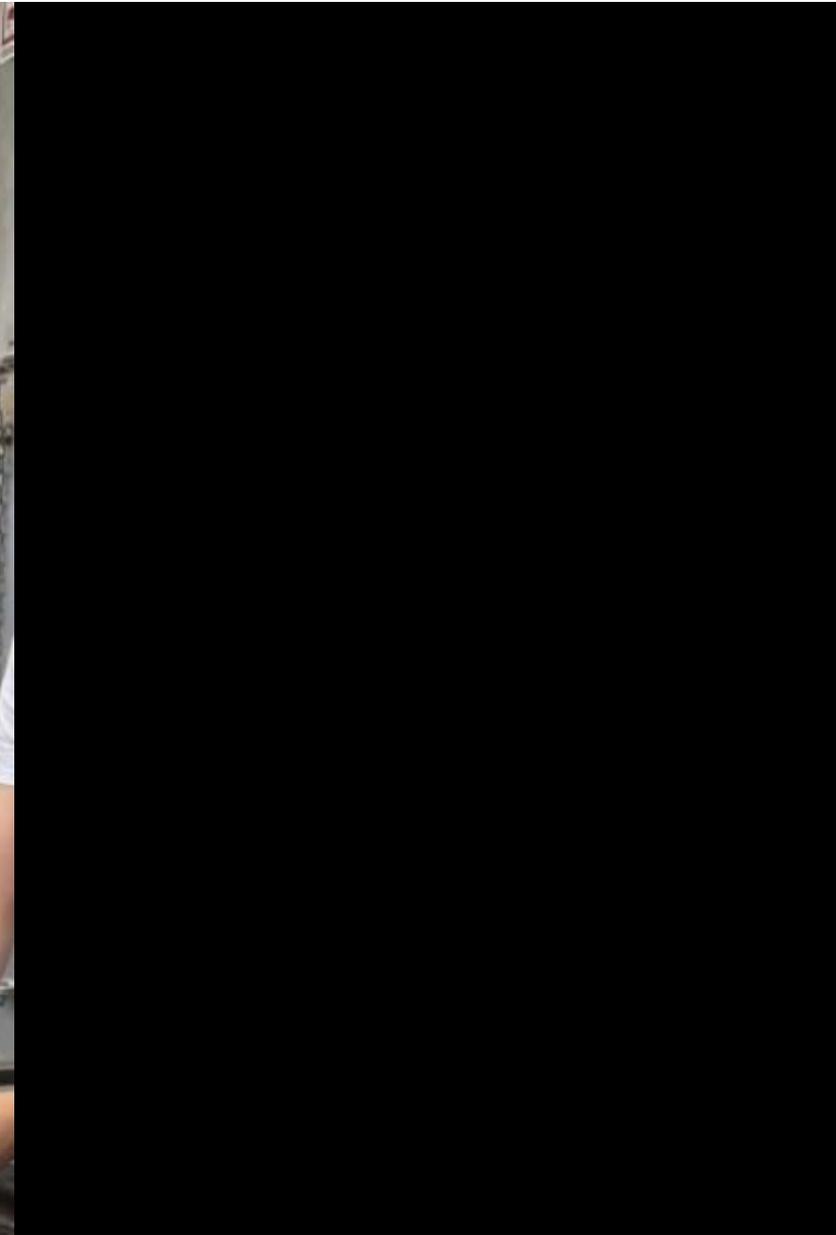


EVENEMENT

Séminaire national : le verre du futur
s'invite au Lycée Jean Monnet

Passé
X





Production et recyclage du verre au premier millénaire de notre ère

Nadine Schibille

Jalame, 1963-1971 © Corning Museum of Glass, Corning, New York



L'importance du verre dans l'archéologie



- le verre se casse facilement & il est recyclable
- le verre peut fournir des informations sur la vie quotidienne, mais plus encore sur certains aspects artistiques et esthétiques
- Le verre nous aide à comprendre les dynamiques économique, les mouvement des personne et de choses
- En tant que chercheurs en sciences archéologiques (archéométrie), nous nous intéressons aux technologie de production, les matières premières utilisées, la manière dont elles ont été préparées ...

Production & recyclage - Roadmap



Le modèle ancien de fabrication du verre

Matières premières du verre

Production primaire versus production secondaire

Changements vers la fin du premier millénaire

Le recyclage (& la réutilisation) du verre

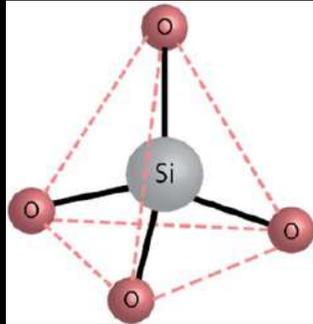
Les marqueurs de recyclage

Pourquoi le verre a-t-il été recyclé, quelle a été la force motrice du recyclage et de la réutilisation ?

Blocs de verre brut



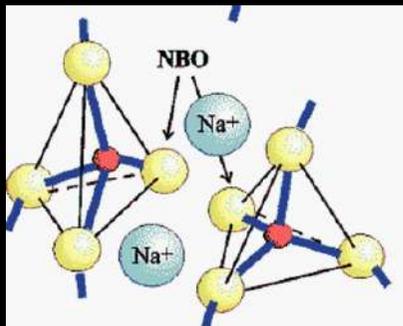
La matière dont est fait le verre



formateur de réseau



sable ou galets de quartz

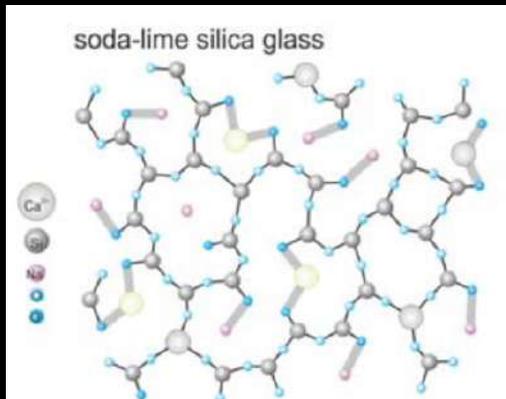


modificateur de réseau

soude minérale (natron)



