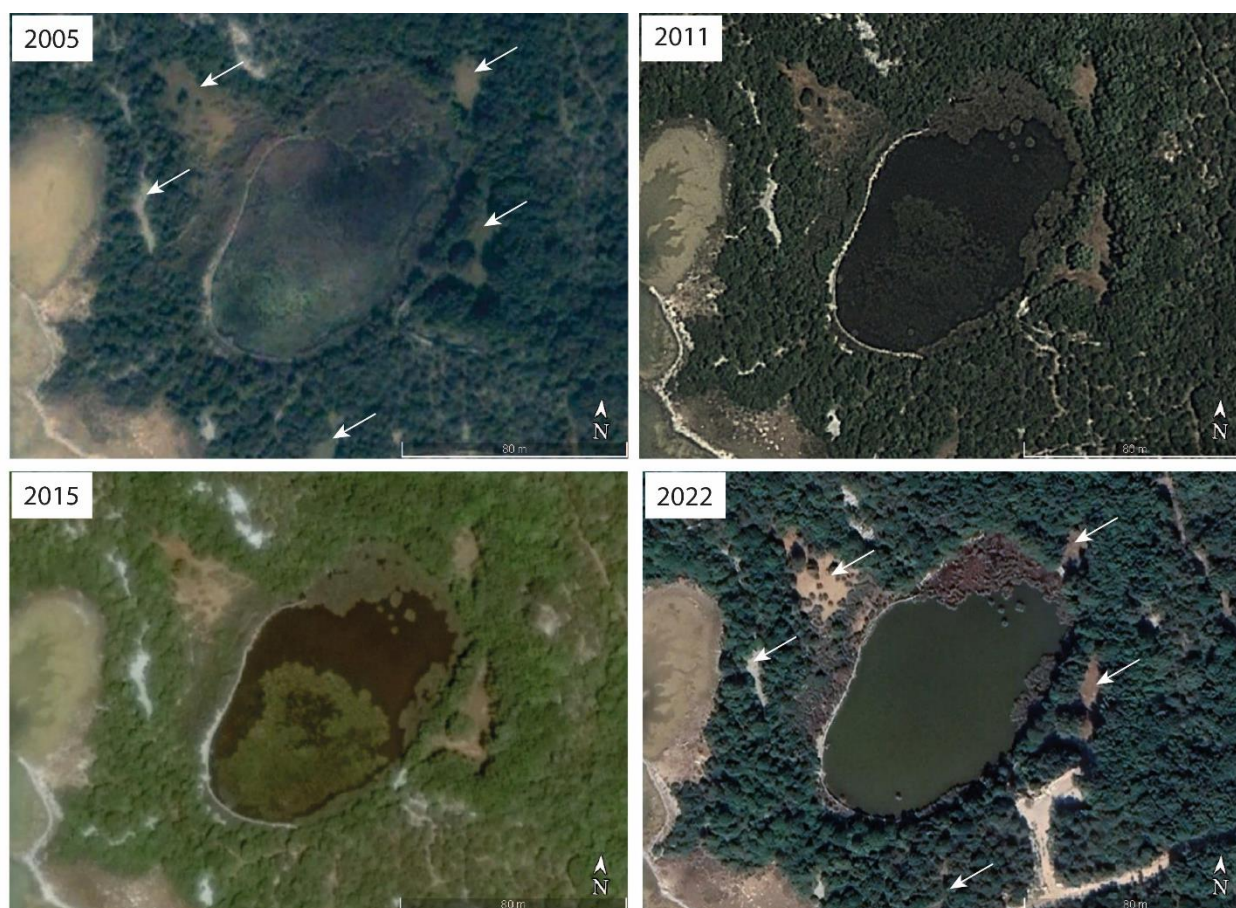
Les chronologies récentes établies d'après l'activité du plomb permettent de caractériser les changements du dernier siècle dans les trois bassins versants respectifs (Punta Secca, Omišalj et Vrana). Dans la **Figure 81** a été tracé l'évolution des taux de sédimentation ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ ) pour chaque lac depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle.



*Figure 81. Taux de sédimentation du XX<sup>ème</sup> siècle après J.-C. du lac Punta Secca, Omišalj et Vrana*

Pour le petit lac Punta Secca, nous ne remarquons pas de réels changements du taux de sédimentation. Celui-ci reste relativement stable entre 38 et 45  $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$  laissant supposer que très peu de modifications de son bassin versant et de ces sources sédimentaires ont eu lieu. D'après les données polliniques et sédimentologiques recueillies, le milieu à proximité du lac Punta Secca est en cours d'enfrichement et/ou d'eutrophisation. Le genévrier et les herbacées (en particulier les poacées) envahissent progressivement les zones ouvertes. D'après les photographies Google Earth, quelques changements sur les dix-sept dernières années sont perceptibles sur le pourtour du lac avec notamment la fermeture progressive de zones anciennement à nues (**Figure 82**).

Au contraire, le taux de sédimentation du lac Omišalj ne cesse d'augmenter depuis 1955 et passe de 39 à 134 mg/cm<sup>2</sup>/an<sup>-1</sup>, marqué par une accélération depuis 2003. L'histoire récente du lac Omišalj est beaucoup plus complexe que pour les deux autres lacs. En effet, l'exploitation du bassin d'Omišalj a débuté relativement tôt avec la construction en 1912 d'un canal reliant le lac à la mer permettant d'éviter l'inondation des zones pâturées environnantes. Depuis les années 1970, le lac est marqué par une baisse drastique de son niveau en raison d'un pompage excessif. Puis, en 1972, la mise en place d'une station d'épuration à proximité et la construction d'un remblai entraînent une modification de la morphologie du bassin d'Omišalj. Enfin, en 2001, une extension du canal est construite. Ces changements peuvent expliquer à eux seuls une partie de l'évolution du taux de sédimentation et en particulier la forte augmentation enregistrée en 2003. Cette nette progression peut être en partie rattachée aux travaux d'extension du canal. L'erreur sur le modèle d'âge au plomb est de  $\pm 4$  ans ce qui peut expliquer que l'augmentation soit visible en 2003 et non en 2001.



*Figure 82. Photographies Google Earth depuis 2005 du lac Punta Secca*

Depuis 1900, un enrichissement est perceptible dans le diagramme pollinique obtenu des sédiments du lac Omišalj. On y observe une légère inflexion dans les courbes de pollens de genévrier et des poacées qui tendent ainsi à progresser. À l'inverse, les pollens d'arbres comme le chêne ou le filaire diminuent, seul le charme-houblon est marqué par une nette progression. Plusieurs terrassements proches des berges ont également été menés (images Google Earth) pouvant expliquer une fois de plus l'augmentation du taux de sédimentation. Enfin, on peut noter la fermeture progressive de quelques zones (**Figure 83**).



*Figure 83. Photographies Google Earth depuis 2005 du lac Omišalj*

Pour finir, le taux de sédimentation du lac Vrana augmente progressivement depuis les années 1920 environ pour atteindre un maximum entre 1990 et 2004 à  $80 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$  avant d'entamer une rapide chute. L'histoire du lac Vrana est surtout marquée par la construction d'une station de pompage en 1946. Sur la **Figure 84** apparaît la quantité d'eau pompée dans le lac Vrana, les

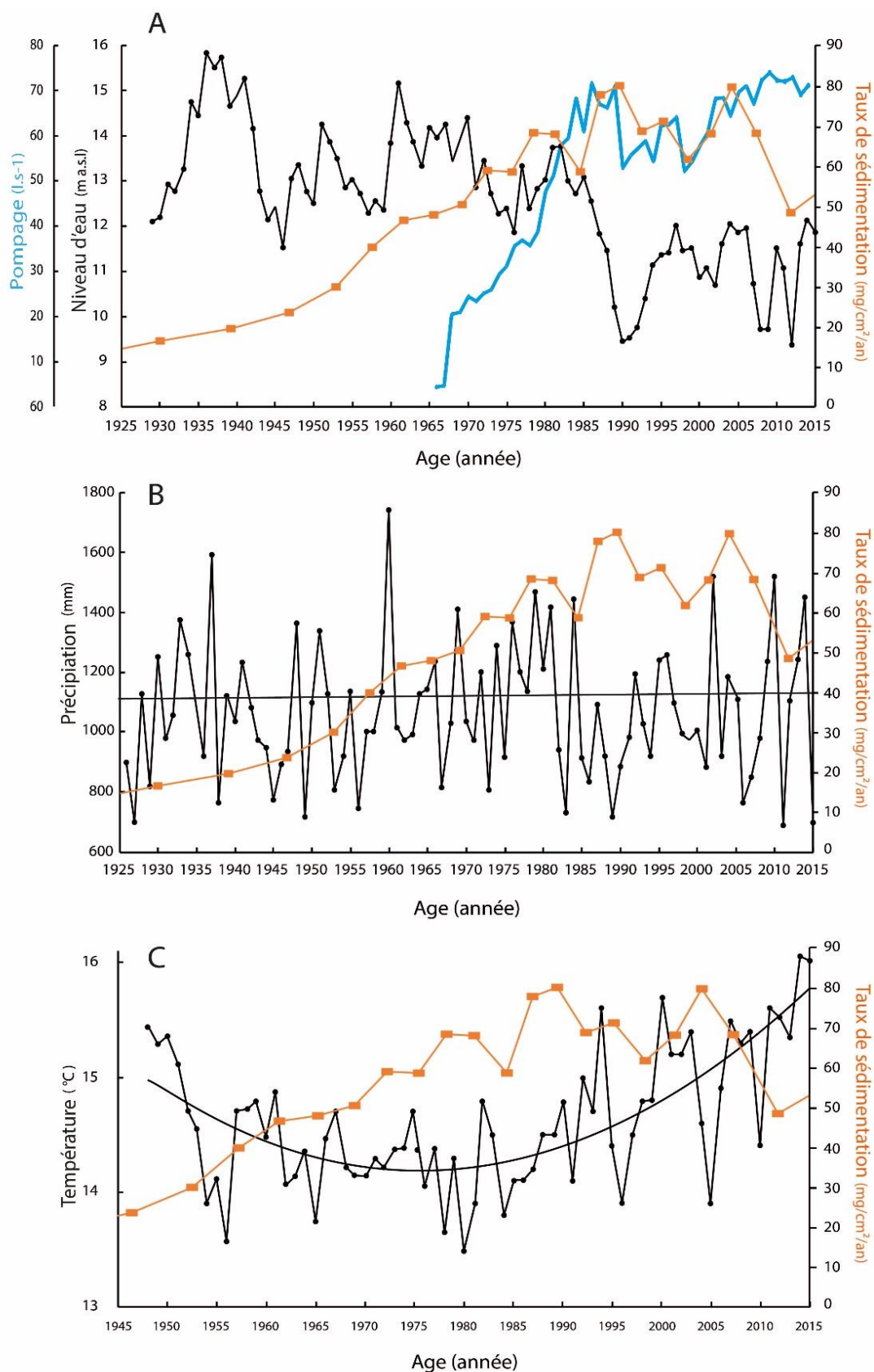


Figure 84. Comparaison du taux de sédimentation du lac Vrana entre 1925 et 2015 en mg/cm<sup>2</sup>/an (courbe orange) avec (A) l'évolution du niveau du lac Vrana entre 1929 et 2015 (courbe noire) et la quantité d'eau annuelle pompée entre 1967 et 2015 (courbe bleu) ; (B) les précipitations annuelles mesurées à la station météorologique de Cres pour la période entre 1926 et 2015 et (C) les températures annuelles mesurées à la station météorologique de Cres pour la période entre 1948 et 2015

précipitations et les températures mesurées à la station météorologique de Cres au cours du XX<sup>ème</sup> siècle. Ces trois variables impactant l'évolution du niveau d'eau du lac Vrana (**Bonacci, 2017**) sont directement comparées à l'évolution du taux de sédimentation estimé de la séquence VRA\_2018. L'évolution des précipitations annuelles entre 1926 et 2015 ne présente pas de tendances significatives mais les températures annuelles régionales de l'air montrent quant à elles une forte augmentation au cours des vingt-cinq dernières années. D'après plusieurs études, des températures de l'air plus élevées peuvent fortement influencer l'augmentation de l'évaporation de la surface du lac (**Bonacci et al., 2015 ; Van Der Schriek & Giannakopoulos, 2017**). Enfin, le pompage de l'eau est l'une des composantes influençant le plus l'évolution du niveau d'eau du lac. Les données de pompage recueillies débutent en 1965 et la quantité d'eau pompée n'a cessé d'augmenter depuis. La légère diminution de 1991 correspond à la guerre en Croatie et à la chute du tourisme dans la région. Ainsi, la diminution inexorable du niveau du lac est la conséquence de l'augmentation de l'évaporation à sa surface et du pompage de ses eaux (pour les besoins du tourisme) ; ces phénomènes sont responsables d'une érosion accrue des berges et de la remobilisation des sédiments. L'augmentation du taux de sédimentation est donc intimement liée aux variations du niveau du lac Vrana.

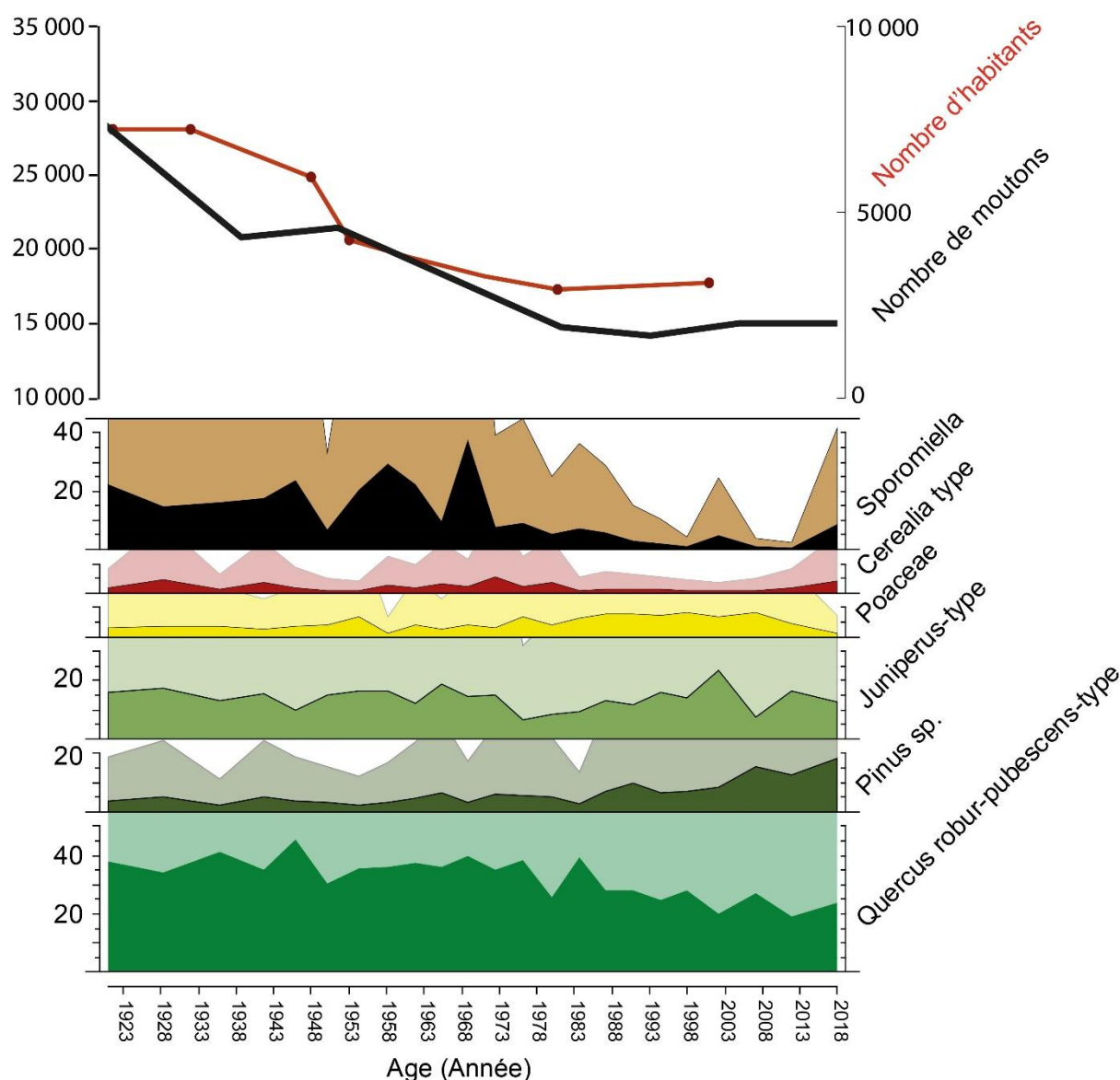
D'après les données polliniques obtenues de la séquence de Vrana, les paysages alentours sont actuellement en cours d'enfrichement (hausse du genévrier) et ponctués par des phases de reforestation par différentes espèces de pin (**Figure 85**).

Le nombre de moutons sur l'archipel du Kvarner a largement diminué depuis le milieu du XVI<sup>ème</sup> siècle pour se stabiliser depuis environ une vingtaine d'années. Les activités pastorales récentes en constante diminution ne semblent donc pas avoir une grande influence sur l'évolution des taux de sédimentation du dernier siècle (**Figure 85**). Cependant, l'ouverture du milieu a pu favoriser l'apport d'éléments détritiques et entraîner la hausse de la sédimentation.

Le lac Vrana apparaît alors comme un site extrêmement important parce qu'il est la réserve d'eau potable la plus importante de tout l'archipel. Cependant, il est dépendant des conditions de vie actuelles et futures de l'homme sur cette île. La plupart des projections de changement climatique montrent des diminutions importantes de la disponibilité de l'eau dans la région méditerranéenne d'ici la fin de ce siècle (**Pascuala et al. 2015**). Selon les scientifiques du **GIEC (2007)**, une augmentation de plus de 2 °C pourrait entraîner l'expansion du désert et

des prairies aux dépens des arbustes, et l'expansion des forêts mixtes de feuillus aux dépens des forêts de conifères à feuilles persistantes. La vulnérabilité d'une zone varie en fonction de sa géographie, des caractéristiques de son paysage et des activités humaines à l'œuvre. Les petites îles font partie de ces lieux particulièrement vulnérables aux effets du changement climatique, à l'élévation du niveau de la mer et aux phénomènes météorologiques extrêmes (GIEC 2007).

Selon Bonacci, 2017, deux conséquences sont à attendre concernant le lac Vrana. La première est l'intrusion d'eau de mer dans la masse d'eau douce du lac en particulier si la diminution du niveau d'eau du lac se poursuit et si la montée du niveau de la mer est importante.





La deuxième conséquence pourrait être la pollution superficielle et souterraine du bassin versant. Les eaux stockées et polluées ne pourraient alors être évacuées du lac qu'après une très longue période (l'eau restant en moyenne 32 ans dans le bassin de Vrana, voir **Ožanić & Rubinić 2003**). Il est donc particulièrement important de réduire et d'améliorer le contrôle de l'utilisation de l'eau de ce superbe lac.



## **V. : Conclusion**



*Lac Vrana d'après mélodie.rousseau©*

## **V.1 Résultats principaux**

Les résultats des approches paléoenvironnementales, telles que celles pratiquées par de nombreuses équipes aujourd'hui, sont toujours dépendantes du « site idéal », celui qui enregistre en continu depuis de nombreux millénaires un panel de signaux sédimentologiques et paléobiologiques qui permettront de reconstituer l'évolution de l'environnement local et régional d'une zone d'étude. Les montagnes et les moyennes montagnes offrent souvent ce type de sites. Les lacs, les tourbières, et plus généralement les zones humides, y sont autant d'archives sédimentaires dont l'analyse, couplée à un modèle âge/profondeur adapté, permet de fournir un cadre paléoenvironnemental dynamique. Les fluctuations enregistrées sont générées par des forçages naturels (pédologiques et surtout climatiques) et anthropiques. Elles peuvent être comparées aux données historiques et archéologiques locales et régionales, et aux changements climatiques globaux. Les sites de plaine sont plus difficiles à trouver. Il faut explorer les paléoméandres aux remplissages trop souvent discontinus et les rares zones humides qui généralement n'enregistrent que des périodes récentes, les deux ou trois derniers millénaires. Il y a aussi quelquefois, au cœur même des sites archéologiques, une sédimentation suffisamment dilatée et préservée qui permet une reconstitution du cadre climatique et environnemental de ce site. Malheureusement, dans certaines zones humides et dans de nombreux sites archéologiques, il faut compter avec une préservation des restes biologiques souvent aléatoires.

L'idéal est atteint lorsque les archives sédimentaires étudiées se retrouvent au cœur d'un territoire parfaitement appréhendé par les archéologues et les historiens.

La zone méditerranéenne, à l'exception des parties les plus montagneuses, de quelques lagunes et du remplissage de rares sites archéologiques, est plus difficile à appréhender par le paléoenvironnementaliste en raison surtout de son aridité qui ne permet que rarement l'accumulation régulière de sédiments dans des zones humides. Notre étude s'est focalisée sur une partie de cette zone méditerranéenne, au nord de la Mer Adriatique. Ce choix a été avant tout guidé par la richesse des recherches historiques et archéologiques menées depuis de nombreuses années et qui se prolongent encore aujourd'hui sur les îles de Cres et Krk.

Si le lac Vrana, au centre de l'île de Cres, a tout de suite attiré notre attention par ses dimensions et surtout par sa position au cœur d'un paysage qui a conservé un réseau complexe de délimitations cadastrales montrant une succession de périodes d'occupations et probablement de pratiques agricoles différentes, sur cette même île, nous avons voulu aussi nous rapprocher de l'important centre protohistorique et historique aujourd'hui occupé par la

ville d'Osor. Au sud de cette ville, dans une zone de maquis très dense, se trouvent quelques dépressions circulaires qui ont enregistré, dans des conditions souvent difficiles (entrées marines, bioturbations, assèchements...) quelques informations paléoenvironnementales exploitables. D'autres sites du même type restent à explorer à proximité et peut-être, qu'avec des moyens suffisants, un sondage marin très proche de la cité d'Osor pourrait fournir des informations originales.