cendres végétales sodiques ou potassiques

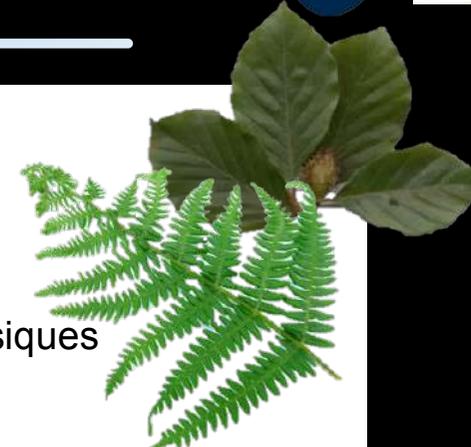
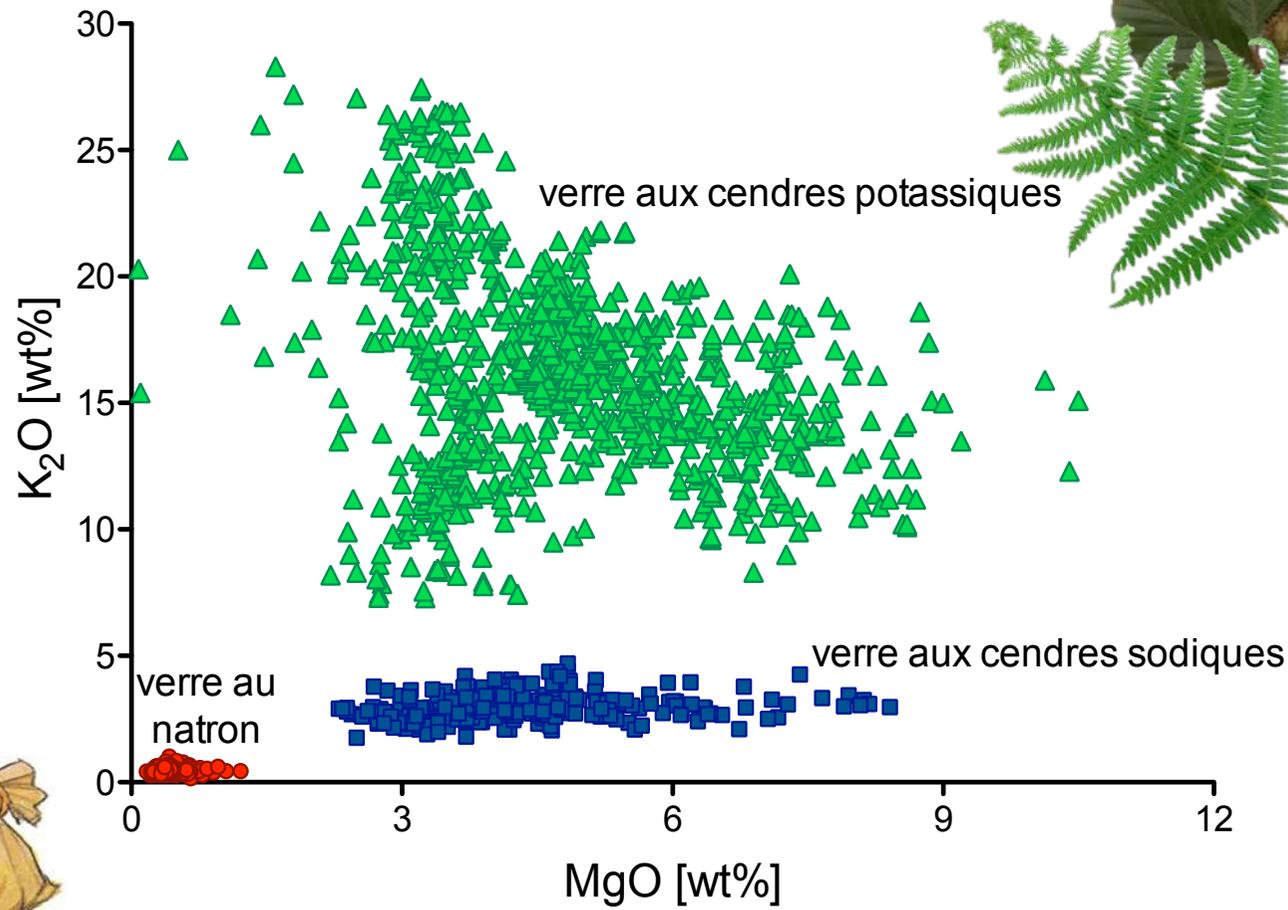