Sur l'île de Krk, nous fondions beaucoup d'espoir sur le lac d'Omišalj-Njivice, très proche de l'important site archéologique encore en cours de fouille du *Municipium Flavium Fulfinum*, installé au fond de la baie de Sepen, au sud de l'oppidum protohistorique et de l'actuelle ville d'Omišalj. Grâce aux données récentes, on sait que la fondation de la ville antique de *Fulfinum* date du Ier siècle après J.-C. Puis, la ville a été occupée jusqu'au Vème et peut-être même jusqu'au VIIème siècle. Progressivement remplacée par le complexe tardo-antique (*Villa*) construite au IVème siècle et occupée jusqu'au VIIème siècle. Les dernières tombes dans l'atrium de l'église de *Mirine* témoignent de l'occupation du site jusqu'au VIIème siècle (**Čaušević-Bully et al., in press**). Il suffisait donc de retrouver dans ce lac une sédimentation enregistrant les deux à trois derniers millénaires. C'est bien le cas, toutefois l'histoire très chaotique de ce lac qui a été aménagé depuis longtemps en réservoir – et où une barge a même coulé puis a ensuite été récupérée avec tous les bouleversements sédimentaires qu'on imagine – associée à la difficulté d'isoler suffisamment de restes organiques destinés aux datations par le radiocarbone, font que l'interprétation des données est complexe et ne répond pas pour l'instant aux attentes des archéologues œuvrant sur place. Là-aussi, un forage effectué dans les sédiments de la baie de Seppen, juste au large de *Fulminum*, pourrait apporter des informations précieuses. En 2016, une carotte d'environ un mètre avait été faite manuellement (et avec difficultés) depuis un Zodiac à quelques dizaines de mètres au large du site archéologique. Une datation <sup>14</sup>C faite vers le milieu de la carotte donne 3250 ± 35 BP (Poz-82831) confirmant la potentialité de ces sédiments. Là aussi des moyens plus adaptés permettraient certainement d'effectuer un forage idéalement placé.

Aujourd'hui, la position des chercheurs oscille schématiquement entre deux pôles, accordant la prédominance soit aux contraintes naturelles, soit aux contraintes anthropiques. Or, face à cette complexité nous avons choisi une approche prenant en compte objectivement l'effet combiné des deux facteurs. D'autre part, la volonté de considérer l'effet potentiel de l'homme sur son environnement se heurte souvent à des données archéologiques lacunaires, dans le temps comme dans les modalités de l'anthropisation, et à l'absence d'enregistrements continus des activités agropastorales. Nous avons donc essayé d'élaborer des référentiels

constitués à partir d'exemples de colonisations agraires pour lesquels les paramètres géographiques, techniques et temporels sont parfaitement maîtrisés. Dans notre travail, et surtout grâce aux différentes déclinaisons du programme IATEKA, cette conjonction de facteurs nous semble réunie, en particulier sur l'île de Cres, et notamment autour du lac Vrana.

Grâce aux moyens fournis par le projet IATEKA, les analyses sédimentologiques et paléobotaniques effectuées sur la séquence sédimentaire de Vrana bénéficient d'un modèle âge/profondeur d'une exceptionnelle robustesse fondé sur 34 datations <sup>14</sup>C et l'activité du plomb sur le sommet de la séquence VRA\_2018. Pourtant – et comme souvent dans ces remplissages carbonatés – les restes potentiellement datables (restes de graines, de feuilles, de plantes terrestres et restes de bois...) sont extrêmement rares. Le tri sous loupe binoculaire de plus de 300 échantillons a été indispensable pour retrouver suffisamment de restes de ce type pour effectuer des dates AMS. Cependant, en particulier sur la base de la séquence, des datations sur le sédiment total, corrigées en raison de l'effet réservoir, ont aussi été nécessaires. Les mêmes moyens financiers ont permis l'emploi des meilleures approches sédimentologiques et paléobotaniques. Les changements observés dans le contenu pollinique et les variations des signaux sédimentaires permettent alors de suivre les différentes phases agropastorales qui ont marqué le paysage de l'île de Cres.

L'agriculture que nous avons mise en évidence autour de Vrana repose très tôt sur l'association de la céréaliculture et de l'élevage, mise en évidence par les pollens de céréales, de plantes messicoles et rudérales, des micro-fossiles non-polliniques, en particulier provenant de champignons coprophiles, et par les variations de plusieurs éléments géochimiques et géophysiques marquant l'érosion du bassin versant du lac. Logiquement, les céréales (et sûrement d'autres cultures comme les légumineuses) pourraient occuper d'abord les terres facilement labourables où elles alternaient probablement avec des phases d'abandon assimilables à de la jachère, tandis que le bétail tire sa subsistance des herbages périphériques. Ce bétail joue un rôle important dans l'entretien du paysage et le renouvellement de la fertilité des terres cultivées. L'usage du foin pendant les périodes de stabulation, utile mais moins vitale en hiver que dans des contrées plus au nord, rend possible l'utilisation du fumier. La mise en place de nouveaux territoires agraires s'accompagne - ou est la conséquence - d'une croissance démographique mais il ne faut pas négliger sur ce point l'arrivée de nouvelles populations aux habitudes alimentaires et donc agricoles différentes, c'est le cas sur ces îles comme le démontrent les travaux anthropologiques récents de Mario Novak ([Čaušević-Bully et al., 2014 et 2021](#)). On assiste également, très tôt apparemment, à la mise en place de l'arboriculture et, ce qui pourra être démontré par l'archéologie, au terrassement des pentes.

Une baisse de la vitalité démographique, associée à des désordres socio-économiques parfois très violents, peuvent malheureusement aboutir à une succession d'années de disettes. Ainsi, les espaces agropastoraux reculent et s'enfrichent parfois et, pour les périodes longues de crise, finissent même par être reconquises par les forêts.

À certaines époques, la colonisation de nouvelles zones peu ou pas exploitées, et plus particulièrement les secteurs plus rudes, au sol moins profond et plus caillouteux, pourrait aboutir à de rares périodes de surexploitation du milieu.

Est-ce que la complexité du réseau de murs et du réseau viaire emblématique du paysage entourant Vrana mais bien présent aussi dans d'autres endroits de ces deux îles, est la traduction de ces transformations successives ? Les études en cours concernant l'archéologie du paysage viendront alimenter cette étude pluridisciplinaire d'un paysage original où les empreintes agricoles s'atténuent d'années en années.

## **V.2 Perspectives**

Les analyses futures pourront porter sur l'amélioration de la chronologie de l'ensemble des séquences sédimentaires (VRA\_2018, OMI\_2018, OSOR\_2018 et PS\_2018).

Premièrement, par l'ajout de plusieurs autres datations « bulk » liées à un macroreste terrestre sur le modèle d'âge/profondeur de VRA\_2018. Ces datations supplémentaires permettraient de calculer plus précisément les âges réservoirs et ainsi réduire l'erreur sur les datations « bulk » non-appareillées et celles sur les macrorestes aquatiques. De plus, l'ensemble des datations « bulk » ont été obtenues par fumigation et sans graphitisation entraînant une erreur moyenne sur les mesures de  $\pm 350$  ans. La graphitisation de nouveaux échantillons « bulk » améliorerait grandement la qualité des mesures à  $\pm 70$  ans. Améliorer le modèle d'âge/profondeur de Vrana permettrait notamment de préciser la présence d'un hiatus ou non dans la sédimentation de ce lac.

Deuxièmement avec le modèle d'âge/profondeur de VRA\_2018, OMI\_2018, OSOR\_2018 et PS\_2018, il faudra envisager la recherche et l'identification de niveaux de téphras qui seront confirmés par une analyse géochimique.

D'autres méthodes de datations pourraient être envisagées pour permettre l'obtention de dates sur de très petites quantités de matériel terrestre, notamment sur les modèles d'âge/profondeur de OMI\_2018, PS\_2018 et OSOR\_2016. La datation sur des culots de pollen peut faire partie de l'une d'elles. Enfin, une solution simple à envisager serait la recherche de

macrorestes terrestres sur la seconde moitié des carottes encore conservée pour tenter d'obtenir suffisamment de matériel à dater au radiocarbone (un projet ANR récemment déposé intégrant Vrana pourrait être l'occasion d'effectuer ces nouvelles datations). L'amélioration de la chronologie couplée à un pas d'échantillonnage palynologique plus précis et ciblé sur certaines parties de la séquence de Vrana permettraient de caractériser des épisodes climatiques marquants, peu ou pas visibles actuellement, comme le Dryas récent ou les événements 8200 et 4200.

L'établissement d'une chronologie plus robuste sur les séquences de OMI\_2018 et de PS\_2018 rendrait une analyse palynologique plus fine adéquate, de la même manière que mener une analyse des macrocharbons de bois. Affiner les données polliniques et obtenir un signal incendie sur ces deux archives permettraient ainsi d'établir des corrélations plus justes avec la séquence sédimentaire du lac Vrana (VRA\_2018). Cette comparaison aboutirait à une meilleure vision des changements anthropiques et climatiques à des échelles très locales de l'archipel du Kvarner.

En archéologie, la domestication des céréales (blé, seigle, orge, etc.) et de leur diffusion pendant l'Holocène fait partie d'un des axes centraux de nombreuses recherches. Elles ont joué un rôle majeur dans le développement et la transformation des sociétés humaines (**Zohary et hopf, 2000 ; Jones et al., 2011**). C'est notamment l'une des questions soulevées par le projet IATEKA. C'est pourquoi, l'identification avec précision des périodes de développement des cultures reste nécessaire. La palynologie montrant ses limites notamment sur la distinction entre les pollens de céréales avec les pollens de poacées sauvages, il serait judicieux de détecter et quantifier certaines molécules organiques présentes dans les sédiments. Par exemple, la mesure de la *milliacine* (molécule fossile du millet) dans les sédiments lacustres est une technique qui donne déjà des résultats très prometteurs (**Jacob et al., 2021**). Nous savons d'après les analyses isotopiques des restes humains découverts sur les sites archéologiques de l'archipel du Kvarner que les populations se nourrissaient principalement de millet durant l'Antiquité (**Čaušević-Bully et al., 2021**). La détection de la *milliacine* dans les sédiments du lac Vrana permettrait ainsi de préciser les épisodes de mise en culture de cette céréale en plus de pouvoir être directement comparée avec les données archéologiques. D'autres biomarqueurs peuvent être également extraits en même temps (ex. acide biliaire de moutons, molécules liés aux déjections, etc.) ce qui pourrait apporter d'autres informations utiles.

Il est indiscutablement nécessaire de pousser l'identification des pollens d'olivier par des analyses de microscopie électronique à balayage sur des échantillons ciblés.



Enfin, la caractérisation par perte au feu de la dolomite dans les sédiments du lac Vrana (VRA\_2018) n'a pas abouti. En effet, malgré une augmentation progressive de la température dès 550 °C sur des échantillons tests, la dolomite semblait déjà en partie consumée. Les raisons peuvent être nombreuses mais nous pensons qu'effectuer de nouveaux tests à des températures plus basses (dès 450 – 500 °C) pourrait éventuellement permettre la détermination d'un palier de température à laquelle elle se consume.

Ces analyses supplémentaires amélioreraient donc l'image des paysages passés que nous reflètent à ce jour les données déjà obtenues, tant du point de vue de la chronologie que de la caractérisation plus précise de ces changements. Les moyens mis en œuvre ces dernières années sont importants, tant en archéologie que pour les études paléoenvironnementales et anthropologiques. On perçoit mieux aujourd'hui les mouvements de populations qui ont marqué ces îles, imposé de nouvelles pratiques agricoles et domestiqué les paysages. Si l'influence des grandes tendances climatiques est également bien perçue, il reste encore à évaluer l'impact réel de changements brefs et parfois violents qui ont dû bouleverser temporairement – et parfois plus durablement - l'agropastoralisme local. Pour l'avenir, dans le contexte de réchauffement climatique en cours, on peut s'interroger sur les conséquences de l'abandon de ces pratiques agricoles au profit d'aménagements répondant à la demande croissante du tourisme local.



## VI. : Références

Akkari, D. (2022). L'apport du système d'information géographique (SIG) dans la définition des zones de potentiel hydrique dans le bassin versant Abou Ali (Liban Nord). *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, (4).

Albert, P. G., Tomlinson, E. L., Lane, C. S., Wulf, S., Smith, V. C., Coltelli, M., ... & Menzies, M. A. (2013). Late glacial explosive activity on Mount Etna: Implications for proximal–distal tephra correlations and the synchronisation of Mediterranean archives. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 265, 9-26.

Alegro, A., Stanković, I., Šegota, V., Van De Weyer, K., & Blaženčić, J. (2016). Macrophytic vegetation in the oligotrophic Mediterranean Lake Vrana (Island of Cres, Northern Adriatic)—New insight after 50 years. *Botanica Serbica*, 40(2).

Alessio, M., Bella, F., Improta, S., Belluomini, G., Cortesi, C. T., & Turi, B. (1971). University of Rome carbon-14 dates IX. *Radiocarbon*, 13(2), 395-411.

Ammann, B. (1985). Introduction and palynology: Vegetational history and core correlation at Lobsigensee (Swiss Plateau). *Diss. Bot*, 87, 127-170.

Amouretti, M. C., & Brun, J. P. (1993). La production du vin et de l'huile en Méditerranée (BCHSupplément 26). Paris: De Bocard.

Andersen, S. T. (1979). Identification of wild grass and cereal pollen [fossil pollen, Annulus diameter, surface sculpturing]. *Aarbog. Danmarks Geologiske Undersoegelse (Denmark)*.

Andrič, M. (2007). Holocene vegetation development in Bela krajina (Slovenia) and the impact of first farmers on the landscape. *The Holocene*, 17(6), 763-776.

Andrieu-Ponel, V., Rochette, P., Demory, F., Alçiçek, H., Boulbes, N., Bourlès, D., ... & Alçiçek, M. C. (2021). Continuous presence of proto-cereals in Anatolia since 2.3 Ma, and their possible co-evolution with large herbivores and hominins. *Scientific reports*, 11(1), 1-11.

Andronico, D., Calderoni, G., Cioni, R., Sbrana, A., Sulpizio, R., & Santacroce, R. (1995). Geological map of Somma-Vesuvius volcano. *Periodico di Mineralogia*, 64(1-2), 77-78.

Andronico, D., Calderoni, G., Cioni, R., Donahue, D. J., Marianelli, P., Santacroce, R., ... & Sulpizio, R. (1996). An updated chronostratigraphic scheme of the last 19,000 years of Vesuvius magmatic and eruptive history. *EOS, Electronic Supplement to the Member Newspaper of the American Geophysical Union (AGU)*, 671-672.

Andronico, D., Cioni, R., & Sulpizio, R. (1995). General stratigraphy of the past 19,000 yrs at Somma-Vesuvius. In *Vesuvius Decade Volcano” Workshop Handbook*; Naples, September (pp. 17-22).

Aničić, B., Rechner, I., & Perica, D. (2004). Structural vocabulary of cultural landscape on the island of Krk. *Acta carsologica*, 33(1).

Appleby, P. G., & Oldfield, F. (1978). The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported <sup>210</sup>Pb to the sediment. *Catena*, 5(1), 1-8.

Aradhya, M. K., Dangl, G. S., Prins, B. H., Boursiquot, J. M., Walker, M. A., Meredith, C. P., & Simon, C. J. (2003). Genetic structure and differentiation in cultivated grape, *Vitis vinifera* L. *Genetics Research*, 81(3), 179-192.

Arnaud, F., Révillon, S., Debret, M., Revel, M., Chapron, E., Jacob, J., ... & Magny, M. (2012). Lake Bourget regional erosion patterns reconstruction reveals Holocene NW European Alps soil evolution and paleohydrology. *Quaternary Science Reviews*, 51, 81-92.

Arroyo-García, R., Ruiz-Garcia, L., Bolling, L., Ocete, R., López, M. A., Arnold, C., ... & Martinez-Zapater, J. M. (2006). Multiple origins of cultivated grapevine (*Vitis vinifera* L. ssp. *sativa*) based on chloroplast DNA polymorphisms. *Molecular ecology*, 15(12), 3707-3714.

Aufgebauer, A., Panagiotopoulos, K., Wagner, B., Schaebitz, F., Viehberg, F. A., Vogel, H., ... & Damaschke, M. (2012). Climate and environmental change in the Balkans over the last 17 ka recorded in sediments from Lake Prespa (Albania/FYR of Macedonia/Greece). *Quaternary International*, 274, 122-135.

Aycard, M., Derenne, S., Largeau, C., Mongenot, T., Tribovillard, N., & Baudin, F. (2003). Formation pathways of proto-kerogens in Holocene sediments of the upwelling influenced Cariaco Trench, Venezuela. *Organic geochemistry*, 34(6), 701-718.

Babić, L. (2003). The geological evolution and structure of the Island of Krk: a review. *Fossil fauna of the Island of Krk*, Natural history library, 5, 1-22.

Bailey, G., & Gamble, C. (1990). The Balkans at 18000 BP: the view from Epirus.

Balascio N, Zhang Z, Bradley R, Perren B, Dahl S, Bakke J (2011) A multi-proxy approach to assessing isolation basin stratigraphy from the Lofoten Islands, Norway. *Quat Res* 75:288–300. doi:10.1016/j.yqres.2010.08.012

Baldini, M., Matijašić, R., & Tassaux, F. (1995). Loron (Croatie): la villa maritime. *Mélanges de l'école française de Rome*, 107(1), 545-547.

Balsam, W. L., & Deaton, B. C. (1991). Sediment dispersal in the Atlantic-Ocean- evaluation by visible-light spectra. *Reviews in Aquatic Sciences*, 4(4), 411-447.

Balsam, W. L., Damuth, J. E., & Schneider, R. R. (1997). 10. Comparison of shipboard vs. shore-based spectral data from amazon fan cores: implications for interpreting sediment composition. In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* (Vol. 155, pp. 193-215).

Barbier, D., Burnouf, J., & Visset, L. (2001). Les diagrammes Société/Végétation: un outil de dialogue interdisciplinaire pour la compréhension des interactions

Homme/Milieux/Society/vegetation diagrams: a tool for interdisciplinary dialogue and understanding of human interactions with the environment. *Quaternaire*, 12(1), 103-108.

Bard, E., Jouannic, C., Hamelin, B., Pirazzoli, P., Arnold, M., Faure, G., & Sumosusastro, P. (1996). Pleistocene sea levels and tectonic uplift based on dating of corals from Sumba Island, Indonesia. *Geophysical Research Letters*, 23(12), 1473-1476.

Barranco, F. T., Balsam, W. L., & Deaton, B. C. (1989). Quantitative reassessment of brick red lutites: evidence from reflectance spectrophotometry. *Marine Geology*, 89(3), 299-314.

Bašić, F. (2013). *The soils of Croatia*. Berlin: Springer.

Batović, Š. (1977). "Caractéristiques des agglomérations fortifiées dans la région des libourniens." *Godišnjak Centra za balkanološka ispitivanja* 15: 201–225.

Batović, Š. (1979), *Jadranska zona*, in: *Praistorija Jugoslavenskih zemalja. II: Neolitsko doba*, Benac A. (ed), *Akademija nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine*, Sarajevo, 473–635.

Beckmann, M. (2004). *Pollenanalytische Untersuchung der Zeit der Jäger und-Sammler und der ersten Bauern an zwei Lokalitäten des-Zentralen Schweizer Mittellandes*.

Behre, K. E. (1981). The interpretation of anthropogenic indicators in pollen diagrams. *Pollen et spores*, 23(2), 225-245.

Behre, K. E. (1988). The role of man in European vegetation history. In *Vegetation history* (pp. 633-672). Springer, Dordrecht.

Behre, K. E. (2007). Evidence for Mesolithic agriculture in and around central Europe?. *Vegetation History and Archaeobotany*, 16(2), 203-219.

Benac, Č., Juračić, M., & Bakran-Petricioli, T. (2004). Submerged tidal notches in the Rijeka Bay NE Adriatic Sea: indicators of relative sea-level change and of recent tectonic movements. *Marine Geology*, 212(1-4), 21-33.

Benac, Č., Rubinić, J., & Ožanić, N. (2003). The origine and evolution of coastal and submarine springs in Bakar Bay. *Acta carsologica*, 32(1).

Bertagnini, A., Landi, P., Rosi, M., & Vigliargio, A. (1998). The Pomici di Base plinian eruption of Somma-Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 83(3-4), 219-239.

Bertrand, G. (2009). *De la pluie à l'eau souterraine. Apport du traçage naturel (ions majeurs, isotopes) à l'étude du fonctionnement des aquifères volcaniques. (Bassin d'Argnat, Auvergne, France) (Doctoral dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II)*.

Beug, H. J. (1961). Beiträge zur postglazialen Floren-und Vegetationsgeschichte in Süddalmatien: Der See „Malo Jezero“ auf Mljet: Teil I: Vegetationsentwicklung. *Flora oder Allgemeine Botanische Zeitung*, 150(4), 600-631.

Beug, H. J. (1967). On the forest history of the Dalmatian coast. Review of Palaeobotany and Palynology, 2(1-4), 271-279.

Beug, H. J. (1977). Vegetationsgeschichtliche Untersuchungen im Küstenbereich von Istrien (Jugoslawien). Flora, 166(4), 357-381.

Beug, H. J. (2004) Leitfaden der pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete Pfeil, München;

Bevan, A., & Conolly, J. (2013). Mediterranean islands, fragile communities and persistent landscapes: Antikythera in long-term perspective. Cambridge University Press.

Biagi, P. (2003). New data on the early neolithic of the upper adriatic region. BAR INTERNATIONAL SERIES, 1139, 337-346.

Bini, M., Zanchetta, G., Perşoiu, A., Cartier, R., Català, A., Cacho, I., ... & Brisset, E. (2019). The 4.2 ka BP Event in the Mediterranean region: an overview. Climate of the Past, 15(2), 555-577.

Biondić, B., Ivičić, D., Kapelj, S., & Mesić, S. (1995). Hydrogeology of Vrana Lake on Cres Island. In Proc. First Croatian Geological Congress (pp. 95-100).

Birch, P. S. E., & Miracle, P. T. (2017). Human response to climate change in the northern Adriatic during the Late Pleistocene and Early Holocene. In Climate Change and Human Responses (pp. 87-100). Springer, Dordrecht.

Björck, S., Håkansson, H., Olsson, S., Barnekow, L., & Janssens, J. (1993). Palaeoclimatic studies in South Shetland Islands, Antarctica, based on numerous stratigraphic variables in lake sediments. Journal of Paleolimnology, 8(3), 233-272.