stabilisateur de réseau



coquillages ou calcaire

Les fondants



**hêtre
fougère**



**Plantes halophiles
salicorne**

**natron / trona
sodium bicarbonate**

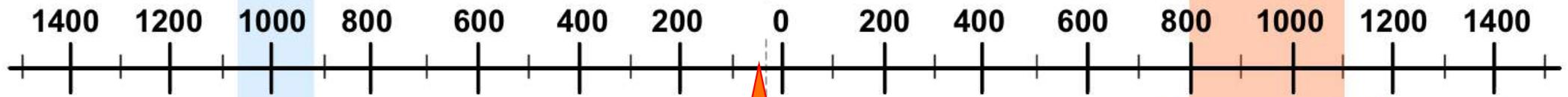


Des grandes mutations de l'industrie verrière



av. notre ère

apr. notre ère



Mésopotamie, Egypte

Perse / Mésopotamie

Monde méditerranéen

Proche Orient

Proche Orient

Empire romain

Europe

Italie du Nord

Europe

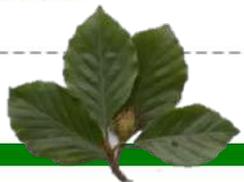
Verres sodo-potassiques

Verres sodiques aux cendres

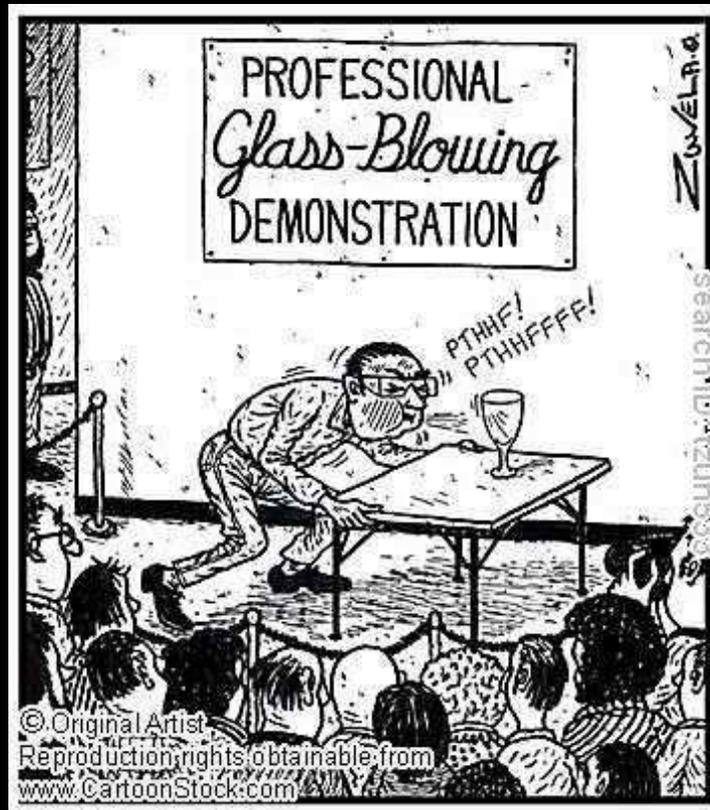
Verres sodiques au natron

Soufflage de verre

Verres aux cendres forestières



L'invention du soufflage du verre ~ 50-40 BCE

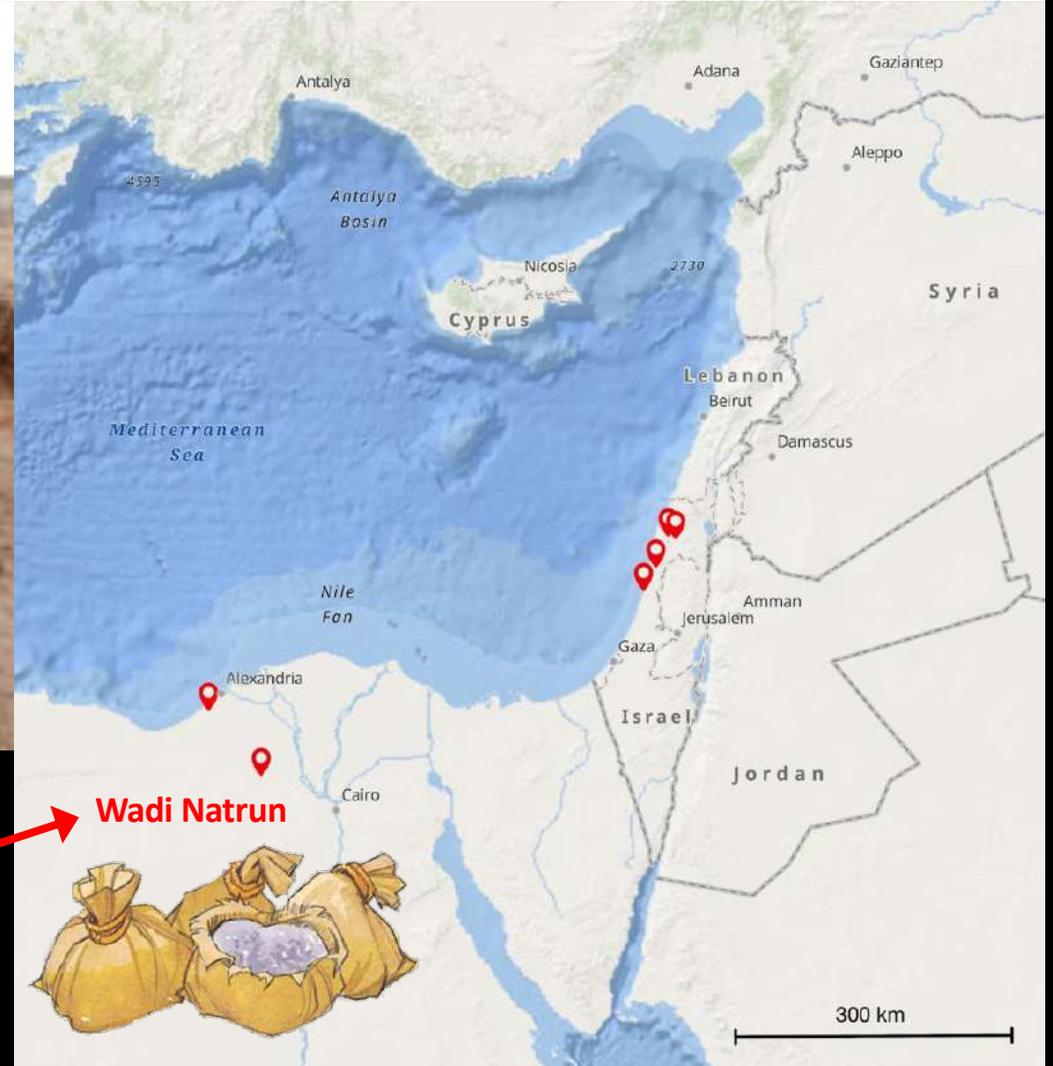


The Ein Gedi bottle. Mid-first century BCE.
H. 12.7 cm. The Israel Museum, Jerusalem.
© The Israel Museum, Jerusalem/by Peter Lany.

Peu de sites de production primaire < 800 CE



Wadi Natrun, Beni Salama (Egypt), four primaire, 1e – 2e siècle CE © M.-D. Nenna



Pendant la majeure partie du premier millénaire BCE & CE, la principale source d'alcali était le natron minéral (trona – sesquicarbonate de sodium) du Wadi Natrun en Égypte.