Blaauw, M., & Christen, J. A. (2013). Bacon Manual v2. 3.3. Queens University Belfast.

Blečić Kavur, M., & Podrug, E. (2015). Nekropola gradine Velika Mrdakovica-grobovi starijega željeznog doba. Vjesnik za arheologiju i historiju dalmatinsku, 107(1), 31-112.

Boetto, G., & Radić Rossi, I. (2012). Šivani brod u uvali Caski na otoku Pagu: Rezultati istraživačke kampanje 2011. Histria antiqua, 21(21), 609-622.

Boetto, G., & Rossi, I. R. (2014). Au large de la Dalmatie. Nuvelles recherches d'archéologie navale. Dossiers d'Archeologie, (364), 52-55.

Boetto, G., & Rossi, I. R. (2015). Ancient ships from the bay of Caska (Island of Pag, Croatia). In 14th International Symposium on Boat and Ship Archaeology: Baltic and Beyond. Change and continuity in shipbuilding. (pp. 279-288). National Maritime Museum.

Bogunović, M., Vidaček, Ž., Racz, Z., Husnjak, S., & Sraka, M. (1996). Namjenska pedološka karta 1: 300000. Department of pedology, Faculty of Agriculture, University of Zagreb.

Bonacci, O. (1993). The vrana lake hydrology (island of cres-croatia). Jawa Journal of the American Water Resources Association, 29(3), 407-417.

Bonacci, O. (2013). Zabrinjavajući hidrološki trend u slivu Plitvičkih jezera–Dodatak. *Hrvatske vode*, 85, 243.

Bonacci, O. (2015). Karst hydrogeology/hydrology of dinaric chain and isles. *Environmental Earth Sciences*, 74(1), 37-55.

Bonacci, O. (2017). Preliminary analysis of the decrease in water level of Vrana Lake on the small carbonate island of Cres (Dinaric karst, Croatia). *Geological Society, London, Special Publications*, 466(1), 307-317.

Bonacci, O. (2018). Preliminary analysis of the decrease in water level of Vrana Lake on the small carbonate island of Cres (Dinaric karst, Croatia). *Geological Society, London, Special Publications*, 466(1), 307-317.

Bonacci, O., & Roje-Bonacci, T. (2018). Analysis of groundwater levels and Lake Vrana water levels on the Cres Island. *Hrvatske vode*, 26(103), 39-47.

Bordas, F., & Bourg, A. (1998). A critical evaluation of sample pretreatment for storage of contaminated sediments to be investigated for the potential mobility of their heavy metal load. *Water, Air, and Soil Pollution*, 103(1), 137-149.

Borić, L. (2002). Arhitektura i urbanizam grada Cresa od 1450. do 1610. godine, magistarski rad. Filozofski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.

Bortolami, G. C., Fontes, J. C., Markgraf, V., & Saliège, J. F. (1977). Land, sea and climate in the northern Adriatic region during late Pleistocene and Holocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 21(2), 139-156.

Botte, E., Bertrand, A., & Jelinčić, K. (2016). Bunje (Novo Selo, Croatie). Campagne de fouilles 2015. *Chronique des activités archéologiques de l'École française de Rome*.

Botte, E., Bertrand, A., Drpić, J., Jelinčić, K., Lemaire, B., Leys, N., ... & Cagnard, L. (2020). Bunje (Novo Selo, Croatie). *Chronique des activités archéologiques, 2019. Chronique des activités archéologiques de l'École française de Rome*.

Botte, E., Bertrand, A., Jelinčić, K., Leys, N., & Boisson, A. (2019). Bunje (Novo Selo, Croatie), campagnes 2017-2018. *Chronique des activités archéologiques de l'École française de Rome*.

Botte, E., Jelinčić, K., Bertrand, A., Drpić, J., Lemaire, B., Lattard, A., & Leys, N. (2022). Fouille archéologique de Bunje (Novo Selo, Croatie) en 2020. *Bulletin archéologique des Écoles françaises à l'étranger*.

Bourne, A. J., Lowe, J. J., Trincardi, F., Asioli, A., Blockley, S. P. E., Wulf, S., ... & Vigliotti, L. (2010). Distal tephra record for the last ca 105,000 years from core PRAD 1-2 in the central Adriatic Sea: implications for marine tephrostratigraphy. *Quaternary Science Reviews*, 29(23-24), 3079-3094.

Brabant, P. (2008). Activités humaines et dégradation des terres.

Bradshaw, R. H., Hannon, G. E., & Lister, A. M. (2003). A long-term perspective on ungulate–vegetation interactions. *Forest Ecology and Management*, 181(1-2), 267-280.

Brande, A. (1973). Untersuchungen zur postglazialen Vegetationsgeschichte im Gebiet der Neretva-Niederungen (Dalmatien, Herzegowina). *Flora*, 162(1-2), 1-44.

Bränvall, M. L., Bindler, R., Emteryd, O., & Renberg, I. (2001). Four thousand years of atmospheric lead pollution in northern Europe: a summary from Swedish lake sediments. *Journal of Paleolimnology*, 25(4), 421-435.

Brommer, M. B., Weltje, G. J., & Trincardi, F. (2009). Reconstruction of sediment supply from mass accumulation rates in the Northern Adriatic Basin (Italy) over the past 19,000 years. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 114(F2).

Brun, C. (2007). Archéophytes et néophytes. Pour une nouvelle détermination des marqueurs polliniques de l'anthropisation. Le cas des milieux cultivés et rudéraux de Franche-Comté (Doctoral dissertation, Université de Franche-Comté).

Brunović, D., Miko, S., Ilijanić, N., Peh, Z., Hasan, O., Kolar, T., ... & Razum, I. (2019). Holocene foraminiferal and geochemical records in the coastal karst dolines of Cres Island, Croatia. *Geologia Croatica*, 72(1), 19-42.

Brusić, I. (2015). Venetian Political Iconography and Architectural Decoration in Cres in the 15th Century. *Ars & Humanitas*, 9(2), 200-214.

Bukvić, I., Kerovec, M., Mihaljević, Z., & Meštrov, M. (1997). Macrozooplankton in the karstic lake Vrana (Cres). *Periodicum biologorum*, 99(3), 397-401.

Bully, S., Jurković, M., Čaušević-Bully, M., Marić, I., & Pactat, I. (2015). Le monastère Saint-Pierre d'Osor (île de Cres) : neuvième campagne d'études archéologiques. *Hortus Artium Medievalium*, 21, 356-365.

Büntgen, W., Tegel, K., Nicolussi, M., McCormick, D., Frank, V., Trouet, ... & J. Esper, (2011). « 2500 years of European climate variability and human susceptibility », *Science*, 331(6017), 578-582.

Buršić-Matijašić, K. (2007). Gradine Istre: povijest prije povijesti. ZN" Žakan Juri".

Cabanes, P. (2016). Histoire de l'Adriatique. Média Diffusion.

Calanchi, N., & Dinelli, E. (2008). Tephrostratigraphy of the last 170 ka in sedimentary successions from the Adriatic Sea. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(1), 81-95.

Calanchi, N., Cattaneo, A., Dinelli, E., Gasparotto, G., & Lucchini, F. (1998). Tephra layers in Late Quaternary sediments of the central Adriatic Sea. *Marine Geology*, 149(1-4), 191-209.



Camuffo, M., Soriani, S., & Zanetto, G. (2011). The evolution of marine protected areas (MPAs): the North Adriatic case. *Management of Environmental Quality: An International Journal*.

Cardarelli, A. (1983). "Castellieri nel Carso e nell'Istria: cronologia degli insediamenti fra media età del bronzo e prima età del ferro." In *Preistoria del Caput Adriae*, edited by A. Boiardi and G. Bartolomei, 87–112. Trieste: Istituto per l'Enciclopedia del Friuli Venezia Giulia, Udine.

Caron, B., Siani, G., Sulpizio, R., Zanchetta, G., Paterne, M., & Santacroce, R. (2009, December). Neolithic to Bronze Age Somma-Vesuvius activity improved by distal tephrostratigraphy. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2009, pp. V21E-2043).

Carre, M. B., Maggi, P., & Rouse, C. (2018). The Show must go on. *Recherches récentes sur le Parentin (Istrie, Croatie)*. Bibere, ridere, gaudere, studere, hoc est vivere. *Hommages à Francis Tassaux*, p-365.

Carrión, J. S., & Van Geel, B. (1999). Fine-resolution Upper Weichselian and Holocene palynological record from Navarrés (Valencia, Spain) and a discussion about factors of Mediterranean forest succession. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 106(3-4), 209-236.

Cattaneo, A., & Trincardi, F. (1999). The Late Quaternary transgressive record in the Adriatic epicontinental sea: basin widening and facies partitioning.

Čaušević-Bully, M. (2013). *Le nord de l'Adriatique entre l'Antiquité et l'Antiquité tardive: urbanisation, dynamique de peuplement et construction territoriale d'un espace insulaire et côtier entre le Ier et le VIe siècle: le Kvarner et ses marges (la Liburnie septentrionale)* (Doctoral dissertation, Paris Est).

Čaušević-Bully, M. (2014). *La ville de Fulfinum (Omišalj, Croatie)*. *Nouveau regard sur le devenir d'une ville antique entre l'Antiquité tardive et le haut Moyen Âge*. *Hortus Artium Medievalium*, 20(1), 157-169.

Čaušević-Bully, M., & Bully, S. (2013). *Esquisse d'un paysage monastique insulaire dans le nord de l'Adriatique : l'archipel du Kvarner (Croatie)*. *Hortus Artium Medievalium*, 19, 167-182.

Čaušević-Bully, M., & Valent, I. (2015). *Municipium Flavium Fulfinum* *Dijakronijska studija gradske strukture s posebnim osvrtom na forumski prostor*. *Prilozi Instituta za arheologiju u Zagrebu*, 32, 111-145.

Čaušević-Bully, M., Bully, S., Saggese, A., & Crochat, J. (2019). *Les sites ecclésiiaux et monastiques de l'archipel du Kvarner (Croatie), campagne 2018: Mirine-Fulfinum (Omišalj, île de Krk)*. *Chronique des activités archéologiques de l'École française de Rome*.

Čaušević-Bully, M., Massa, C., Rousseau, M., Bichet, V., Richard, H., & Novak, M. (2021). *L'homme et son environnement. L'approche interdisciplinaire sur l'évolution des territoires insulaires de l'archipel du Kvarner (Croatie)*. *Antiquité Tardive*, 29, 57-68.

Čaušević-bully, M., Novak, M., Delliste, A., Bully, S., Carić, M., « Insular Population of the Kvarner archipelago in 5th century : Mirine-Fulfinum and Martinšćica church complexes case studies », Actes du colloque international La Méditerranée occidentale au Ve siècle, MMSH-Université Aix-Marseille, Bibliothèque de l'Antiquité tardive, sous-presses

Čečuk, B., & Radić, D. (2005). Vela spila: višeslojno pretpovijesno nalazište; Vela Luka-otok Korčula. Centar za kulturu " Vela Luka".

Chapman, J. C., Shiel, R. S., & Batović, Š. (1987). Settlement patterns and land use in Neothermal Dalmatia, Yugoslavia: 1983–1984 seasons. *Journal of Field Archaeology*, 14(2), 123-146.

Chester, P. I., & Raine, J. I. (2001). Pollen and spore keys for Quaternary deposits in the northern Pindos Mountains, Greece. *Grana*, 40(6), 299-387.

Clark, J. S. (1988). Particle motion and the theory of charcoal analysis: source area, transport, deposition, and sampling. *Quaternary research*, 30(1), 67-80.

Clark, J. S., Lynch, J., Stocks, B. J., & Goldammer, J. G. (1998). Relationships between charcoal particles in air and sediments in west-central Siberia. *The Holocene*, 8(1), 19-29.

Cohen AS (2003). *Paleolimnology. The history and evolution of lake systems*. Oxford University Press, Oxford

Combourieu-Nebout, N., Peyron, O., Bout-Roumazelles, V., Goring, S., Dormoy, I., Joannin, S., ... & Magny, M. (2013). Holocene vegetation and climate changes in the central Mediterranean inferred from a high-resolution marine pollen record (Adriatic Sea). *Climate of the Past*, 9(5), 2023-2042.

Conedera, M., Krebs, P., Valese, E., Cocca, G., Schunk, C., Menzel, A., ... & Pezzatti, G. B. (2018). Characterizing alpine pyrogeography from fire statistics. *Applied geography*, 98, 87-99.

Conedera, M., Manetti, M. C., Giudici, F., & Amorini, E. (2004). Distribution and economic potential of the Sweet chestnut (*Castanea sativa* Mill.) in Europe. *Ecologia mediterranea*, 30(2), 179-193.

Conedera, M., Tinner, W., Neff, C., Meurer, M., Dickens, A. F., & Krebs, P. (2009). Reconstructing past fire regimes: methods, applications, and relevance to fire management and conservation. *Quaternary Science Reviews*, 28(5-6), 555-576.

Čoralić, L., & Novosel, F. (2014). Petar Vicko Petrina from Lošinj (1750-1829), Commander of Venetian Warships in the Late 18th Century. *Povijesni prilozi*, 33(46), 257-285.

Corella J, Brauer A, Mangili C, Rull V, Vegas-Vilarrúbia T, Morellón M, Valero-Garcés B (2012) The 1.5-ka varved record of Lake Montcortès (southern Pyrenees, NE Spain). *Quat Res* 78:323–332. doi:10.1016/j.yqres.2012.06.002

Correggiari, A., Field, M. E., & Trincardi, F. (1996). Late Quaternary transgressive large dunes on the sediment-starved Adriatic shelf. *Geological Society, London, Special Publications*, 117(1), 155-169.

Čučković, Z. (2021). La mémoire du paysage : structuration des espaces protohistoriques de l'interfluve Seine-Yonne (France) et de l'Istrie-Kvarner (Croatie) (Doctoral dissertation, Bourgogne Franche-Comté).

Cugny, C. (2011). Apports des microfossiles non-polliniques à l'histoire du pastoralisme sur le versant nord Pyrénéen: entre référentiels actuels et reconstitution du passé (Doctoral dissertation, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II).

Cugny, C., Mazier, F., & Galop, D. (2010). Modern and fossil non-pollen palynomorphs from the Basque mountains (western Pyrenees, France): the use of coprophilous fungi to reconstruct pastoral activity. *Vegetation history and Archaeobotany*, 19(5-6), 391-408.

Das, B., Vinebrooke, R. D., Sanchez-Azofeifa, A., Rivard, B., & Wolfe, A. P. (2005). Inferring sedimentary chlorophyll concentrations with reflectance spectroscopy: a novel approach to reconstructing historical changes in the trophic status of mountain lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 62(5), 1067-1078.

David, M., Follain, S., Ciampalini, R., Le Bissonnais, Y., Couturier, A., & Walter, C. (2014). Simulation of medium-term soil redistributions for different land use and landscape design scenarios within a vineyard landscape in Mediterranean France. *Geomorphology*, 214, 10-21.

Davies, S. J., Lamb, H. F., & Roberts, S. J. (2015). Micro-XRF core scanning in palaeolimnology: recent developments. *Micro-XRF studies of sediment cores*, 189-226.

Davies, T. D. (1980). Peat formation in Florida Bay and its significance in interpreting the recent vegetational and geological history of the bay area. The Pennsylvania State University.

Davis, O. K., & Shafer, D. S. (2006). *Sporormiella* fungal spores, a palynological means of detecting herbivore density. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 237(1), 40-50.

De Boer EJ, Tjallingii R, Velez MI, Rijdsdijk KF, Vlug A, Reichert GJ, Prendergast AL, de Louw PGB, Florens FBV, Baider C, Hooghiemstra H (2014) Climate variability in the SW Indian ocean from an 8000-yr multi-proxy record in the Mauritian lowlands shows a middle to late Holocene shift from negative IOD-state to ENSO-state. *Quat Sci Rev* 86:175–189. doi:10.1016/j.quascirev.2013.12.026

De Lecea, A. M., Smit, A. J., & Fennessy, S. T. (2011). The effects of freeze/thaw periods and drying methods on isotopic and elemental carbon and nitrogen in marine organisms, raising questions on sample preparation. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 25(23), 3640-3649.

De Vita, S., Orsi, G., Civetta, L., Carandente, A., D'Antonio, M., Deino, A., ... & Southon, J. (1999). The Agnano–Monte Spina eruption (4100 years BP) in the restless Campi Flegrei caldera (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 91(2-4), 269-301.

De Vito, B., Rolandi, G., Gans, P. B., Calvert, A., Bohrson, W. A., Spera, F. J., & Belkin, H. E. (2001). New constraints on the pyroclastic eruptive history of the Campanian volcanic Plain (Italy). *Mineralogy and Petrology*, 73(1), 47-65.

Dean Jr, W. E. (1974). Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Research*, 44(1).

Deaton, B. C. (1987). Quantification of rock color from Munsell chips. *Journal of Sedimentary Research*, 57(4).

Deaton, B. C., & Balsam, W. L. (1991). Visible Spectroscopy--A Rapid Method for Determining Hematite and Goethite Concentration in Geological Materials: Research method paper. *Journal of Sedimentary Research*, 61(4).

Debret, M., Bentaleb, I., Sebag, D., Favier, C., Nguetsop, V., Fontugne, M., ... & Ngomanda, A. (2014). Influence of inherited paleotopography and water level rise on the sedimentary infill of Lake Ossa (S Cameroon) inferred by continuous color and bulk organic matter analyses. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 411, 110-121.

Debret, M., Sebag, D., Desmet, M., Balsam, W., Copard, Y., Mourier, B., ... & Winiarski, T. (2011). Spectrocolorimetric interpretation of sedimentary dynamics: The new “Q7/4 diagram”. *Earth-Science Reviews*, 109(1-2), 1-19.

Demske, D., Tarasov, P. E., & Nakagawa, T. (2013). Atlas of pollen, spores and further non-pollen palynomorphs recorded in the glacial-interglacial late Quaternary sediments of Lake Suigetsu, central Japan. *Quaternary International*, 290, 164-238.

Di Vito, M. A., Isaia, R., Orsi, G., Southon, J. D., De Vita, S., d'Antonio, M., ... & Piochi, M. (1999). Volcanism and deformation since 12,000 years at the Campi Flegrei caldera (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 91(2-4), 221-246.

Dinelli, E., La Terza, V., & Sarti, G. (2008). Geochemical analysis of the upper shoreface sediments between Livorno and the Serchio River (Tuscany): a focus on heavy metals. In *GEOSSED 2008* (pp. 53-53). *GEOSSED*.

Enevold, R., Flintoft, P., Tjelliden, A. K., & Kristiansen, S. M. (2019). Vacuum freeze-drying of sediment cores: an optimised method for preserving archaeostratigraphic archives. *Antiquity*, 93(370).

Erny-rodmann, C., Gross-klee, E., Haas, J. N., Jacomet, S., & Zoller, H. (1997). Früher «human impact» und Ackerbau im Übergangsbereich Spätmesolithikum-Frühneolithikum im schweizerischen Mittelland. *Jahrbuch der Schweizerischen Gesellschaft für Ur-und Frühgeschichte*, 80, 27-56.

Errera, M. (2004). Découverte du premier gisement de jade-jadéite dans les Alpes (été 2004) Implications concernant plusieurs lames de hache néolithiques trouvées en Belgique et dans les régions limitrophes. *Notae praehistoricae*, 24, 191-202.

Essert, S., Koncani-Uhač, I., Uhač, M., & Šoštarić, R. (2018). Plant remains and amphorae from the Roman harbour under Flacius Street in Pula (Istria, Croatia). *Archaeological and Anthropological Sciences*, 10(4), 955-971.

Etienne, D., Wilhelm, B., Sabatier, P., Reyss, J. L., & Arnaud, F. (2013). Influence of sample location and livestock numbers on *Sporormiella* concentrations and accumulation rates in surface sediments of Lake Allos, French Alps. *Journal of Paleolimnology*, 49(2), 117-127.

Fairbanks, R. G. (1989). A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, 342(6250), 637-642.

Fairbridge, R. W. (1961). Eustatic changes in sea level. *Physics and Chemistry of the Earth*, 4, 99-185.

Faivre, S., Bakran-Petricioli, T., Barešić, J., Horvatić, D., & Macario, K. (2019). Relative sea-level change and climate change in the Northeastern Adriatic during the last 1.5 ka (Istria, Croatia). *Quaternary Science Reviews*, 222, 105909.

Faivre, S., Fouache, E., Kovačić, V., & Glušćević, S. (2010). Geomorphological and archaeological indicators of Croatian shoreline evolution over the last two thousand years. *GeoActa, Special Publication*, 3, 125-133.

Faivre, T., Bakran-Petricioli, J., Barešić, D., Horvatić, K., Macario, K. (2019). « Relative sea-level change and climate change in the Northeastern Adriatic during the last 1.5 ka (Istria, Croatia) », *Quaternary Science Reviews*, 222, 105909.

Falkenstein, F. (2013). The Early Holocene Occupation Of Caves In The Balkans. *transition*, 182(185), 76.

Fauquette, S., Suc, J. P., Guiot, J., Diniz, F., Feddi, N., Zheng, Z., ... & Drivaliari, A. (1999). Climate and biomes in the West Mediterranean area during the Pliocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 152(1-2), 15-36.

Fedotov A, Phedorin M, Enushchenko I, Vershinin K, Melgunov M, Khodzher T (2012) A reconstruction of the thawing of the permafrost during the last 170 years on the Taimyr Peninsula (East Siberia, Russia). *Glob Planet Change* 98–99:139–152. doi:10.1016/j.gloplacha.2012.09.002

Filipčić, A. (2000). Razgraničenje Köppenovih klimatskih tipova Cf i Cs u Hrvatskoj. *Acta Geographica Croatica*, 35(1.), 7-17.

Forenbaher, S. and Kaiser, T. (2005). Pottery of Pupićina Cave - Lončarija Pupićine peći. Dans P. T. Miracle et S. Forenbaher (eds.), *Prehistoric Herders of Northern Istria. The Archaeology of Pupićina Cave (vol. 1) - Pretpovijesni stočari sjeverne Istre. Arheologija Pupićine peći (sv. 1)*. Pula: Arheološki muzej Istre, Monografije i katalogi 14, 163-223.

Forenbaher, S., & Miracle, P. T. (2005). The spread of farming in the Eastern Adriatic. *antiquity*, 79(305), 514-528.

Forenbaher, S., & Miracle, P. T. (2006). The spread of farming in the Eastern Adriatic. *Documenta praehistorica*, 33, 89-100.

Forenbaher, S., Kaiser, T., & Miracle, P. T. (2013). Dating the East Adriatic Neolithic. *European Journal of Archaeology*, 16(4), 589-609.

Forni, G. (2012). The origin of " Old World" viticulture. *Vitis*, 51, 27-38.

Fouache, F., & Dalongeville, R. (2003). Recent relative variations in the shorelines: a contrastive approach of the shores of Croatia and southern Turkey. In *The Mediterranean World: Environment and History* (pp. 467-478). Elsevier.

Fruyer, D. W., Mann A. and Monge J. 2007: New Perspectives on the Krapina Neandertals. *Hrvatski prirodoslovni muzej, Zagreb*.

Fredskild, B. (1983). The Holocene development of some low and high arctic Greenland lakes. In *Paleolimnology* (pp. 217-224). Springer, Dordrecht.

Gaastra, J. S., Cristiani, E., & Barbarić, V. (2014). Herding and Hillforts in the Bronze and Iron Age Eastern Adriatic: Results of the 2007-2010 Excavations at Gradina Rat. *Vjesnik za Arheologiju i Povijest Dalmatinsku*, 107.

Galle, O. K., & Runnels, R. T. (1960). Determination of CO<sub>2</sub> in carbonate rocks by controlled loss on ignition. *Journal of Sedimentary Research*, 30(4).

Galop, D., Mazier, F., Lopez-Saez, J. A., & Vanniere, B. (2003). Palynologie et histoire des activités humaines en milieu montagnard. Bilan provisoire des recherches et nouvelles orientations méthodologiques sur le versant nord des Pyrénées. *Archéologie du midi médiéval*, (21), 159-170.

Gambolati, G., & Teatini, P. (1998). Numerical analysis of land subsidence due to natural compaction of the Upper Adriatic Sea basin. In *CENAS* (pp. 103-131). Springer, Dordrecht.

Gams, I. (1991). The Republic of Slovenia—Geographical constants of the new Central-European state. *GeoJournal*, 24(4), 331-340.

Garneau, M. (1987). Reconstitution paléoécologique d'une tourbière littorale de l'estuaire du Saint-Laurent: analyse macrofossile et sporopollinique. *Géographie physique et Quaternaire*, 41(1), 109-125.

Gauthier E., 2001, Evolution de l'impact de l'Homme sur la végétation du Massif jurassien au cours des quatre derniers millénaires. *Nouvelles données palynologiques*, Thèse, Université de Franche-Comté, 250 p.

Gauthier, E. (2012). Pollen et Microfossiles: des crêts du Jura aux fjords du Groenland. Habilitation à Diriger des Recherches. Université de Franche-Comté, France.

Gauthier, E., & Jouffroy-Bapicot, I. (2021). Detecting human impacts: non-pollen palynomorphs as proxies for human impact on the environment. *Geological Society, London, Special Publications*, 511(1), 233-244.

Gauthier, E., Laine, A., & Richard, H. (2011). L'époque gallo-romaine des plaines de Saône aux plateaux jurassiens.

Gelorini, V., Verbeke, A., van Geel, B., Cocquyt, C., & Verschuren, D. (2011). Modern non-pollen palynomorphs from East African lake sediments. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 164(3-4), 143-173.

Geyh, M. A., Schotterer, U., & Grosjean, M. (1997). Temporal changes of the 14C reservoir effect in lakes. *Radiocarbon*, 40(2), 921-931.

Gismondi, A., Di Marco, G., Martini, F., Sarti, L., Crespan, M., Martínez-Labarga, C., ... & Canini, A. (2016). Grapevine carpological remains revealed the existence of a Neolithic domesticated *Vitis vinifera* L. specimen containing ancient DNA partially preserved in modern ecotypes. *Journal of Archaeological Science*, 69, 75-84.

Glušćević, S., Jurišić, M., Šoštarić, R., & Vujčić Karlo, S. (2006). Evidence for the Nutrition of Sailors from the Roman Harbour at Zaton near Zadar. *Archaeologia maritima mediterranea*, 3, 147-161.

Goldberg, E. D. (1963). Geochronology with 210 Pb. *Radioactive dating*, 121-131.

Goldstein, I., "Funkcija Jadrana u ratu Bizantskog carstva protiv Ostrogota 535-555. godine", *Radovi-Zavod za hrvatsku povijest*, 37, Zagreb, 2005, p. 23-34.

Grimm, E. C. (1991). *Tilia and tiliagraph*. Illinois State Museum, Springfield, 101.

Gunasekaran, S., & Anbalagan, G. (2007). Thermal decomposition of natural dolomite. *Bulletin of Materials Science*, 30(4), 339-344.

Haas, J. N. (1996). Pollen and plant macrofossil evidence of vegetation change-at Wallisellen-Langachermoos (Switzerland)-during the Mesolithic-Neolithic transition-8500 to 6500 years ago.

Habdija, I., Primc-Habdija, B., Špoljar, M., & Perić, M. S. (2011). Ecological determinants of rotifer vertical distribution in a coastal karst lake (Vrana Lake, Cres Island, Croatia). *Biologia*, 66(1), 130-137.

Harfouche, R. (2005). Retenir et cultiver le sol sur la longue durée: les terrasses de culture et la place du bétail dans la montagne méditerranéenne. *Anthropozoologica*, (40 (1)), 45-80.

Harwart, S., Hagedorn, B., Melles, M., & Wand, U. (1999). Lithological and biochemical properties in sediments of Lama Lake as indicators for the late Pleistocene and

Holocene ecosystem development of the southern Taymyr Peninsula, Central Siberia. *Boreas*, 28(1), 167-180.

Heiri, O., & Lotter, A. F. (2001). Effect of low count sums on quantitative environmental reconstructions: an example using subfossil chironomids. *Journal of Paleolimnology*, 26(3), 343-350.

Herak, D., Herak, M., Prelogović, E., Markušić, S., & Markulin, Ž. (2005). Jabuka island (central Adriatic Sea) earthquakes of 2003. *Tectonophysics*, 398(3-4), 167-180.

Hertelendi, E., Svingor, É., Futó, I., Szántó, Z., & Rank, D. (1997). Isotope investigation of Lake Vrana and springs in the Kvarner Area. *Rapid communications in mass spectrometry*, 11(6), 651-655.

Hjorth, T. (2004). Effects of freeze-drying on partitioning patterns of major elements and trace metals in lake sediments. *Analytica Chimica Acta*, 526(1), 95-102.

Hojdová, M., Rohovec, J., Chrastný, V., Penížek, V., & Navrátil, T. (2015). The influence of sample drying procedures on mercury concentrations analyzed in soils. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 94(5), 570-576.

Horvatić, S. (1957). Biljnogeografsko raščlanjenje krša. *Krš Jugoslavije*, 5, 35-65.

Horvatinčić, N., Sironić, A., Barešić, J., Bronić, I. K., Nikolov, J., Todorović, N., ... & Krmar, M. (2014). Isotope analyses of the lake sediments in the Plitvice Lakes, Croatia. *Central European Journal of Physics*, 12(10), 707-713.

Ilijanić, N. (2014). Clay minerals in Lake Sediments along the Eastern Adriatic Coast as Proxies of Environmental Changes during Late Pleistocene and Holocene (Doctoral dissertation, University of Zagreb).

Ilkić, M., & Šešelj, L. (2017). Recent finds of Graeco-Illyrian coins from northern Dalmatia. *Vjesnik za arheologiju i historiju dalmatinsku*, 110(1), 281-302.

Jacob, J., Simonneau, A., Bajard, M., Messenger, E., Billaud, Y., Le Milbeau, C., ... & Magny, M. (2021). Diffusion et dynamique de la culture du millet dans les Alpes ouest-européennes sur la base des concentrations en miliacine dans les sédiments lacustres.

Jahns, S., & van den Bogaard, C. (1998). New palynological and tephrostratigraphical investigations of two salt lagoons on the island of Mljet, south Dalmatia, Croatia. *Vegetation History and Archaeobotany*, 7(4), 219-234.

Janković, I., Karavanić, I., Ahern, J., Brajković, D., Lenardić, J. M., & Smith, F. H. (2011). Archaeological, paleontological and genomic perspectives on late European Neandertals at Vindija cave, Croatia. In *Continuity and Discontinuity in the Peopling of Europe* (pp. 299-313). Springer, Dordrecht.

Jeličić-Radonić, J. (2001). Rimsko naselje u Ublima na Lastovu. *Arheološka istraživanja na području otoka Korčule i Lastova*. Zagreb: Hrvatsko Arheološko Društvo, 197-220.



Jenny, J. P. (2013). Réponses des grands lacs périalpins aux pressions anthropiques et climatiques récentes: reconstitutions spatio-temporelles à partir d'archives sédimentaires (Doctoral dissertation, Grenoble).

Jeunesse, C. (2000). Les composantes autochtone et danubienne en Europe centrale et occidentale entre 5500 et 4000 av. J.-C.: contacts, transferts, acculturations. In *Les derniers chasseurs-cueilleurs d'Europe occidentale, Actes du colloque international de Besançon, octobre 1998* (pp. 361-378).

Jones, M., Hunt, H., Lightfoot, E., Lister, D., Liu, X., & Motuzaitė-Matuzevičiūtė, G. (2011). Food globalization in prehistory. *World Archaeology*, 43(4), 665-675.

Joron, J. L., Metrich, N., Rosi, M., Santacroce, R., & Sbrana, A. (1987). Chemistry and petrography.

Jouffroy-Bapicot, I. (2010). Évolution de la végétation du massif du Morvan (Bourgogne-France) depuis la dernière glaciation à partir de l'analyse pollinique. Variations climatiques et impact des activités anthropiques (Doctoral dissertation, Université de Franche-Comté).

Jouffroy-Bapicot, I., Vannièrè, B., Iglesias, V., Debret, M., & Delarras, J. F. (2016). 2000 years of grazing history and the making of the Cretan mountain landscape, Greece. *PloS one*, 11(6), e0156875.

Jurić, I., Bogunović, M., Đikić, M., & Balen, J. (2001). Merkmale der landwirtschaftlichen Erzeugung in den Siedlungen der Starčevo-Kultur im Gebiet zwischen dem heutigen Vinkovci und Slavonski Brod, Kroatien. *Društvena istraživanja: časopis za opća društvena pitanja*, 10(6 (56)), 1131-1158.

Jurković, M. (2019). » The Transformation of the Adriatic Islands from Antiquity to the Early Middle Ages «, u. *Change and Resilience: The Occupation of Mediterranean Islands in Late Antiquity*, 9, 111.

Jurković, M., Brogiolo, G. P., Turković, T., Chavarria Arnau, A., Marić, I. (2012). Kaštelina na otoku Rabu: od rimske vile do ranobizantske utvrde, *Rapski zbornik*, II, 1–14.

Kačar, S. (2020). Evidence of Absence or Absence of Evidence? Searching for Late Mesolithic (Castelnovian) Hunter-Gatherers in the Eastern Adriatic. *Journal of Mediterranean Archaeology*, 33(2).

Kačar, S. (2021). The Neolithisation of the Adriatic: Contrasting Regional Patterns and Interactions Along and Across the Shores. *Open Archaeology*, 7(1), 798-814.

Kale, J. (2016). Historical Landscape of Lun Olive Trees at Pag Island, Croatia. In *Biocultural Diversity in Europe* (pp. 181-191). Springer, Cham.

Kalugin I, Darin A, Rogozin D, Tretyakov G (2013) Seasonal and centennial cycles of carbonate mineralisation during the past 2500 years from varved sediment in Lake Shira, South Siberia. *Quat Int* 290–291:245–252. doi:10.1016/j.quaint.2012.09.016

Kalugin I, Daryin A, Smolyaninova L, Andreev A, Diekmann B, Khlystov O (2007) 800-yr-long records of annual air temperature and precipitation over southern Siberia inferred from Teletskoye Lake sediments. *Quat Res* 67:400–410. doi:10.1016/j.yqres.2007.01.007

Kaniewski, D., Marriner, N., Morhange, C., Faivre, S., Otto, T., & Van Campo, E. (2016). Solar pacing of storm surges, coastal flooding and agricultural losses in the Central Mediterranean. *Scientific reports*, 6(1), 1-12.

Kaniewski, D., Marriner, N., Morhange, C., Rius, D., Carre, M. B., Faivre, S., & Van Campo, E. (2018). Croatia's mid-Late Holocene (5200-3200 BP) coastal vegetation shaped by human societies. *Quaternary Science Reviews*, 200, 334-350.

Kaniewski, E. Van Campo, T. Boiy, J.F. Terral, B. Khadari, G. Besnard, (2012). « Primary domestication and early uses of the emblematic olive tree: palaeobotanical, historical and molecular evidence from the Middle East », *Biological Reviews*, 87(4), 885-899.

Karavanić, I. (2003). L'industrie aurignacienne de la grotte de Šandalja II (Istrie, Croatie) dans le contexte de la région de l'est de l'Adriatique. *L'anthropologie*, 107(5), 577-602.

Karavanić, I. (2007). Le moustérien en Croatie. *L'Anthropologie*, 111(3), 321-345.

Katalinić, A., Čuže-Denona, M., & Rubinić, J. (2013). Critical situations and water management issues in vransko lake nature park. *waters in sensitive & protected areas*, 154.

Katalinic, A., Rubinic, J., & Buselic, G. (2008). Hydrology of two coastal karst cryptodepressions in Croatia: Vrana lake vs Vrana lake. In *Proceedings of Taal2007: The 12th World Lake Conference* (Vol. 732, p. 743).

Katić, M. (2007). Zaštitna arheološka istraživanja na Jadranskoj autocesti (Protection excavations at the Adriatic Highway). In V. Kusin (ed.), *Dalmatinska zagora – nepoznata zemlja: Galerija Klovićevi Dvori*, Zagreb, 4. rujna–21. listopada 2007 (pp. 619–621). Zagreb: Republika Hrvatska, Ministarstvo Kulture, Galerija Klovićevi Dvori (in Croatian)

Katić, M. (2018). Castella qui sunt super civitatem Salonitanam. *Vjesnik za arheologiju i historiju dalmatinsku*, 111(1), 245-279.

Kavur, M. B., Gaspari, A., Dizdar, D. L., Majnarić-Pandžić, N., & Teržan, B. (2014). Na razmeđu svjetova za prijelaza milenija: kasno brončano doba na Kvarneru. *Arheološki muzej*.

Kempton, H., & Frenzel, B. (2007). The geochemistry of ombrotrophic Sphagnum species growing in different microhabitats of eight German and Belgian peat bogs and the regional atmospheric deposition. *Water, air, and soil pollution*, 184(1), 29-48.

Kieffer, G. (1979). L'activité de l'Etna pendant les derniers 20000 ans.

Kim, M. S., Lee, W. S., Suresh Kumar, K., Shin, K. H., Robarge, W., Kim, M., & Lee, S. R. (2016). Effects of HCl pretreatment, drying, and storage on the stable isotope ratios of soil and sediment samples. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 30(13), 1567-1575.

Kirigin, B. (2006). *PHAROS: The Parian Settlement in Dalmatia: A study of a Greek colony in the Adriatic*. BAR Publishing.

Köhler, E., & Lange, E. (1979). A contribution to distinguishing cereal from wild grass pollen grains by LM and SEM. *Grana*, 18(3), 133-140.

Komárek, J., & Jankovská, V. (2001). Review of the green algal genus *Pediastrum*. *J. Cramer*.

Kopáčková, J. (2020). Local production of olive oil and wine in roman dalmatia (1st–7th century ad)—an overview of the current state of research.

Korbar, T. (2009). Orogenic evolution of the External Dinarides in the NE Adriatic region: a model constrained by tectonostratigraphy of Upper Cretaceous to Paleogene carbonates. *Earth-Science Reviews*, 96(4), 296-312.

Krajačić, M. (2009). *Biljni makrofosili iz antičke luke u Zatonu kraj Nina* (Doctoral dissertation, University of Zagreb. Faculty of Science. Department of Biology).

Kranjc, A. (1979). The influence of man on cave sedimentation.

Kranjc, A. (1981). *Poplavni svet na Kocevskem polju*.

Kranjc, A. (2009). History of deforestation and reforestation in the Dinaric Karst. *Geographical Research*, 47(1), 15-23.

Kremenić, T., Andlar, G., & Varotto, M. (2021). How Did Sheep Save the Day? The Role of Dry Stone Wall Heritage and Agropastorality in Historical Landscape Preservation. A Case-Study of the Town of Cres Olive Grove. *Land*, 10(9), 978.

Krishnaswamy, S., Lal, D., Martin, J. M., & Meybeck, M. (1971). Geochronology of lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 11(1-5), 407-414.

Kubo, Y. S., Syvitski, J. P., Hutton, E. W., & Kettner, A. J. (2006). Inverse modeling of post Last Glacial Maximum transgressive sedimentation using 2D-SedFlux: application to the northern Adriatic Sea. *Marine Geology*, 234(1-4), 233-243.

Kuhta, M., & Zeljka, B. (2013). Seasonal temperature variations of Lake Vrana on the Island of Cres and possible influence of global climate changes. *Journal of Earth Science and Engineering*, 3(4), 225.

Kylander M, Ampel L, Wohlfarth B, Veres D (2011) High-resolution X-ray fluorescence core scanning analysis of Les Echets (France) sedimentary sequence: new insights from chemical proxies. *J Quat Sci* 26:109–117. doi:10.1002/jqs.1438.

Lane, C. S., Blockley, S. P. E., Lotter, A. F., Finsinger, W., Filippi, M. L., & Matthews, I. P. (2012). A regional tephrostratigraphic framework for central and southern European climate archives during the Last Glacial to Interglacial transition: comparisons north and south of the Alps. *Quaternary Science Reviews*, 36, 50-58.

Lebreton, V., Jaouadi, S., Mulazzani, S., Boujelben, A., Belhouchet, L., Gammar, A. M., ... & Fouache, E. (2015). Early oleiculture or native wild *Olea* in eastern Maghreb: new pollen data from the sebkha-lagoon Halk el Menjel (Hergla, Central Tunisia). *Environmental Archaeology*, 20(3), 265-273.

Lightfoot, E., Boneva, B., Miracle, P. T., Šlaus, M., & O'connell, T. C. (2011). Exploring the Mesolithic and Neolithic transition in Croatia through isotopic investigations. *Antiquity*, 85(327), 73-86.

Lirer, L., & Munno, R. (1975). Il tufo giallo napoletano (Campi Flegrei). *Period Mineral*, 44, 103-118.

Lončarić, R., Magaš, D., & Surić, M. (2011). The influence of water availability on the historical, demographic and economic development of the Kvarner islands (Croatia). *Series Historia et Sociologia*, 21(2), 425-436.

Long, C. J., Whitlock, C., Bartlein, P. J., & Millspaugh, S. H. (1998). A 9000-year fire history from the Oregon Coast Range, based on a high-resolution charcoal study. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(5), 774-787.

Longman, J., Palmer, M. R., Gernon, T. M., & Manners, H. R. (2019). The role of tephra in enhancing organic carbon preservation in marine sediments. *Earth-science reviews*, 192, 480-490.

Lotter, A. F. (1999). Late-glacial and Holocene vegetation history and dynamics as shown by pollen and plant macrofossil analyses in annually laminated sediments from Soppensee, central Switzerland. *Vegetation History and Archaeobotany*, 8(3), 165-184.

Lowe, J. J., Blockley, S., Trincardi, F., Asioli, A., Cattaneo, A., Matthews, I. P., ... & Wulf, S. (2007). Age modelling of late Quaternary marine sequences in the Adriatic: towards improved precision and accuracy using volcanic event stratigraphy. *Continental Shelf Research*, 27(3-4), 560-582.

Lu, C., Ma, J., Chen, X., Zhang, X., Shi, Y., & Huang, B. (2010). Effect of nitrogen fertilizer and maize straw incorporation on  $\text{NH}_4^+$  15n and  $\text{NO}_3^-$  15n accumulation in black soil of northeast china among three consecutive cropping cycles. *Journal of soil science and plant nutrition*, 10(4), 444-453.

MacDonald, G. M., Larsen, C. P., Szeicz, J. M., & Moser, K. A. (1991). The reconstruction of boreal forest fire history from lake sediments: a comparison of charcoal, pollen, sedimentological, and geochemical indices. *Quaternary Science Reviews*, 10(1), 53-71.

Machut, P., & Marion, Y. (2020). *Adriatlas 3. Conclusions et perspectives* [Ausonius éd., UBM].

Magaš, D., Faričić, J., & Lončarić, R. (2006). Geografske osnove društveno-gospodarske revitalizacije Unija. *Geoadria*, 11(2), 173-239.

Magny, M., de Beaulieu, J. L., Drescher-Schneider, R., Vannièrè, B., Walter-Simonnet, A. V., Miras, Y., ... & Leroux, A. (2007). Holocene climate changes in the central Mediterranean as recorded by lake-level fluctuations at Lake Accesa (Tuscany, Italy). *Quaternary Science Reviews*, 26(13-14), 1736-1758.

Magri, D., & Sadori, L. (1999). Late Pleistocene and Holocene pollen stratigraphy at Lago di Vico, central Italy. *Vegetation history and archaeobotany*, 8(4), 247-260.

Malez, M., (1974), Noviji rezultati istraživanja paleolitika u Velikoj pecini, Veternici i Sandalji (with German summary). *Arheološki Radovi i Rasprave Jugoslavenske Akademije Znanosti i Umjetnosti*. 7:7-44. Zagreb.

Malez, M., (1975), Die Hohle Vindija: Eine neue Fundstelle fossiler Hominiden in Kroatien. *Bulletin Scientifique du Conseil des Academies des Sciences et des Arts de la RSF Yougoslavie, Section A*, 20(5-6): 139-41. Zagreb.

Mamužić, P., Milan, A., Korolija, B., Borović, I., Majcen, Ž., (1969). Osnovna geološka karta SFRJ, list Rab 1:100 000, L 33-114 (Basic Geological Map of SFRY: Sheet Rab, scale 1:100 000, K 33-114). *Inst. geol. istraž. Zagreb, 1959–1965., Sav. geol. zavod Beograd*, 1 sheet.