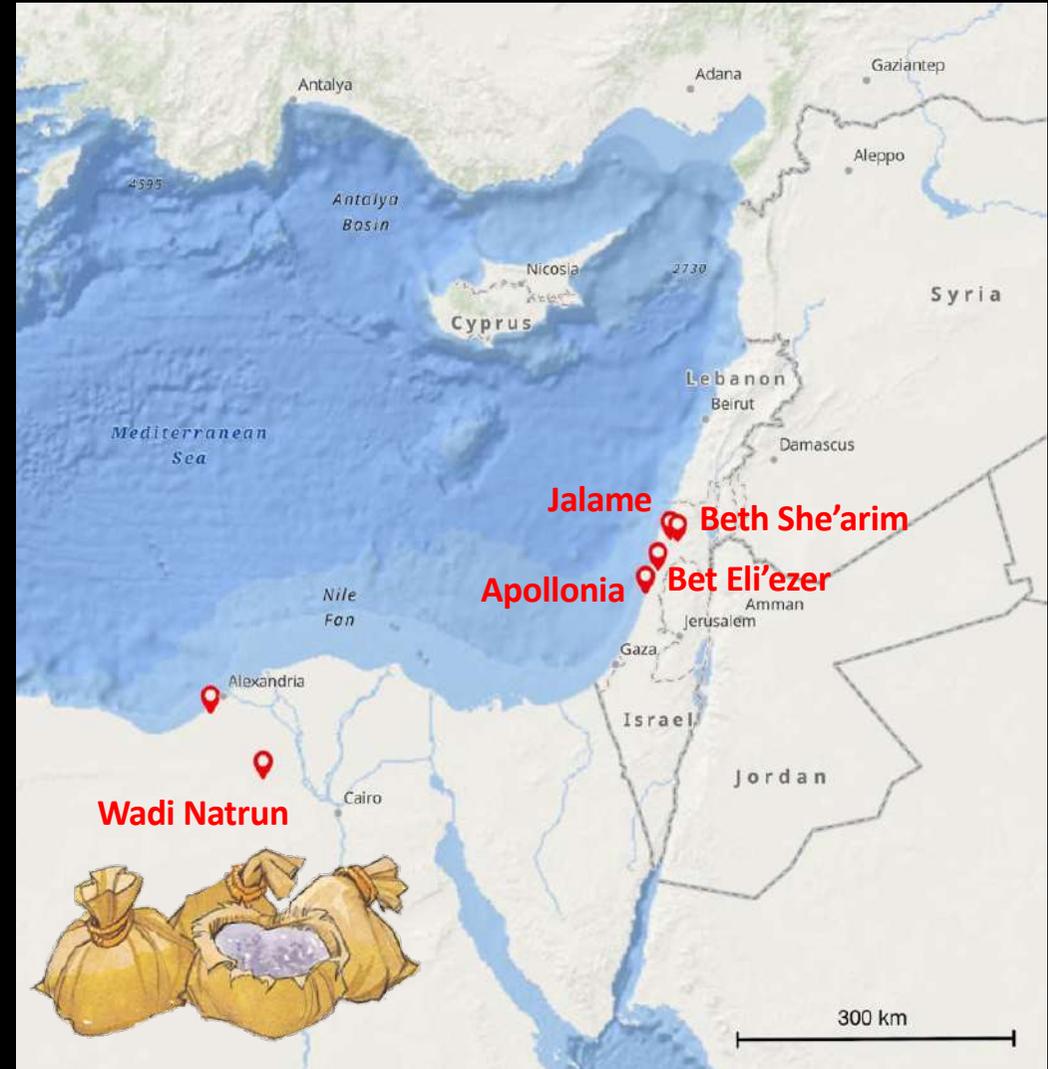
Peu de sites de production primaire < 800 CE



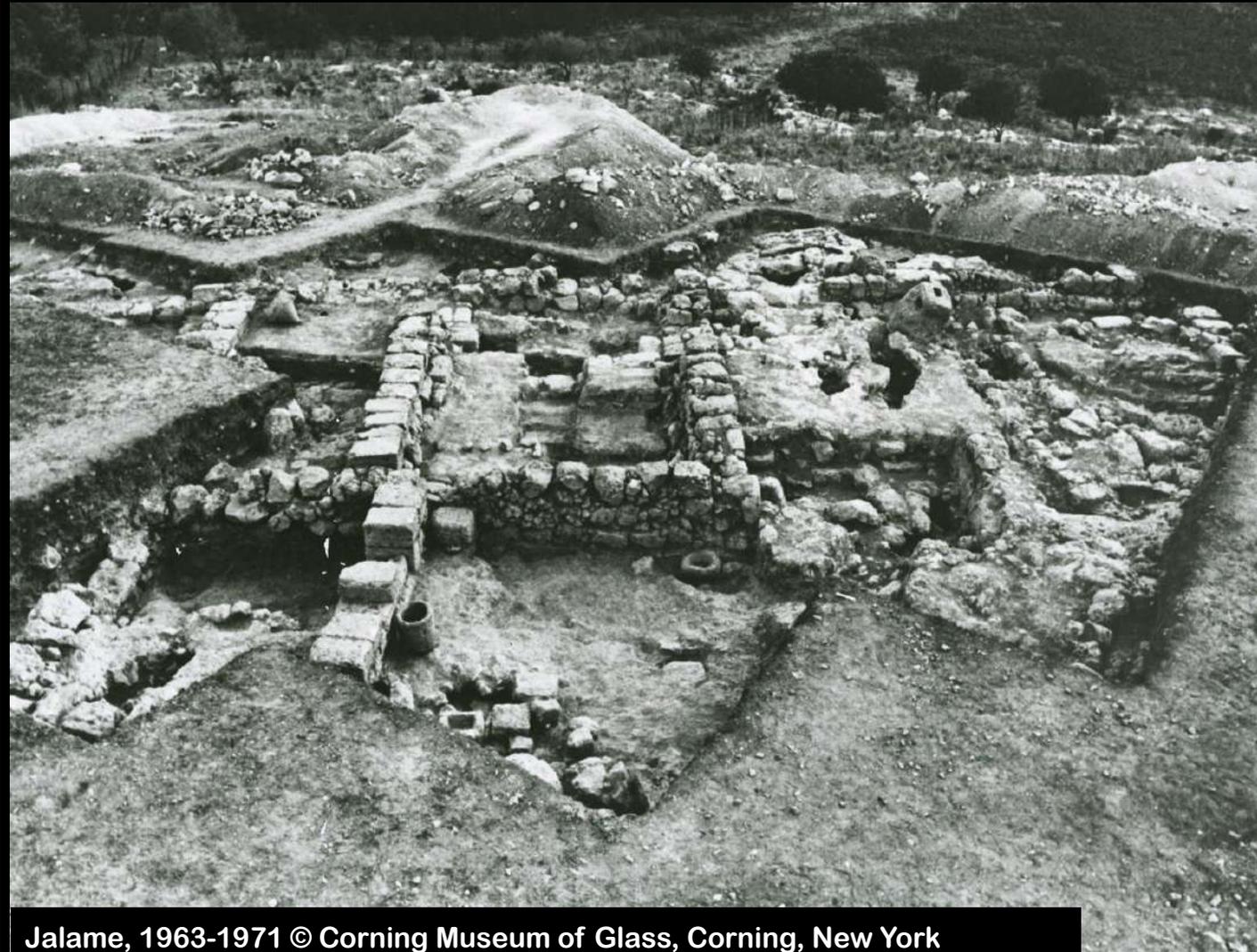
Bet Eli'ezer, Israel (8th century), photo: J Rosen