Marchesetti, C. (1903). "I castellieri preistorici di Trieste e della regione Giulia." *Atti del Museo Civico di Storia Naturale di Trieste X IV*: 1–206.

Marchesetti, C. (1924). "Isole del Quarnero: ricerche paleontologiche." *Notizie degli scavi di antichità* 21 (5): 121– 148.

Marchini, G., Zanchetta, G., Santacroce, R., Vigliotti, L., Capotondi, L., & Sulpizio, R. (2014). Tephrostratigraphy of marine core AD91-17 (Adriatic sea) revised. *Alpine and Mediterranean Quaternary*, 27(2), 77-84.

Margari, V., Pyle, D. M., Bryant, C., & Gibbard, P. L. (2007). Mediterranean tephra stratigraphy revisited: results from a long terrestrial sequence on Lesvos Island, Greece. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 163(1-4), 34-54.

Marvelli, S., De'Siena, S., Rizzoli, E., & Marchesini, M. (2013). The origin of grapevine cultivation in Italy: the archaeobotanical evidence. *Annali di Botanica*, 3, 155-163.

Mavrović, N., (1994). *Cres und Lošinj*. Art Studio Azinović d.o.o. (Ed. Azinović, M.): 178 pp.

McClymont, E. L., Martínez-García, A., & Rosell-Melé, A. (2007). Benefits of freeze-drying sediments for the analysis of total chlorins and alkenone concentrations in marine sediments. *Organic Geochemistry*, 38(6), 1002-1007.

McGovern, P. E., Glusker, D. L., Exner, L. J., & Voigt, M. M. (1996). Neolithic resinated wine. *Nature*, 381(6582), 480-481.

McGovern, P. E., Zhang, J., Tang, J., Zhang, Z., Hall, G. R., Moreau, R. A., ... & Wang, C. (2004). Fermented beverages of pre-and proto-historic China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(51), 17593-17598.

Mensing, S. A., Michaelsen, J., & Byrne, R. (1999). A 560-year record of Santa Ana fires reconstructed from charcoal deposited in the Santa Barbara Basin, California. *Quaternary Research*, 51(3), 295-305.

Mercuri, A.M., Mazzanti, M.B., Florenzano, A., Montecchi, M.C., Rattighieri, E. (2013). « Olea, Juglans and Castanea: the OJC group as pollen evidence of the development of human-induced environments in the Italian peninsula », *Quaternary International*, 303, 24-42.

Metcalf SE, Jones MD, Davies SJ, Noren A, MacKenzie A (2010) Climate variability over the last two millennia in the North American Monsoon region, recorded in laminated lake sediments from Laguna de Juanacatlan, Mexico. *Holocene* 20:1195–1206. doi:10.1177/0959683610371994.

Meyers, P. A., & Teranes, J. L. (2001). Tracking environmental change using lake sediments. *Tracking environmental change using lake sediments*, 2, 239-270.

Miko, S. L. O. B. O. D. A. N., Mesic, S., Sparica-Miko, M., & Prohic, E. (2005). Isotopic trends and enrichment of atmospheric lead during the past two millennia in Lake Vrana on Cres Island (Croatia). *Materials and geoenvironment*, 52(1), 95.

Miko, S., Mesić, S., Miko, M. Š., & Hasan, O. (2008). A record of anthropogenic Pb deposition in a Mediterranean karst catchment (Lake Vrana, Cres Island, Croatia). *Mineralogical Magazine*, 72(1), 455-460.

Miracle, P. (2001). Feast or famine? Epipalaeolithic subsistence in the northern Adriatic basin. *Documenta Praehistorica*, 28, 177-197.

Miracle, P. (2002). Mesolithic meals from Mesolithic middens. *Consuming passions and patterns of consumption*, 65-88.

Miracle, P. T. (2005). Excavations at Pupicina cave: preliminary Results of the 1999, 2001 and 2002 field seasons. *Histria archaeologica*, 34, 5-37.

Miracle, P., Galanidou, N., & Forenbaher, S. (2000). Pioneers in the hills: early Mesolithic foragers at Šebrić Abri (Istria, Croatia). *European Journal of Archaeology*, 3(3), 293-329.

Mirosavljević, V. (1959), *Jamina Sredi*, prilog prehistorijskoj kulturi na oto- ku Cresu, *Arheološki radovi i rasprave*, Vol. 1, 131–174.

Mirosavljević, V. (1962), *Impresso-cardium keramika na otocima Cresa, Lošinja i Krka*, *Arheološki radovi i rasprave*, Vol. 2, 175–211.

Mirosavljević, V. (1968), *Vela spilja*, prehistorijsko nalazište na otoku Lošinj, *Arheološki radovi i rasprave*, Vol. 6, 27–60.

Mirosavljević, V. (1971), Jamina Sredi dans l'île de Cres, in: Epoque préhistorique et protohistorique en Yougoslavie: Recherches et résultats, Comité national d'organisation du VIII Congrès international des sciences préhistoriques et protohistoriques, Novak G. (ed.), Société archéologique de Yougoslavie, beograd, 102–105.

Mischke, S., Weynell, M., Zhang, C., & Wiechert, U. (2013). Spatial variability of 14C reservoir effects in Tibetan Plateau lakes. *Quaternary International*, 313, 147-155.

Moore, P. D., Collinson, M. E., & Webb, J. A. (1991). Pollen analysis (No. 56.012 MOO).

Mörner, N. A. (1969). The Late Quaternary history of the Kattegatt Sea and the Swedish West Coast: deglaciation, shorelevel displacement, chronology, isostasy and eustasy (Doctoral dissertation, Stockholm University).

Müller, J. (1994), Das ostadriatische Frühneolithikum. Die Impresso-Kultur und die Neolithisierung des Adriaumes, *Prähistorische Archäologie in Südosteuropa* 9, Wissenschaftsverlag Volker Spiess, berlin.

Murgia, L. (2011). Contribution à l'étude des premiers indices polliniques d'anthropisation à l'aube du Néolithique dans l'Est de la France et ses régions limitrophes: analyse au lac Saint-Point (Doubs) (Doctoral dissertation).

Murgia, L. (2016). Mémoire des lacs et mémoire des sociétés du Moyen Âge à nos jours: approche palynologique et historique de la moyenne montagne jurassienne et alpine (lac de Remoray, Doubs; glissement de Mont Granier, Savoie) (Doctoral dissertation, Université de Franche-Comté).

Mussi, M. (2001) – Earliest Italy. An overview of the Italian Paleolithic and Mesolithic. New York: Kluwer Academic.

Negrelli, C. (2009). Towards a definition of early medieval pottery: amphorae and other vessels in the northern Adriatic between the 7th and the 8th centuries. In *From one sea to another. Trading places in the European and Mediterranean Early Middle ages: Proceedings of the International Conference, Comacchio 27th-29th March 2009* (pp. 393-415).

Nicod, J. (1990). Murettes et terrasses de culture dans les régions karstiques méditerranéennes. *Méditerranée*, 71(3), 43-50.

Nicod, J. (2003). Les karsts dinariques, paysages et problèmes. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 10(2), 169-169.

Obelić, B., Škrivanko, M. K., Marijan, B., & Bronić, I. K. (2004). Radiocarbon dating of Sopot culture sites (Late Neolithic) in eastern Croatia. *Radiocarbon*, 46(1), 245-258.

Oldfield, F., Asioli, A., Accorsi, C. A., Mercuri, A. M., Juggins, S., Langone, L., ... & Branch, N. (2003). A high resolution late Holocene palaeo environmental record from the central Adriatic Sea. *Quaternary Science Reviews*, 22(2-4), 319-342.

Olsen J, Anderson N, Leng M (2013) Limnological controls on stable isotope records of late-Holocene palaeoenvironment change in SW Greenland: a paired lake study. *Quat Sci Rev* 66:85–95. doi:10.1016/j.quascirev.2012.10.043

Olszak-Humienik, M., & Jablonski, M. (2015). Thermal behavior of natural dolomite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 119(3), 2239-2248.

Oris, F., Ali, A. A., Asselin, H., Paradis, L., Bergeron, Y., & Finsinger, W. (2014). Charcoal dispersion and deposition in boreal lakes from 3 years of monitoring: Differences between local and regional fires. *Geophysical Research Letters*, 41(19), 6743-6752.

Orlove, B. (2009). Glacier retreat: reviewing the limits of human adaptation to climate change. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 51(3), 22-34.

Orsi, G., D'Antonio, M., de Vita, S., & Gallo, G. (1992). The Neapolitan Yellow Tuff, a large-magnitude trachytic phreatoplinian eruption: eruptive dynamics, magma withdrawal and caldera collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 53(1-4), 275-287.

Otoničar, B. (2007). Upper Cretaceous to Paleogene forbulge unconformity associated with foreland basin evolution (Kras, Matarsko Podolje and Istria; SW Slovenia and NW Croatia). *Acta carsologica*, 36(1).

Otoničar, B., Buzjak, N., Mylroie, J., & Mylroie, J. (2010). Flank margin cave development in carbonate talus breccia facies: an example from Cres Island, Croatia. *Acta Carsologica*, 39(1).

Ožanić, N. (1996). Hidrološki model funkcioniranja Vranskog jezera na otoku Cresu. (Hydrological Functioning Model of the Vrana Lake on the Cres Island) (Doctoral dissertation, Ph. d. thesis, Faculty of Civil Engineering–University of Split, Croatia).

Ožanić, N., Rubinić, J., & Vrkljan, I. (2003). The regime of inflow and runoff from Vrana Lake and the risk of permanent water pollution. *RMZ-Materials and Geoenvironment*, 50(1), 281-284.

Ožanić-Roguljić, I., Miloglav, I., & Tončinić, D. (2018). Archaeological excavations of the Banjače site. *Opvscvla archaeologica*, 39(1), 135-149.

Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (Eds.). (2008). *Bilan 2007 des changements climatiques: Rapport de synthèse*. GIEC.

Pals, J. P., Van Geel, B., & Delfos, A. (1980). Paleoecological studies in the Klokkeweel bog near Hoogkarspel (prov. of Noord-Holland). *Review of palaeobotany and palynology*, 30, 371-418.

Pascuala, D., Plaa, E., Lopez-bustinsb, J.A., Retanaac, J. & Terradasac, J. (2015). Impacts of climate change on water resources in the Mediterranean Basin: a case O. Bonacci study in Catalonia, Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 60, 2132–2147.

Patterson III, W. A., Edwards, K. J., & Maguire, D. J. (1987). Microscopic charcoal as a fossil indicator of fire. *Quaternary Science Reviews*, 6(1), 3-23.



Pavić, V., & Mioč, B. (1997). Creska sheep-sheep of the island cres. *Stočarstvo: Časopis za unapređenje stočarstva*, 51(1), 47-51.

Pennington, W., Cambray, R. S., Eakins, J. D., & Harkness, D. D. (1976). Radionuclide dating of the recent sediments of Blelham Tarn. *Freshwater Biology*, 6(4), 317-331.

Pétrequin, P., Cassen, S., Errera, M., Gauthier, E., Klassen, L., Pailler, Y., ... & Sheridan, A. (2009). L'Unique, la Paire, les Multiples. À propos des dépôts de haches polies en roches alpines en Europe occidentale pendant les Ve et IVe millénaires. Du matériel au spirituel. Réalités archéologiques et historiques des "dépôts" de la Préhistoire à nos jours, 417-427.

Petrik, M. (1960). A contribution to the limnology of Vrana Lake. *Karst Yugosl*, 2, 105-192.

Poljak, I., Vahčić, N., Gačić, M., & Idžojtić, M. (2016). Morphological characterization and chemical composition of fruits of the traditional Croatian chestnut variety 'Lovran Marron'. *Food technology and biotechnology*, 54(2), 189.

Pollegioni, P., Woeste, K., Chiochini, F., Del Lungo, S., Ciolfi, M., Olimpieri, I., ... & Malvolti, M. E. (2017). Rethinking the history of common walnut (*Juglans regia* L.) in Europe: Its origins and human interactions. *PloS one*, 12(3), e0172541.

Pons, A. (1984). La paléoécologie face aux variations spatiales du bioclimat méditerranéen. *Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques*, 131(2-4), 77-83.

Protić, S. T. (2015). The Urban Layout of Osor after 1450. *Ars Adriatica*, (5), 95-114.

Protić, T. S. (2014). Renesansna kuća Moise u Cresu-rezultati konzervatorskih istraživanja 2011. godne. *Ars Adriatica*, 4, 283-298.

Qin, J. G., & Li, Y. (2006). Optimization of the growth environment of *Botryococcus braunii* strain CHN 357. *Journal of Freshwater Ecology*, 21(1), 169-176.

Raper, D., & Bush, M. (2009). A test of *Sporormiella* representation as a predictor of megaherbivore presence and abundance. *Quaternary Research*, 71(3), 490-496.

Reed, K. (2015). From the field to the hearth: plant remains from Neolithic Croatia (ca. 6000–4000 cal bc). *Vegetation history and archaeobotany*, 24(5), 601-619.

Reed, K., Škrivanko, M. K., & Mihaljević, M. (2017). Diet and subsistence at the late Neolithic tell sites of Sopot, Slavča and Ravnjaš, eastern Croatia. *Documenta Praehistorica*, 44, 326-337.

Reille, M. (1992). New pollen-analytical researches in Corsica: the problem of *Quercus ilex* L. and *Erica arborea* L., the origin of *Pinus halepensis* Miller forests. *New Phytologist*, 122(2), 359-378.

Reimer, P. J., Austin, W. E., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B., ... & Talamo, S. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4), 725-757.

Remy, C. C., Fouquemberg, C., Asselin, H., Andrieux, B., Magnan, G., Brossier, B., ... & Ali, A. A. (2018). Guidelines for the use and interpretation of palaeofire reconstructions based on various archives and proxies. *Quaternary Science Reviews*, 193, 312-322.

Reuss, N., & Conley, D. J. (2005). Effects of sediment storage conditions on pigment analyses. *Limnology and Oceanography: Methods*, 3(10), 477-487.

Revel, M., Ducassou, E., Grousset, F. E., Bernasconi, S. M., Migeon, S., Révillon, S., ... & Bosch, D. (2010). 100,000 years of African monsoon variability recorded in sediments of the Nile margin. *Quaternary Science Reviews*, 29(11-12), 1342-1362.

Revelles, J., Burjachs, F., & Van Geel, B. (2016). Pollen and non-pollen palynomorphs from the Early Neolithic settlement of La Draga (Girona, Spain). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 225, 1-20.

Richard, H. (1983). Nouvelles contributions à l'histoire de la végétation franc-comtoise tardiglaciaire et holocène à partir des données de la palynologie (pp. 155+-13).

Richard, H. (1997b). Indices polliniques de néolithisation du massif jurassien aux VIème et Vème millénaires [Pollen evidence of an early neolithic presence on the Jura range at the VIth and Vth millenia.]. *Quaternaire*, 8(1), 55-62.

Richard, H. (2000). L'introduction de l'agriculture sur la montagne jurassienne. Plus d'un millénaire de succès et d'échecs apparents. *Etudes rurales*, (153-154), 115-125.

Richard, H. (2004). Néolithisation précoce: premières traces d'anthropisation du couvert végétal à partir des données polliniques (Vol. 777). Presses Univ. Franche-Comté.

Richard, H., Bichet, V., Murgia, L., Gauthier, E. (in press). Premiers agriculteurs au bord du lac Saint-Point (Doubs, France) au VIème millénaire avant notre ère : approches croisées de la palynologie et de la sédimentologie.

Rittmann, A. (1951). Orogenese et volcanisme. *Archives des Sciences et Compte Rendu des Seances de la Societe*, 4, 273-314.

Rius, D., Vannièrre, B., Galop, D., & Richard, H. (2011). Holocene fire regime changes from multiple-site sedimentary charcoal analyses in the Lourdes basin (Pyrenees, France). *quaternary science reviews*, 30(13-14), 1696-1709.

Rizner, M. (2012). Arheološka topografija otoka Raba, *Rapski zbornik*, II, 37–42.

Rolandi, G., Mastrolorenzo, G., Barrella, A. M., & Borrelli, A. (1993). The Avellino plinian eruption of Somma-Vesuvius (3760 yBP): the progressive evolution from magmatic to hydromagmatic style. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 58(1-4), 67-88.

Rosi, M., & Sbrana, A. (1987). Phlegrean fields. *Quaderni de la ricerca scientifica*, 9(114).

Rosi, M., Principe, C., & Vecchi, R. (1992). The 1631 Vesuvius eruption. A reconstruction based on historical and stratigraphical data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 58(1-4), 151-182.

Rossi, I. R., & Boetto, G. (2010). Arheologija broda i plovidbe: šivani brod u uvali caski na pagu-istraživačka kampanja 2009. *Histria Antiq.*, 19, 299-307.

Rossi, I. R., & Boetto, G. (2011). Šivani brod u uvali Caska na Pagu–Istraživačka kampanja 2010. *Histria Antiq.*, 20, 505-512.

Rottoli, M., & Castiglioni, E. (2009). Prehistory of plant growing and collecting in northern Italy, based on seed remains from the early Neolithic to the Chalcolithic (c. 5600–2100 cal BC). *Vegetation History and Archaeobotany*, 18(1), 91-103.

Rousseau, M., Demory, F., Miramont, C., Brisset, E., Guiter, F., Sabatier, P., & Sorrel, P. (2020). Palaeoenvironmental change and glacier fluctuations in the high Tian Shan Mountains during the last millennium based on sediments from Lake Ala Kol, Kyrgyzstan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 558, 109987.

Rubinić, J., & Katalinić, A. (2014). Water regime of Vrana Lake in Dalmatia (Croatia): changes, risks and problems. *Hydrological Sciences Journal*, 59(10), 1908-1924.

Rubinic, J., Katalinic, A., Svonja, M., Gabric, I., Buselic, G., Cuze, M., & Horvat, B. (2010). Salinization of the Vrana Lake in Dalmatia within the context of anthropogenic influences and climate changes (situation in 2008). *Sustainability of the karst environment*, 171.

Sadori, L., Jahns, S., & Peyron, O. (2011). Mid-Holocene vegetation history of the central Mediterranean. *The Holocene*, 21(1), 117–129. doi: 10.1177/0959683610377530.

Schmidt, R., Muller, J., Drescher-Schneider, R., Szeroczyńska, K., Barri, A., & Krisai, R. (2001). Changes in Holocene lake level and production in a large northern Adriatic karstic lake (Lake Vrana, Cres, Croatia). *Terra Nostra*, 1, 53-56.

Sebag, D., Copard, Y., Di-Giovanni, C., Durand, A., Laignel, B., Ogier, S., & Lallier-Vergès, E. (2006). Palynofacies as useful tool to study origins and transfers of particulate organic matter in recent terrestrial environments: Synopsis and prospects. *Earth-Science Reviews*, 79(3-4), 241-259.

Sebag, D., Di Giovanni, C., Ogier, S., Mesnage, V., Laggoun-Défarge, F., & Durand, A. (2006). Inventory of sedimentary organic matter in modern wetland (Marais Vernier, Normandy, France) as source-indicative tools to study Holocene alluvial deposits (Lower Seine Valley, France). *International Journal of Coal Geology*, 67(1-2), 1-16.

Šegota, T., & Filipčić, A. (1991). Archaeologic and geologic proofs for Holocene sea level position on the east Adriatic littoral. *Rad Hrvatske Akademije Znanosti I Umjetnosti*, 458(25), 149-172.

Shahraki, B. K., Mehrabi, B., & Dabiri, R. (2009). Thermal behavior of Zefreh dolomite mine (Central Iran). *Journal of Mining and Metallurgy B: Metallurgy*, 45(1), 35-44.

Shepard, F. P. (1963). Thirty-five thousand years of sea-level. *Essays in marine geology in honor of KO Emery*, 1-10.

Shotyk, W., Krachler, M., Martinez-Cortizas, A., Cheburkin, A. K., & Emons, H. (2002). A peat bog record of natural, pre-anthropogenic enrichments of trace elements in atmospheric aerosols since 12 370 14C yr BP, and their variation with Holocene climate change. *Earth and Planetary Science Letters*, 199(1-2), 21-37.

Shotyk, W., Weiss, D., Appleby, P. G., Cheburkin, A. K., Frei, R., Gloor, M., ... & Van Der Knaap, W. O. (1998). History of atmospheric lead deposition since 12,370 14C yr BP from a peat bog, Jura Mountains, Switzerland. *Science*, 281(5383), 1635-1640.

Siani, G., Paterne, M., Michel, E., Sulpizio, R., Sbrana, A., Arnold, M., & Haddad, G. (2001). Mediterranean Sea surface radiocarbon reservoir age changes since the last glacial maximum. *Science*, 294(5548), 1917-1920.

Siani, G., Sulpizio, R., Paterne, M., & Sbrana, A. (2004). Tephrostratigraphy study for the last 18,000 14C years in a deep-sea sediment sequence for the South Adriatic. *Quaternary Science Reviews*, 23(23-24), 2485-2500.

Siddall, M., Rohling, E. J., Thompson, W. G., & Waelbroeck, C. (2008). Marine isotope stage 3 sea level fluctuations: Data synthesis and new outlook. *Reviews of Geophysics*, 46(4).

Sigurdsson, H., & Carey, S. (1985). The Eruption of. *National Geographic Research*, 1(3), 332-387.

Šikić, D., & BLAŠKOVIĆ, I. (1969). Osnovna geološka karta 1: 100 000. Tumač za list Novi Vinodolski, Izradio Geološki zavod Zagreb.

Simonneau, A., Chapron, E., Vannière, B., Wirth, S. B., Gilli, A., Di Giovanni, C., ... & Magny, M. (2013). Mass-movement and flood-induced deposits in Lake Ledro, southern Alps, Italy: implications for Holocene palaeohydrology and natural hazards. *Climate of the Past*, 9(2), 825-840.

Sirovica, F. (2014). Pod kod bruške—analiza nalazišta s osvrtom na problematiku pretpovijesne suhozidne arhitekture. *Opvscvla archaeologica*, 37(1), 50-93.

Sittler, C. (1955). Méthodes et techniques physicochimiques de préparation sédiments en vue de leur analyse pollinique. *Revue de L'institut Français du Pétrole et Annales des Combustibles Liquides*. 10, (2), 103-114.

Skelac, G., Radić Rossi, I. (2005). Lopar – Punta Zidine, Hrvatski arheološki godišnjak, 2, 273–274.

Slapšak, B. (1995). Možnosti študija poselitve v arheologij: Arheo.

Sorrel, P., Popescu, S. M., Head, M. J., Suc, J. P., Klotz, S., & Oberhänsli, H. (2006). Hydrographic development of the Aral Sea during the last 2000 years based on a quantitative

analysis of dinoflagellate cysts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(2), 304-327.

Sorrel, P., Popescu, S. M., Klotz, S., Suc, J. P., & Oberhänsli, H. (2007). Climate variability in the Aral Sea basin (Central Asia) during the late Holocene based on vegetation changes. *Quaternary Research*, 67(3), 357-370.

Šoštarić, R. (2005). The development of postglacial vegetation in coastal Croatia. *Acta Botanica Croatica*, 64(2), 383-390.

Šoštarić, R., & Küster, H. (2001). Roman plant remains from Veli Brijun (island of Brioni), Croatia. *Vegetation History and Archaeobotany*, 10(4), 227-233.

Stansell N, Rodbell D, Abbott M, Mark B (2013) Proglacial lake sediment records of Holocene climate change in the western Cordillera of Peru. *Quat Sci Rev* 70:1–14. doi:10.1016/j.quascirev. 2013.03.003

Štih, P. (2010). *The Middle Ages between the Eastern Alps and the Northern Adriatic: select papers on Slovene historiography and Medieval history*. Brill.

Storms, J. E., Weltje, G. J., Terra, G. J., Cattaneo, A., & Trincardi, F. (2008). Coastal dynamics under conditions of rapid sea-level rise: Late Pleistocene to Early Holocene evolution of barrier–lagoon systems on the northern Adriatic shelf (Italy). *Quaternary Science Reviews*, 27(11-12), 1107-1123.

Suc, J. P. (1984). Origin and evolution of the Mediterranean vegetation and climate in Europe. *Nature*, 307(5950), 429-432.

Sulpizio, R., Bonasia, R., Dellino, P., Di Vito, M. A., La Volpe, L., Mele, D., ... & Sadori, L. (2008). Discriminating the long distance dispersal of fine ash from sustained columns or near ground ash clouds: the example of the Pomici di Avellino eruption (Somma-Vesuvius, Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(1), 263-276.

Surić, M. (2002). Submarine karst of Croatia-evidence of former lower sea levels. *Acta Carsologica*, 31(3).

Surić, M., Richards, D. A., Hoffmann, D. L., Tibljaš, D., & Juračić, M. (2009). Sea-level change during MIS 5a based on submerged speleothems from the eastern Adriatic Sea (Croatia). *Marine Geology*, 262(1-4), 62-67.

Šušnjar, M., Bukovac, J., Nikler, L., Crnolatac, I., Milan, A., Šikić, D., ... & Blašković, I. (1970). *Osnovna geološka karta 1: 100.000, list Crikvenica* [Basic geological map 1: 100.000, Crikvenica sheet—in Croatian]. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, Savezni geološki zavod, Beograd.

Teranes, J. L., & Bernasconi, S. M. (2005). Factors controlling  $\delta^{13}\text{C}$  values of sedimentary carbon in hypertrophic Baldeggersee, Switzerland, and implications for interpreting isotope excursions in lake sedimentary records. *Limnology and Oceanography*, 50(3), 914-922.

Ternjej, I., & Tomec, M. (2005). Plankton community and related environmental factors in the oligotrophic Lake Vrana. *Periodicum Biologorum*, 107(3), 321-328.

Terral, J. F., Durand, A., Newton, C., & Ivorra, S. (2009). Archéo-biologie de la domestication de l'olivier en Méditerranée occidentale: de la remise en cause d'une histoire dogmatique à la révélation de son irrigation médiévale. *Études héraultaises*, 233, 13-25.

This, P., Lacombe, T., & Thomas, M. R. (2006). Historical origins and genetic diversity of wine grapes. *TRENDS in Genetics*, 22(9), 511-519.

Thomas, C. (1978). Decay and development in Mediterranean Yugoslavia. *Geography*, 179-187.

Tinner, W., Nielsen, E. H., & Lotter, A. F. (2007). Mesolithic agriculture in Switzerland? A critical review of the evidence. *Quaternary Science Reviews*, 26(9-10), 1416-1431.

Tirlea, D., Beaudoin, A. B., & Vinebrooke, R. D. (2015). Freeze-dried is as good as frozen: evaluation of differential preservation of pollen grains in stored lake sediments. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 215, 46-56.

Tjallingii, R., Röhl, U., Kölling, M., & Bickert, T. (2007). Influence of the water content on X-ray fluorescence core-scanning measurements in soft marine sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(2).

Tolonen, K. (1986). Charred particle analysis. *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*, 485-496.

Tomec, Z., Teskeredžić, Z., Teskeredžić, E., & Hacmanjek, M. (1996). Fitoplankton Vranskog jezera na otoku Cresu. *Croatian Journal of Fisheries: Ribarstvo*, 54(3), 105-113.

Trachsel, M., Grosjean, M., Schnyder, D., Kamenik, C., & Rein, B. (2010). Scanning reflectance spectroscopy (380–730 nm): a novel method for quantitative high-resolution climate reconstructions from minerogenic lake sediments. *Journal of Paleolimnology*, 44(4), 979-994.

Trincardi, F., Correggiari, A., & Roveri, M. (1994). Late Quaternary transgressive erosion and deposition in a modern epicontinental shelf: the Adriatic semienclosed basin. *Geomarine letters*, 14(1), 41-51.

Turner, F., Pott, R., Schwarz, A., & Schwalb, A. (2014). Response of *Pediastrum* in German floodplain lakes to Late Glacial climate changes. *Journal of Paleolimnology*, 52(4), 293-310.

Unkel I, Fernandez M, Björck S, Ljung K, Wohlfarth B (2010) Records of environmental changes during the Holocene from Isla de los Estados (54.4°S), southeastern Tierra del Fuego. *Glob Planet Change* 74:99–113. doi:10.1016/j.gloplacha.2010.07.003

Van Andel, T. H. (1989). Late Quaternary sea-level changes and archaeology. *Antiquity*, 63(241), 733-745.

Van Asperen, E. N., Perrotti, A., & Baker, A. (2021). Coprophilous fungal spores: non-pollen palynomorphs for the study of past megaherbivores. *Geological Society, London, Special Publications*, 511(1), 245-267.

Van Der Knaap, W. O., & Ammann, B. (1997). Depth-age relationships of 25 well-dated Swiss Holocene pollen sequences archived in the Alpine Palynological Data-Base. *Revue Paleobiol., Geneve* (1997) 16 (2):, 433-480.

Van Der Meer, F. (2004). Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 5(1), 55-68.

Van der Schriek, T., & Giannakopoulos, C. (2017). Determining the causes for the dramatic recent fall of Lake Prespa (southwest Balkans). *Hydrological Sciences Journal*, 62(7), 1131-1148.

Van der Wiel, A. M. (1982). A palaeoecological study of a section from the foot of the Hazendonk (Zuid-Holland, The Netherlands), based on the analysis of pollen, spores and macroscopic plant remains. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 38(1-2), 35-90.

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*, 25(1), 1-120.

Van Geel, B. (1986). Application of fungal and algal remains and other microfossils in palynological analyses. *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*, 24, 497-505.

Van Geel, B. (2001). Non-pollen palynomorphs. In *Tracking environmental change using lake sediments* (pp. 99-119). Springer, Dordrecht.

Van Geel, B., & Aptroot, A. (2006). Fossil ascomycetes in Quaternary deposits. *Nova Hedwigia*, 82(3), 313-330.

Van Geel, B., Bohncke, S. J. P., & Dee, H. (1980). A palaeoecological study of an upper Late Glacial and Holocene sequence from "De Borchert", The Netherlands. *Review of palaeobotany and palynology*, 31, 367-448.

Van Geel, B., Bos, J. M., & Pals, J. P. (1983). Archaeological and palaeoecological aspects of a medieval house terp in a reclaimed raised bog area in North Holland. *Berichten van de Rijksdienst voor het Oudheidkundig Bodemonderzoek*, 33, 419-444.

Van Geel, B., Buurman, J., Brinkkemper, O., Schelvis, J., Aptroot, A., Van Reenen, G., & Hakbijl, T. (2003). Environmental reconstruction of a Roman Period settlement site in Uitgeest (The Netherlands), with special reference to coprophilous fungi. *Journal of Archaeological Science*, 30(7), 873-883.

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(1-2), 25-129.

Van Geel, B., Hallewas, D. P., & Pals, J. P. (1983). A late Holocene deposit under the Westfrieze Zeedijk near Enkhuizen (Prov. of Noord-Holland, The Netherlands): palaeoecological and archaeological aspects. *Review of palaeobotany and palynology*, 38(3-4), 269-335.

Van Hunnik, E., Van Den Ende, H., Timmermans, K. R., Laan, P., & De Leeuw, J. W. (2000). A comparison of CO<sub>2</sub> uptake by the green algae *Tetraedron minimum* and *Chlamydomonas monoica*. *Plant Biology*, 2(06), 624-627.

Vežić, P., Josipović, I. (2020) *Abbatissa ingenuitate precipua: Zbornik radova sa znanstvenog kolokvija "950. obljetnica Samostana benediktinki sv. Marije u Zadru (1066.-2016.)"*, Zadar.

Vinšćak, T. (1991). Tradicijsko ovčarstvo u Baškoj na otoku Krku. *Studia ethnologica Croatica*, 3(1), 137-143.

Vlahović, I., Tišljar, J., Velić, I., & Matičec, D. (2005). Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 220(3-4), 333-360.

Vogel, J. S., Cornell, W., Nelson, D. E., & Southon, J. R. (1990). Vesuvius/Avellino, one possible source of seventeenth century BC climatic disturbances. *Nature*, 344(6266), 534-537.

Vogel, S., & Märker, M. (2010). Reconstructing the Roman topography and environmental features of the Sarno River Plain (Italy) before the AD 79 eruption of Somma-Vesuvius. *Geomorphology*, 115(1-2), 67-77.

Wagner, B. A., & Young, J. A. (2009). Seabass and seabream farmed in the Mediterranean: swimming against the tide of market orientation. *Supply Chain Management: An International Journal*.

Wagner, B., Francke, A., Sulpizio, R., Zanchetta, G., Lindhorst, K., Krastel, S., ... & Trajanovski, S. (2012). Possible earthquake trigger for 6th century mass wasting deposit at Lake Ohrid (Macedonia/Albania). *Climate of the Past*, 8(6), 2069-2078.

Wallnöfer, B. (2007). An annotated checklist of the vascular plants of the Cres-Lošinj (Cherso-Lussino) archipelago (NE-Adriatic Sea, Croatia). *Annalen des Naturhistorischen Museums in Wien. Serie B für Botanik und Zoologie*, 207-318.

Weckström, K., Weckström, J., Yliniemi, L. M., & Korhola, A. (2010). The ecology of *Pediastrum* (Chlorophyceae) in subarctic lakes and their potential as paleobioindicators. *Journal of Paleolimnology*, 43(1), 61-73.

Welc, F. (2019). Geoarchaeological evidence of late and post-Antiquity (5th-9th c. AD) climate changes recorded at the Roman site in Plemići Bay (Zadar region, Croatia). *Studia Quaternaria*, 3-17.



Wohlfarth, B., Skog, G., Possnert, G., & Holmquist, B. (1998). Pitfalls in the AMS radiocarbon-dating of terrestrial macrofossils. *Journal of Quaternary Science: Published for the Quaternary Research Association*, 13(2), 137-145.

Wolfe, A.P., Vinebrooke, R.D., Michelutti, N., Rivard, B., Das, B., (2006). Experimental calibration of lake-sediment spectral reflectance to chlorophyll a concentrations: methodology and paleolimnological validation. *J. Paleolimnol.* 36, 91–100.a

Wood, J. R., Wilmshurst, J. M., Worthy, T. H., & Cooper, A. (2011). Sporormiella as a proxy for non-mammalian herbivores in island ecosystems. *Quaternary Science Reviews*, 30(7-8), 915-920.

Wulf, S., Kraml, M., & Keller, J. (2008). Towards a detailed distal tephrostratigraphy in the Central Mediterranean: the last 20,000 yrs record of Lago Grande di Monticchio. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(1), 118-132.

Xu, H., Ai, L., Tan, L., & An, Z. (2006). Stable isotopes in bulk carbonates and organic matter in recent sediments of Lake Qinghai and their climatic implications. *Chemical Geology*, 235(3-4), 262-275.

Zanchetta, G., Sulpizio, R., Giaccio, B., Siani, G., Paterne, M., Wulf, S., & D'Orazio, M. (2008). The Y-3 tephra: a Last Glacial stratigraphic marker for the central Mediterranean basin. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(1), 145-154.

Zanchetta, G., Sulpizio, R., Roberts, N., Cioni, R., Eastwood, W. J., Siani, G., ... & Santacroce, R. (2011). Tephrostratigraphy, chronology and climatic events of the Mediterranean basin during the Holocene: an overview. *The Holocene*, 21(1), 33-52.

Zohary, D., & Hopf, M. (2000). *Domestication of plants in the Old World: The origin and spread of cultivated plants in West Asia, Europe and the Nile Valley* (No. Ed. 3). Oxford university press.

Zolitschka, B. (1992). Climatic change evidence and lacustrine varves from maar lakes, Germany. *Climate Dynamics*, 6(3), 229-232.



## VII. : LEXIQUE

**Agropastoralisme** : regroupe différentes pratiques agricoles où s'associe de manière complémentaire l'agriculture et l'élevage (pastoralisme) nomade ou itinérant.

**Carophyte** : division d'algues vertes de répartition mondiale, généralement considérée comme le groupe-frère des Parenchymophytes, voire des Embryophytes au sein des Plasmodesmophytes

**Chara** : est un genre d'algues vertes de la famille des Characeae. Ces végétaux sont aquatiques (algues d'eau douce et pour quelques espèces d'eaux saumâtres trouvées dans des habitats littoraux sous l'influence du sel).

**Chydoridae** : famille de puces d'eau appartenant à l'ordre Anomopoda.

**Dépôts colluviaux** : sédiments fins meubles se déposant par gravité sur les pentes d'un versant.

**Diagraphie (chimique/physique)** : caractérisation à l'aide de différentes sondes des formations géologiques traversées lors d'un forage.

**Diamagnétisme** : le matériau ne possède pas d'aimantation spontanée mais, en présence d'un champ magnétique extérieur, il peut acquérir une aimantation très faible dirigée en sens contraire du champ d'excitation. Toutes les matières gemmes ont une composante diamagnétique. Les plus représentatifs sont les feldspaths, les quartz, le diamant ou la calcite.

**Epilimnion** : il s'agit de la couche supérieure où de surface lorsque les eaux sont stratifiées (milieu continental ou océanique). Elles sont généralement chaudes et profitent d'un ensoleillement important ou se développe une forte productivité primaire.

**Eurythermique** : Espèce adaptée à de grandes variations de température.

**Ferrimagnétisme** : C'est le cas typique de la magnétite  $Fe_3O_4$ , comportant deux ions  $Fe^{3+}$  et un ion  $Fe^{2+}$ . Les deux types d'ions  $Fe^{3+}$ , l'un dans une lacune octaédrique et l'autre dans une lacune tétraédrique de la structure, ont leurs spins opposés, et donc leur effet s'annule, tandis que les ions  $Fe^{2+}$ , situés dans des lacunes octaédriques, ont leurs spins parallèles et sont donc responsables de l'aimantation. La structure atomique spécifique de ce type de matériau (les ferrites) lui confère un très grand pouvoir magnétique. A titre de comparaison, la susceptibilité magnétique de la magnétite est un million de fois plus grande que celle des matières diamagnétiques. Au-dessus de leur température de Curie, ces matériaux redeviennent paramagnétiques.

**Ferromagnétisme** : Les spins s'alignent dans des régions appelées domaines magnétiques et confèrent au matériau une aimantation, même en l'absence de champ externe. Si les domaines sont trop petits, avec des orientations aléatoires d'un domaine à l'autre, l'aimantation résultante est faible. L'aimantation augmente par application d'un champ externe qui tend à aligner tous les domaines, mais l'aimantation chute brusquement à une certaine température dite de Curie, en raison de la forte agitation thermique qui détruit cet alignement.

**Flyschs** : dépôt sédimentaire détritique composé d'une alternance d'argile et de grès formé à l'origine en contexte marin.

**Héliophile** : végétaux se développant dans des conditions d'ensoleillement importantes.

**Hélophyte** : plante semi-aquatique, typiquement de marais ou en bordure littoral, dont les racines vivent toujours sous l'eau, mais les tiges, les fleurs et feuilles sont aériennes.

**Hypolimnion** : il s'agit de la couche la plus profonde de la colonne d'eau lorsque les eaux sont stratifiées (milieu continental ou océanique). Elle est généralement faiblement éclairée et à des températures stables.

**Macrophytes** : végétaux aquatiques (plante à fleur, mousse, prêle, fougère...) macroscopiques visibles à l'œil nu se développant dans une eau douce.

**Microthermique** : Plantes dont le développement s'effectue en climat tempéré froid (moins de 15° C). Les formes de végétation comprennent des regroupements de type forestier (bouleau, sapin et l'épicéa).

**Mélanoidine** : polymère brun de hauts poids moléculaires formés par la combinaison de sucres et d'acides aminés. Cette réaction se produit principalement lors du processus d'humification dans les sols, bien que dans des cas spécifiques, elle puisse se former dans le milieu aquatique (Aycard et al., 2003 ; Debret et al., 2011).

**Mésothermique** : regroupe les organismes qui vivent à des températures modérées comprises entre 20 et 40°C.

**Paramagnétisme** : le matériau ne possède pas d'aimantation spontanée mais, en présence d'un champ magnétique extérieur, il acquiert une aimantation dirigée dans le même sens que ce champ d'excitation. La susceptibilité magnétique est positive et en général assez faible. Le matériau peut être attiré par un aimant de manière très faible à sensible. La plupart des gaz, certains métaux dont les matériaux alcalins, et quelques sels sont paramagnétiques, ainsi que les grenats, amphiboles, pyroxènes, olivines ou tourmalines.

**Pyrite framboïdale** : minéral opaque noir qui forme des agrégats en forme de « framboise ». On la retrouve couramment dans les sédiments côtiers, marécageux, marins et estuariens et les sables de plage. Elle se forme généralement lorsque le milieu est pauvre en oxygène voir anoxique.

**Retrodiffusion** : diffusion vers l'arrière d'une particule ou d'un quanton.

**Rubéfaction** : Processus de coloration en rouge du sol par les oxydes de fer sous forme déshydratée. Ce processus est dû à l'altération des minéraux primitifs de la roche mère qui libère d'importantes quantités de fer. Ce phénomène est courant dans les zones aux climats subtropicaux et méditerranéens.

**Rudiste** : de bivalves exclusivement marins qui ont vécu du Jurassique supérieur jusqu'à la limite Crétacé-Tertiaire.

**Sapropel** : sédiments de couleur sombre riches en matière organique. Les sapropèles se développent lors d'épisodes de faible oxygénation des eaux de fond, comme un événement anoxique océanique (OAE). Les premiers sapropèles enregistrés dans les sédiments méditerranéens datent de la fermeture de l'océan Téthys oriental il y a 13,5 millions d'années. La formation des épisodes de sapropèles en Mer Méditerranée se produit environ tous les 21 000 ans et dure entre 3 000 et 5 000 ans suivant les paramètres orbitaux de la Terre (cycles de Milankovitch).