9 tons glass slab at Beth She'arim, Israel (9th century)
<http://www.cmog.org/article/mystery-slab-beth-shearim>

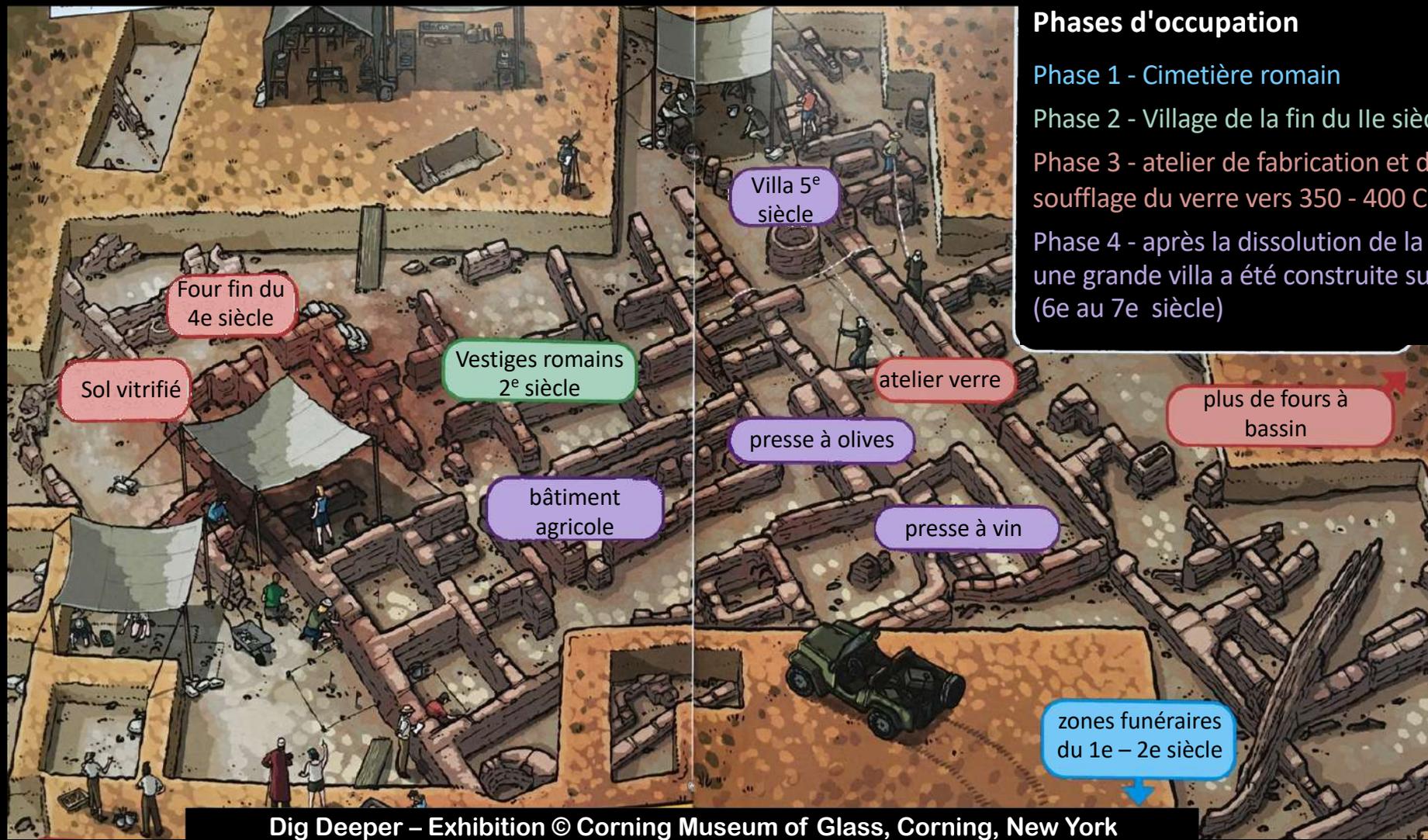


L'atelier de verrerie du 4^e siècle à Jalame (Palestine)



Jalame, 1963-1971 © Corning Museum of Glass, Corning, New York

L'atelier de verrerie du 4^e siècle à Jalame (Palestine)



Phases d'occupation

Phase 1 - Cimetière romain

Phase 2 - Village de la fin du II^e siècle

Phase 3 - atelier de fabrication et de soufflage du verre vers 350 - 400 CE

Phase 4 - après la dissolution de la verrerie, une grande villa a été construite sur le site (6^e au 7^e siècle)