**Stromatolite** : traces anciennes d'activités biologiques qui correspondent à un encroutement par de bactéries.

**Thermocline** : zone de transition entre les eaux superficielles et les eaux profondes.

**Zone euphotique** : zone qui reçoit la lumière.



# VIII. : Annexes

## VIII.1 Annexes 1 : Planche des macrorestes végétaux sur VRA\_2018







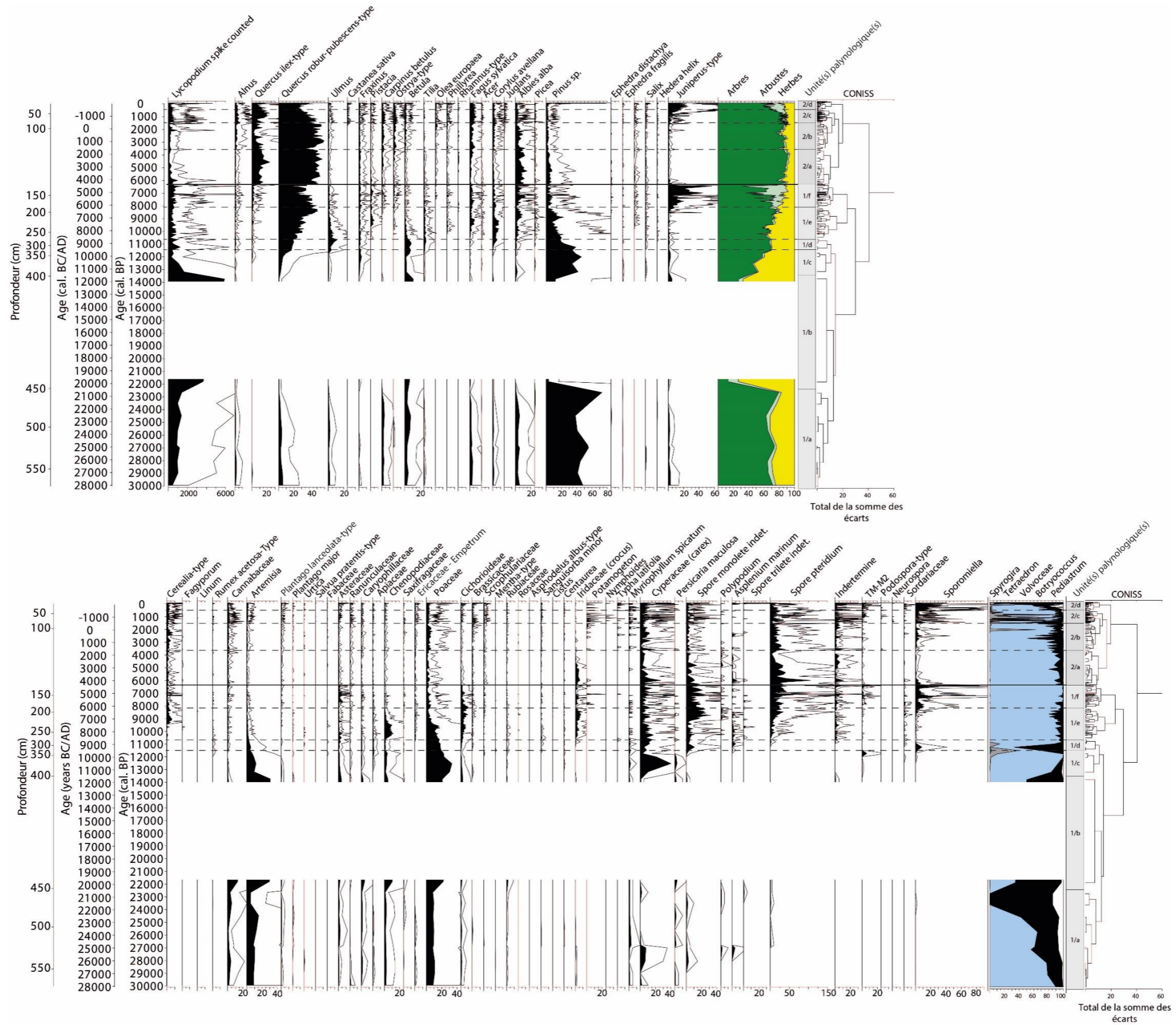
VIII.2 Annexes 2 : Planche des macrorestes végétaux sur OMI\_2018



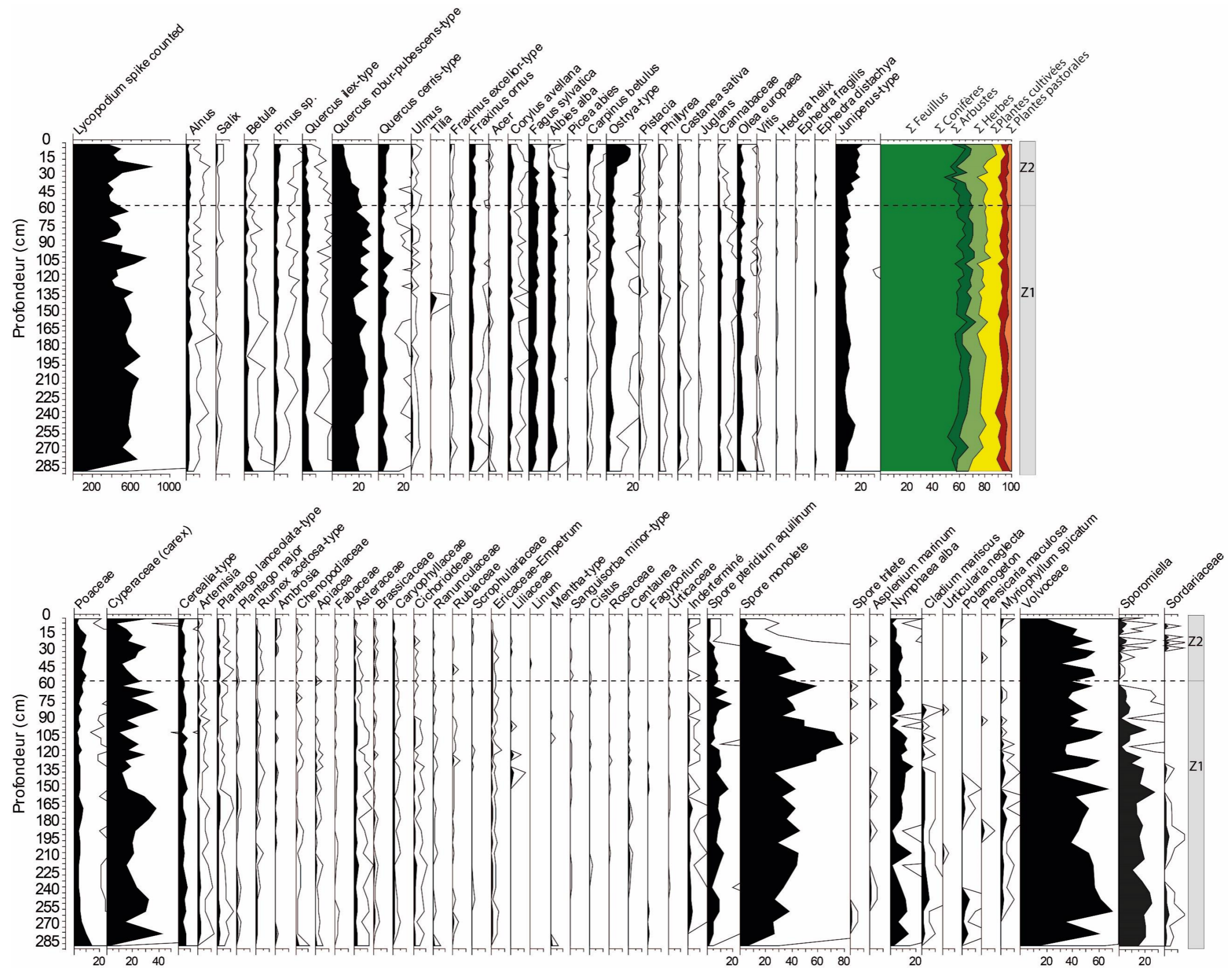
VIII.3 Annexes 3 : Planche des macrorestes végétaux sur PS\_2018



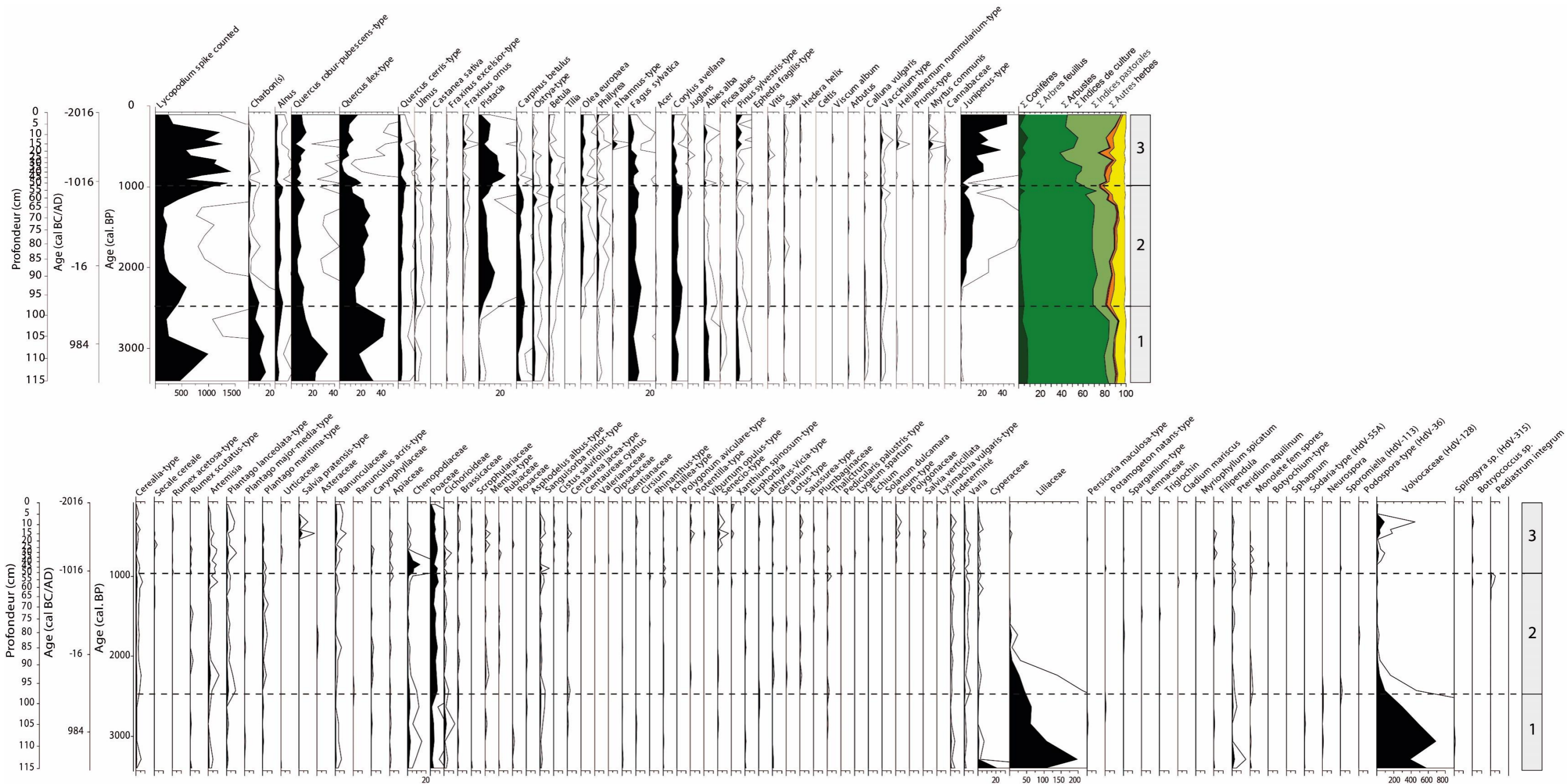
VIII.4 Annexe 4 : Diagramme pollinique complet du lac Vrana



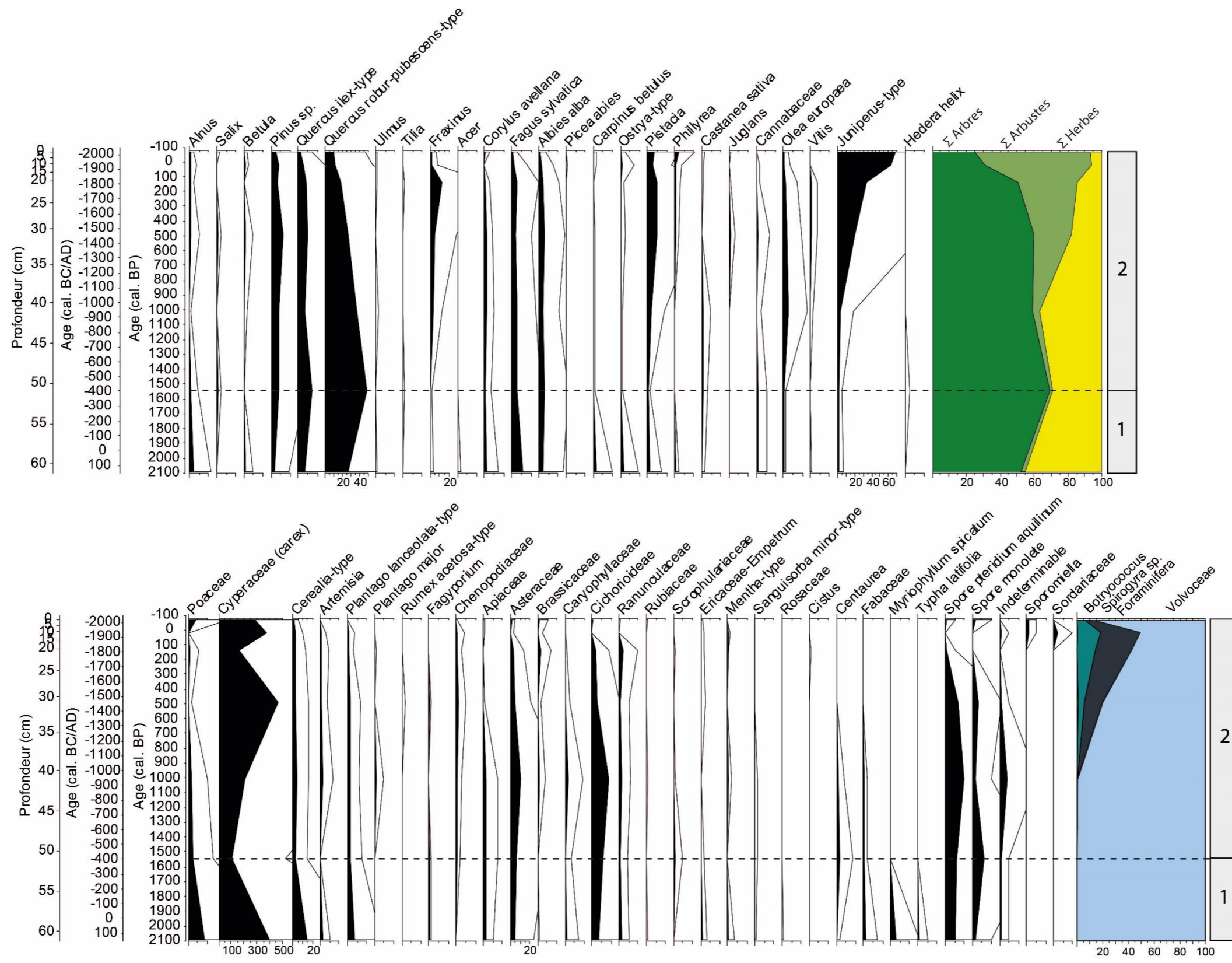
VIII.5 Annexe 5 : Diagramme pollinique complet du lac Omišalj



VIII.6 Annexe 6 : Diagramme pollinique complet du lac d'Osor



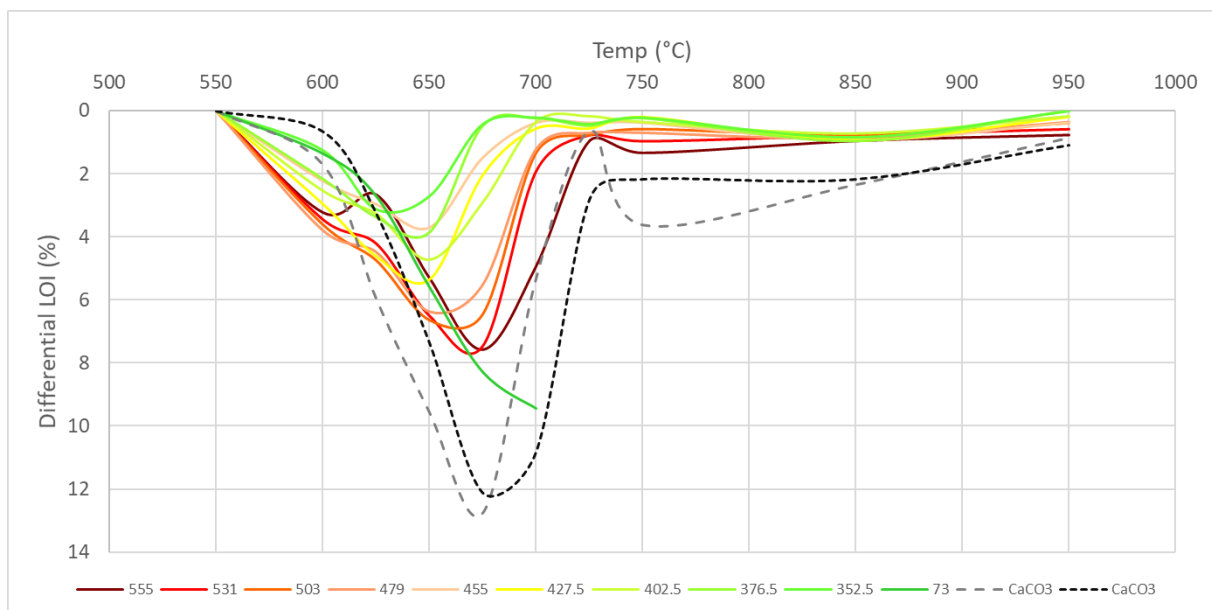
VIII.7 Annexe 7 : Diagramme pollinique complet du lac de Punta Secca



## VIII.8 Annexe 8 : Tests de perte au feu sur le lac Vrana (VRA\_2018)

Plusieurs tests en perte au feu ont été menés ponctuellement sur des échantillons du lac Vrana (VRA\_2018) afin de déterminer une température de combustion de la dolomie. Bien que l'utilisation d'une thermo-balance (thermogravimétrie) soit plus pratique et adéquate, aucun appareil de ce type n'était disponible au laboratoire Chrono-environnement. Les déterminations ont donc dû être effectuées simplement par perte au feu séquentielle en pesant les échantillons après chauffage à 105°C, 550°C, 600°C, 625°C, ..., 950°C pendant 120 minutes.

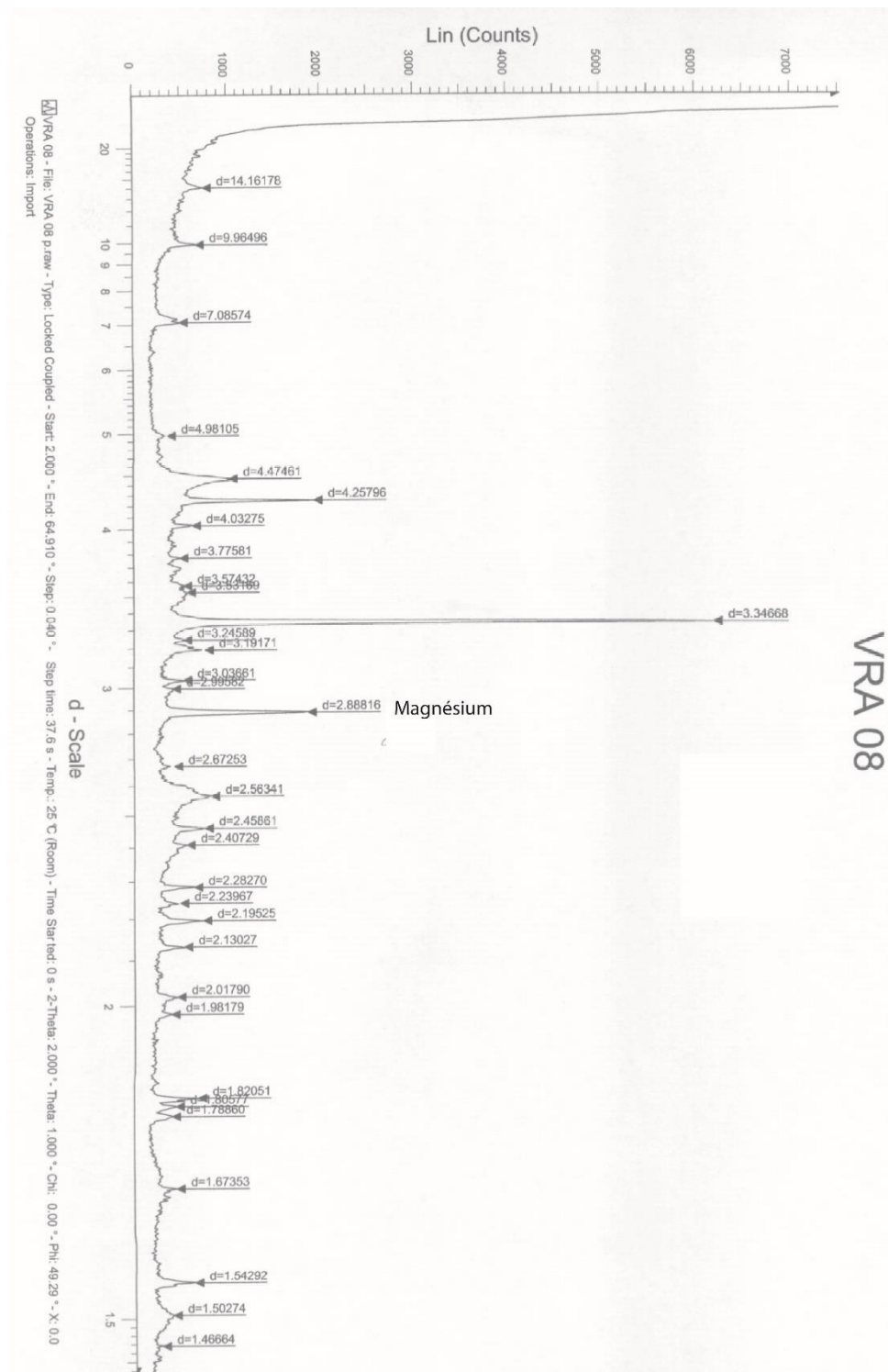
Le graphique ci-dessous représente la perte de masse entre chaque chauffage en prenant LOI550 = 0%



Les résultats indiquent une décomposition thermique de la calcite et de la dolomie dès 600°C. Il n'est donc pas possible d'estimer la teneur en dolomie par simple perte au feu séquentielle car il n'y a qu'un unique pic important de décomposition entre 625 et 670°C.

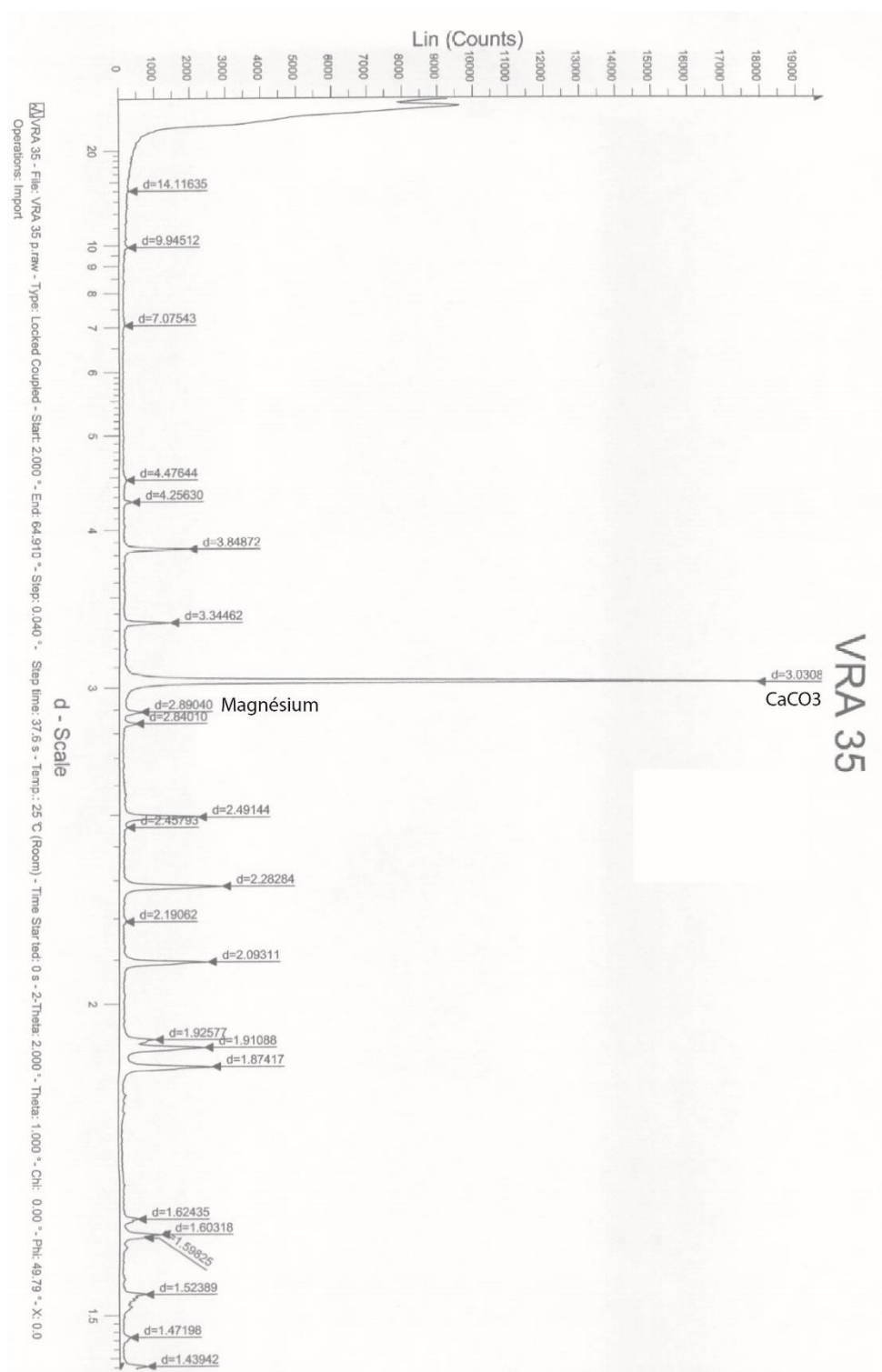
### VIII.9 Annexe 9 : Analyse de cristallographie aux rayons X

Echantillon entre 14,5 et 16,5 cm sur VRA\_2018 (VRA\_08) :

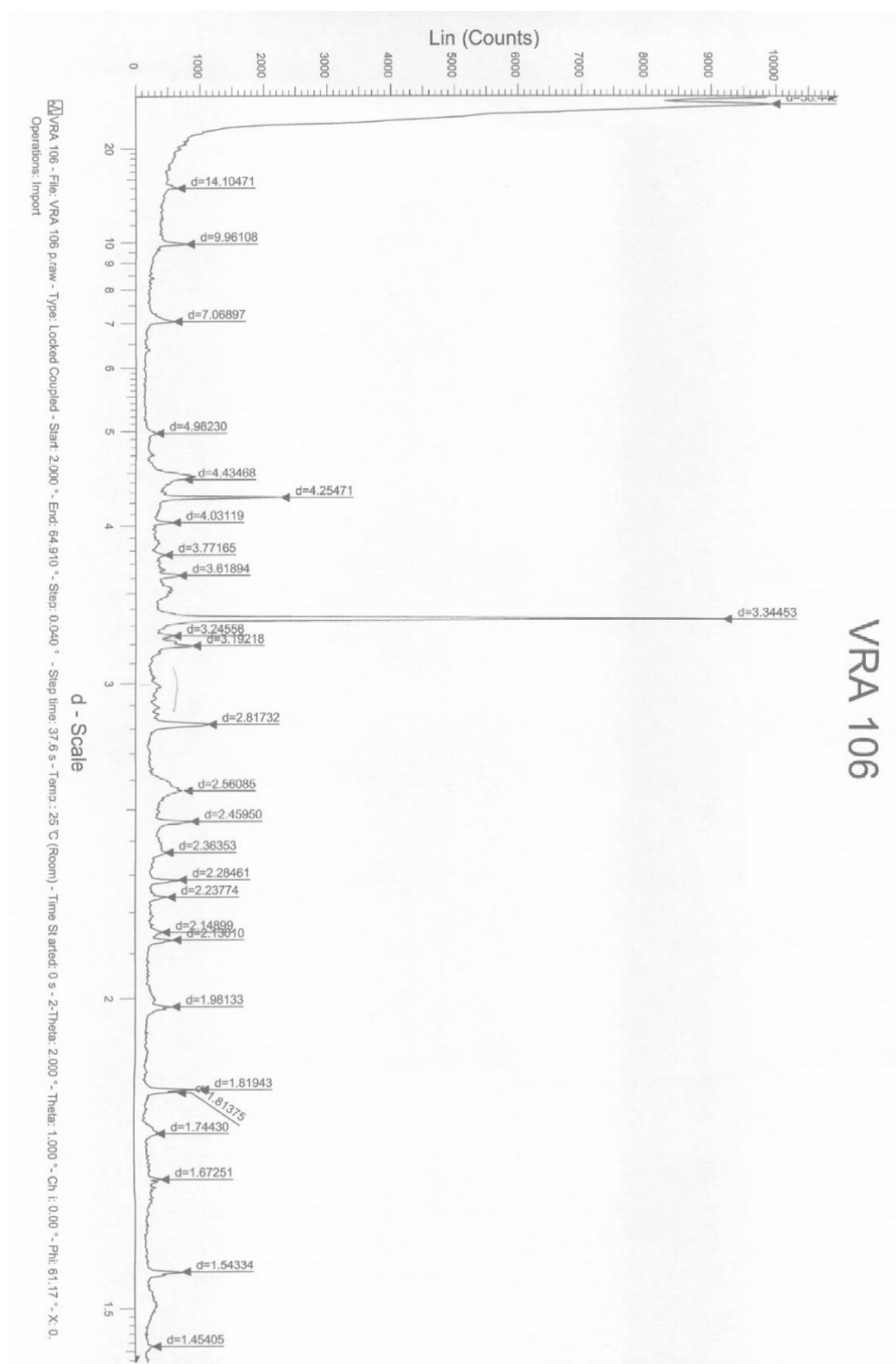




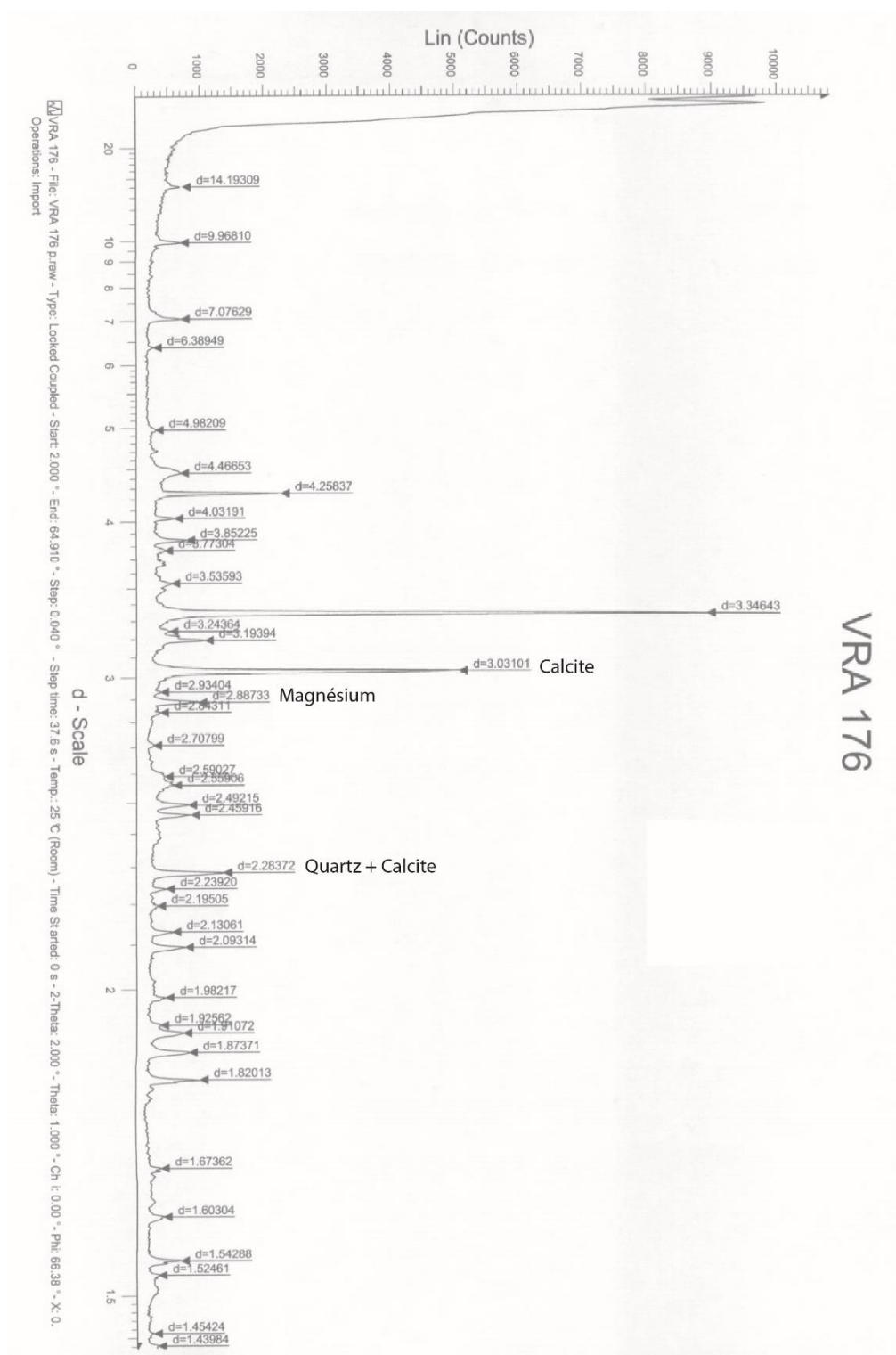
Echantillon entre 68,5 à 70,5 cm sur VRA\_2018 (VRA\_35) :



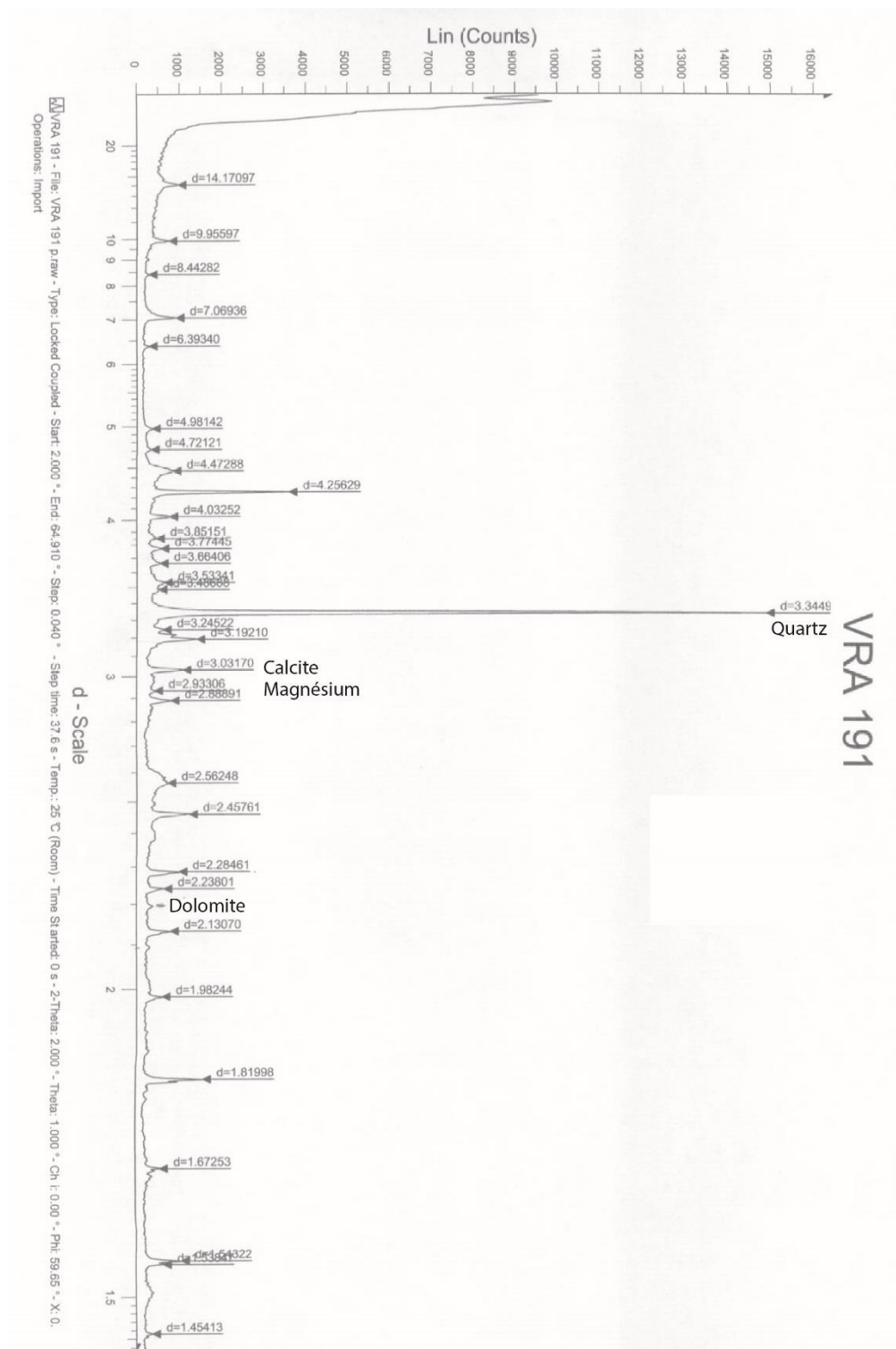
Echantillon entre 209,5 et 211,5 cm sur VRA\_2018 (VRA\_106) :



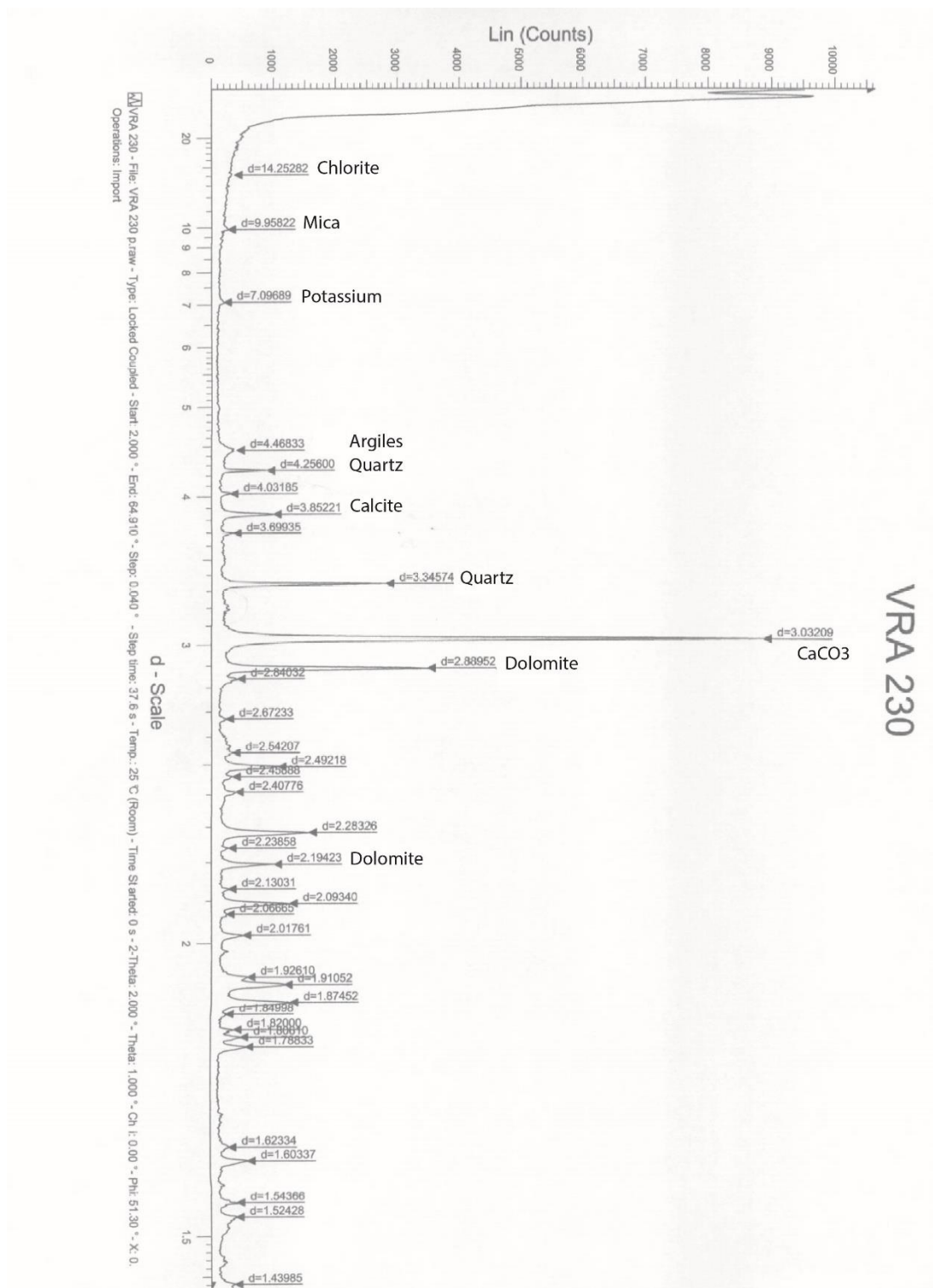
Echantillon entre 350,5 et 352,5 cm sur VRA\_2018 (VRA\_176) :



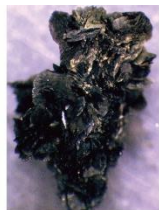
Echantillon entre 380,5 à 382,5 cm sur VRA\_2018 (VRA\_191)



Echantillon entre 498 et 502 cm sur VRA\_2018 (VRA\_230) :



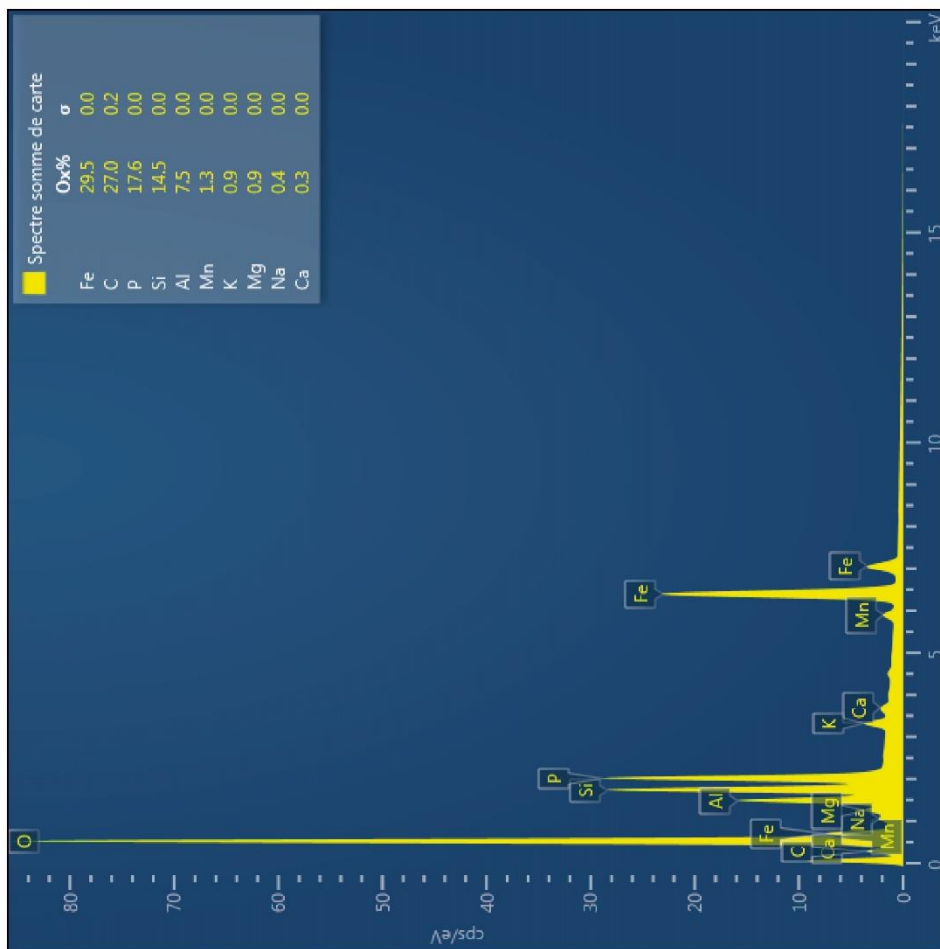
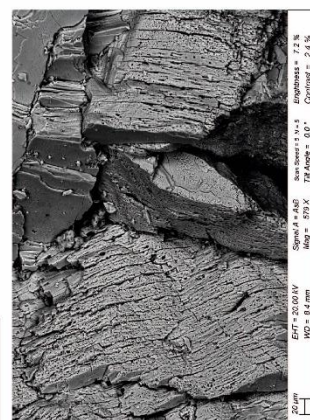
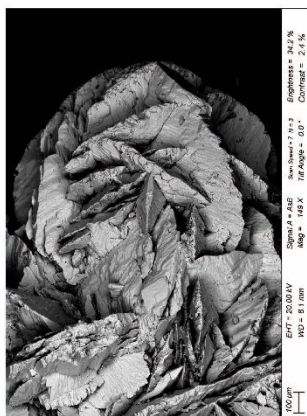
## VIII.10 Annexe 10 : Analyse de microscopie électronique à balayage



### Analyse de microscopie électronique à balayage (MEB)

Phosphosidérite (Fe+3 PO4 2H2 O)  
 Pilote\_133-134 cm (MCD 157,5 - 159,5 cm)

Présente communément dans les roches sédimentaires et associées à plusieurs gîtes métalliques (Ag, Fe, Cu, Pb). La sidérite est régulièrement présente dans les sols (sédiments lacustres, estuaires et sources riches en carbonates) et sous-sols profonds (roches, minéraux et sédiments indurés). Elle peut se former par voie organique ou inorganique.



**VIII.11      Annexe 11 : Photographies des pollens de types « Cerealia »**

Échantillon sur la carotte composite à 237,5 cm soit 9450 cal. BP

Pollens de céréale ou pollen de poacée sauvage ?