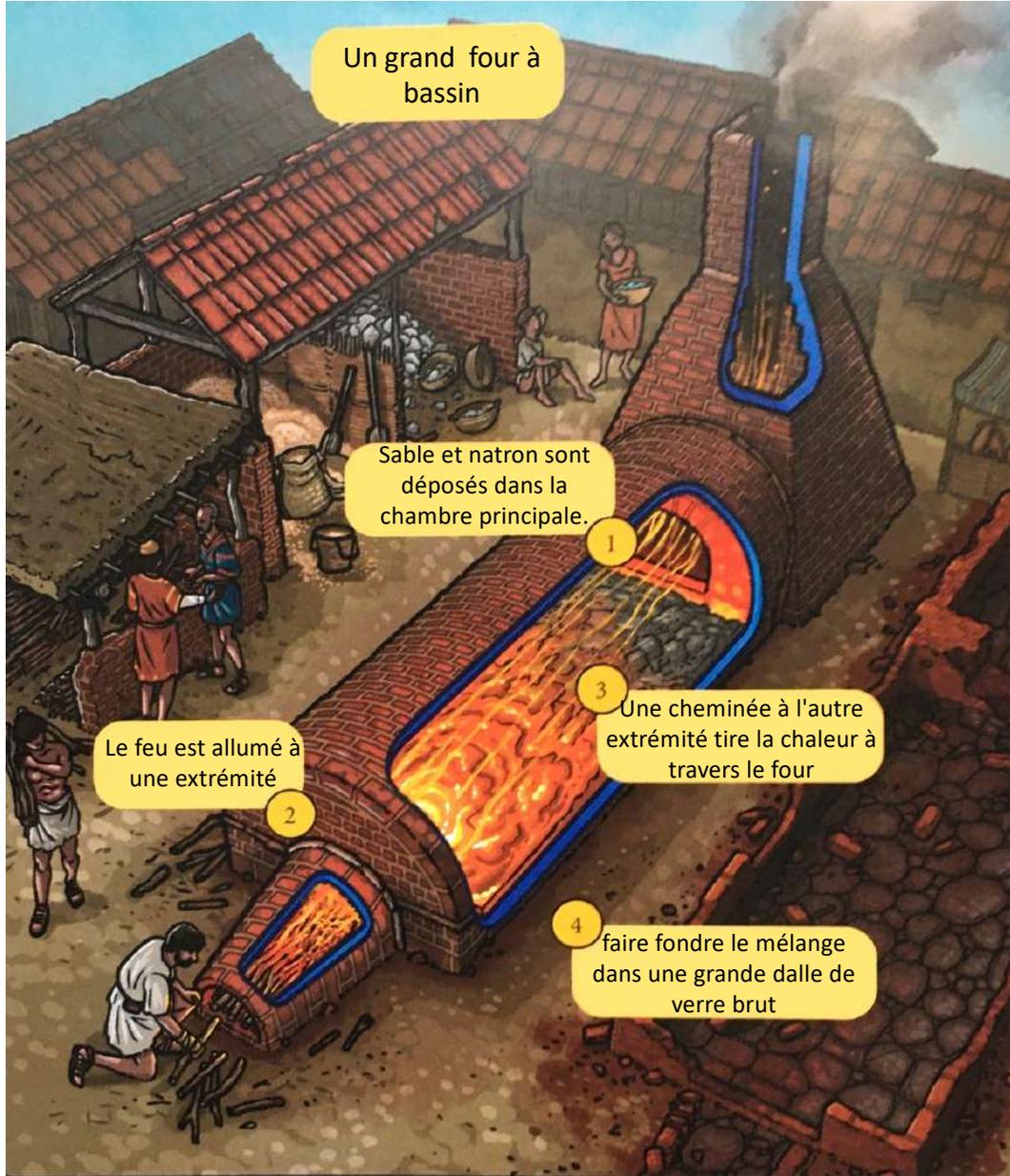
Un grand four à bassin

1
Sable et natron sont déposés dans la chambre principale.

2
Le feu est allumé à une extrémité

3
Une cheminée à l'autre extrémité tire la chaleur à travers le four

4
faire fondre le mélange dans une grande dalle de verre brut



5
une fois le four refroidi, il est démonté

6
la grande dalle est ensuite cassée en morceaux



Photo: Yael Gorin-Rosen

Bloc de verre brut d'origine levantine trouvé à l'Abbaye de Jumièges



Production primaire < 800 CE



Témoignages archéologiques

Wadi Natrun 1^e – 2^e siècles

Jalame 4^e siècle

Apollonia 6^e – 7^e siècle

Bet Eli'ezer 8^e siècle

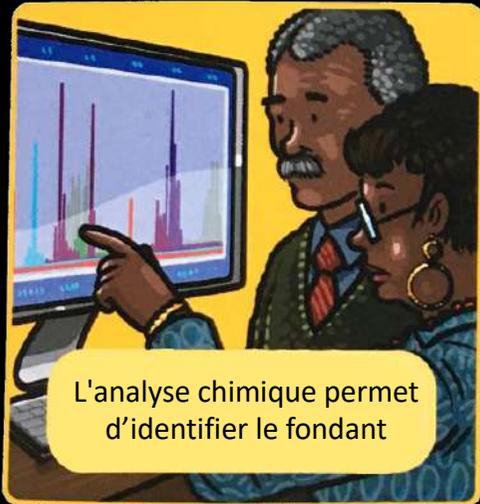
Preuve analytique !!!

Les verres provenant de différentes régions de production peuvent être distingués en termes de composition

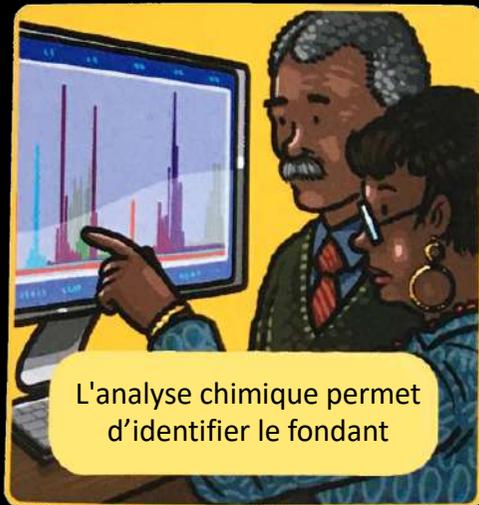


Blocs de verre brut de Jalame © Corning Museum of Glass, Corning, New York

L'analyse chimique du verre



L'analyse chimique du verre



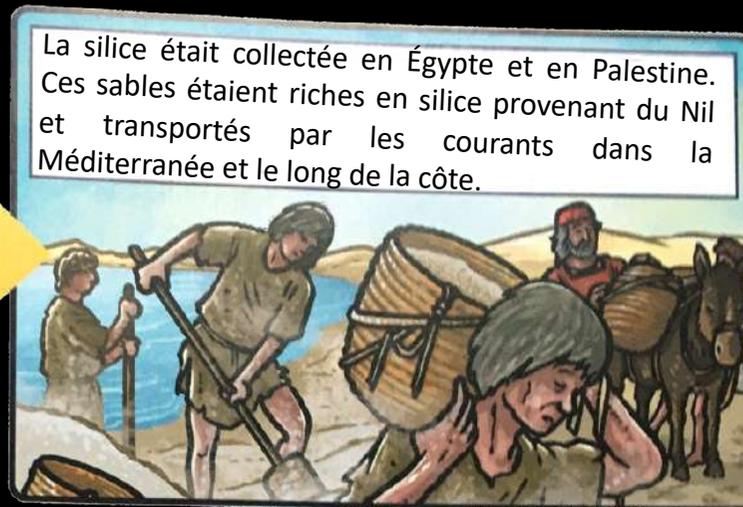
L'analyse chimique permet d'identifier le fondant



Le natron était extrait presque exclusivement dans le Wadi Natrun en Égypte, d'où il était ensuite importé en Palestine.



L'analyse chimique permet de déterminer l'origine de la silice



La silice était collectée en Égypte et en Palestine. Ces sables étaient riches en silice provenant du Nil et transportés par les courants dans la Méditerranée et le long de la côte.

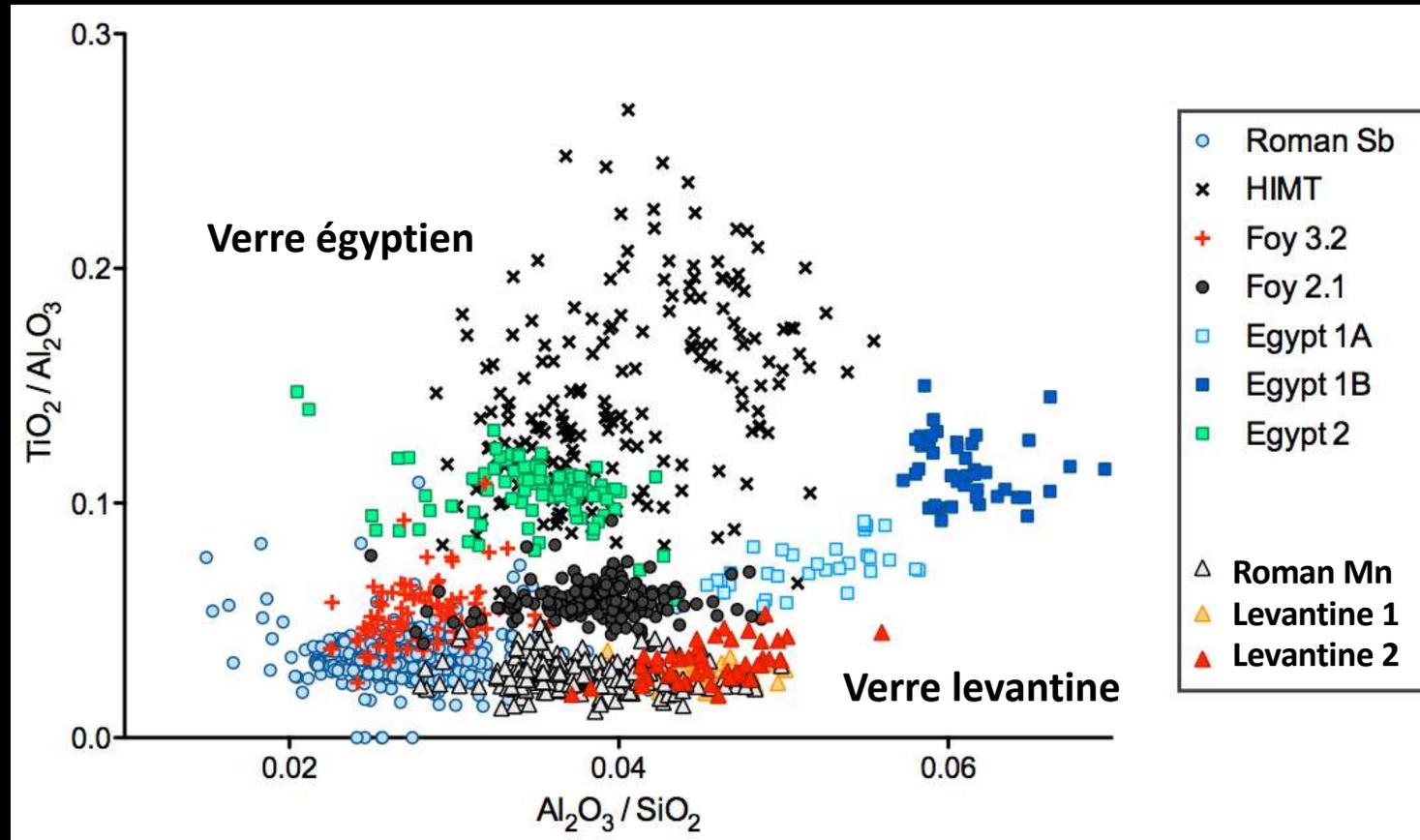


Verre au natron < 800 CE

Legend																																													
■ Natron																																													
■ Sand																																													
■ Lime																																													
■ (De)colourants																																													
■ Not commonly reported																																													
1 H Hydrogen 1.00794																	2 He Helium 4.002602																												
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012182																	5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.0107	7 N Nitrogen 14.00674	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.9984032	10 Ne Neon 20.1797																						
11 Na Sodium 22.98976928	12 Mg Magnesium 24.305																	13 Al Aluminium 26.9815386	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973762	16 S Sulfur 32.065	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948																						
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955912	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938045	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.9332	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.9216	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798																												
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdenum 95.96	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.9055	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.29																												
55 Cs Cesium 132.9054519	56 Ba Barium 137.327	57 La Lanthanum 138.90547	58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodymium 140.90768	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92535	66 Dy Dysprosium 162.5	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.054	71 Lu Lutetium 174.967	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.94788	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.227	78 Pt Platinum 195.084	79 Au Gold 196.966569	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.9804	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)														
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (268)	106 Sg Seaborgium (271)	107 Bh Bohrium (272)	108 Hs Hassium (278)	109 Mt Meitnerium (276)	110 Ds Darmstadtium (281)	111 Rg Roentgenium (280)	112 Cn Copernicium (285)	113 Uut Ununtrium (284)	114 Fl Flerovium (289)	115 Uup Ununpentium (288)	116 Lv Livermorium (293)	117 Uus Ununseptium (294)	118 Uuo Ununoctium (294)																												
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>58 Ce Cerium 140.116</td> <td>59 Pr Praseodymium 140.90768</td> <td>60 Nd Neodymium 144.242</td> <td>61 Pm Promethium (145)</td> <td>62 Sm Samarium 150.36</td> <td>63 Eu Europium 151.964</td> <td>64 Gd Gadolinium 157.25</td> <td>65 Tb Terbium 158.92535</td> <td>66 Dy Dysprosium 162.5</td> <td>67 Ho Holmium 164.93032</td> <td>68 Er Erbium 167.259</td> <td>69 Tm Thulium 168.93421</td> <td>70 Yb Ytterbium 173.054</td> <td>71 Lu Lutetium 174.967</td> </tr> <tr> <td>90 Th Thorium 232.0376</td> <td>91 Pa Protactinium 231.03688</td> <td>92 U Uranium 238.02891</td> <td>93 Np Neptunium (237)</td> <td>94 Pu Plutonium (244)</td> <td>95 Am Americium (243)</td> <td>96 Cm Curium (247)</td> <td>97 Bk Berkelium (247)</td> <td>98 Cf Californium (251)</td> <td>99 Es Einsteinium (252)</td> <td>100 Fm Fermium (257)</td> <td>101 Md Mendelevium (258)</td> <td>102 No Nobelium (259)</td> <td>103 Lr Lawrencium (262)</td> </tr> </tbody> </table>																		58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.90768	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92535	66 Dy Dysprosium 162.5	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.054	71 Lu Lutetium 174.967	90 Th Thorium 232.0376	91 Pa Protactinium 231.03688	92 U Uranium 238.02891	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)
58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.90768	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92535	66 Dy Dysprosium 162.5	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.054	71 Lu Lutetium 174.967																																
90 Th Thorium 232.0376	91 Pa Protactinium 231.03688	92 U Uranium 238.02891	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)																																

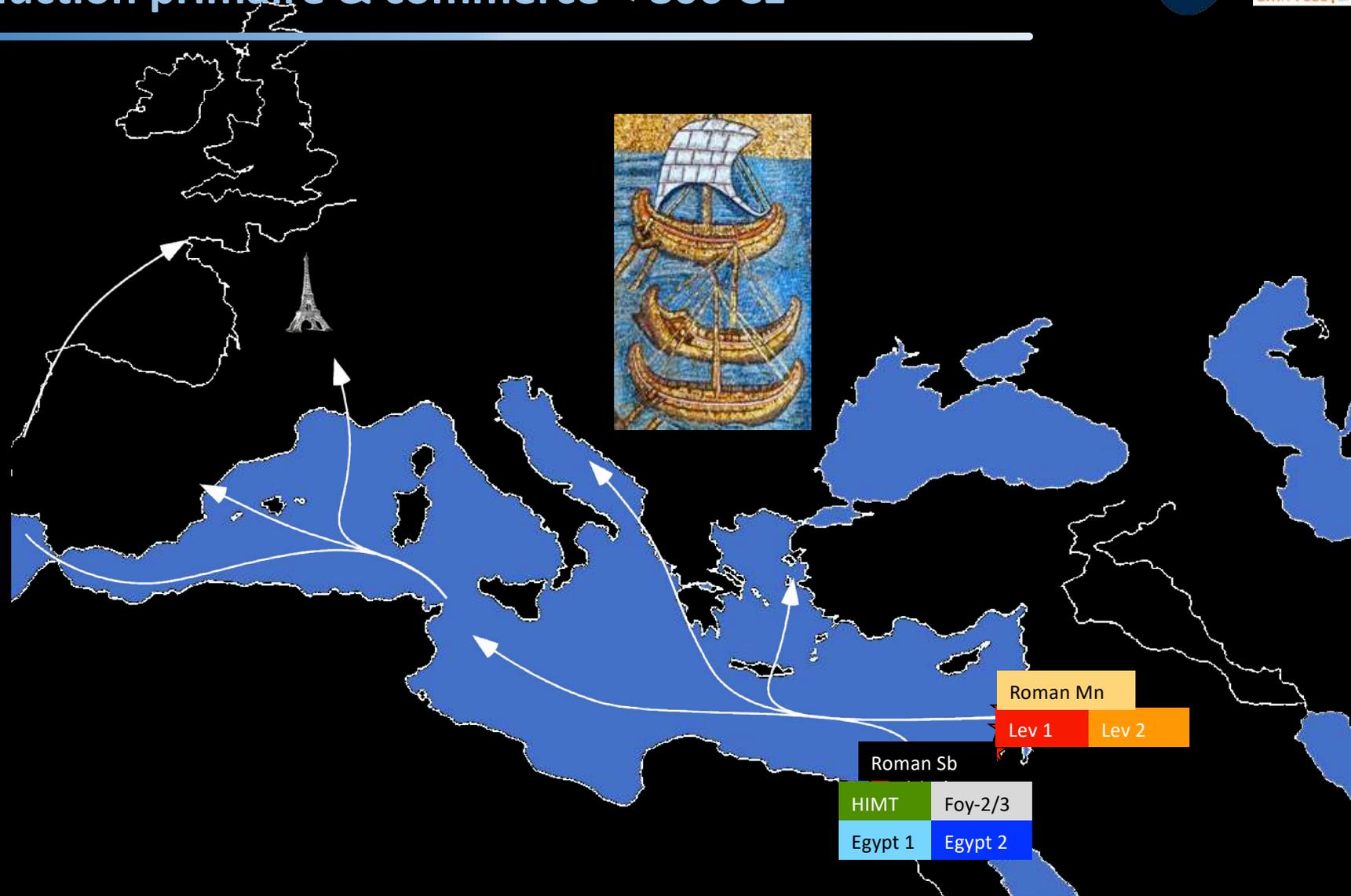
Tableau périodique avec indication des sources les plus probables des éléments dans le verre au natron. © (Brems et al., 2014)

Production primaire < 800 CE



Nous pouvons actuellement distinguer environ 10 groupes de composition différents sur la base de l'analyse de la composition du verre.

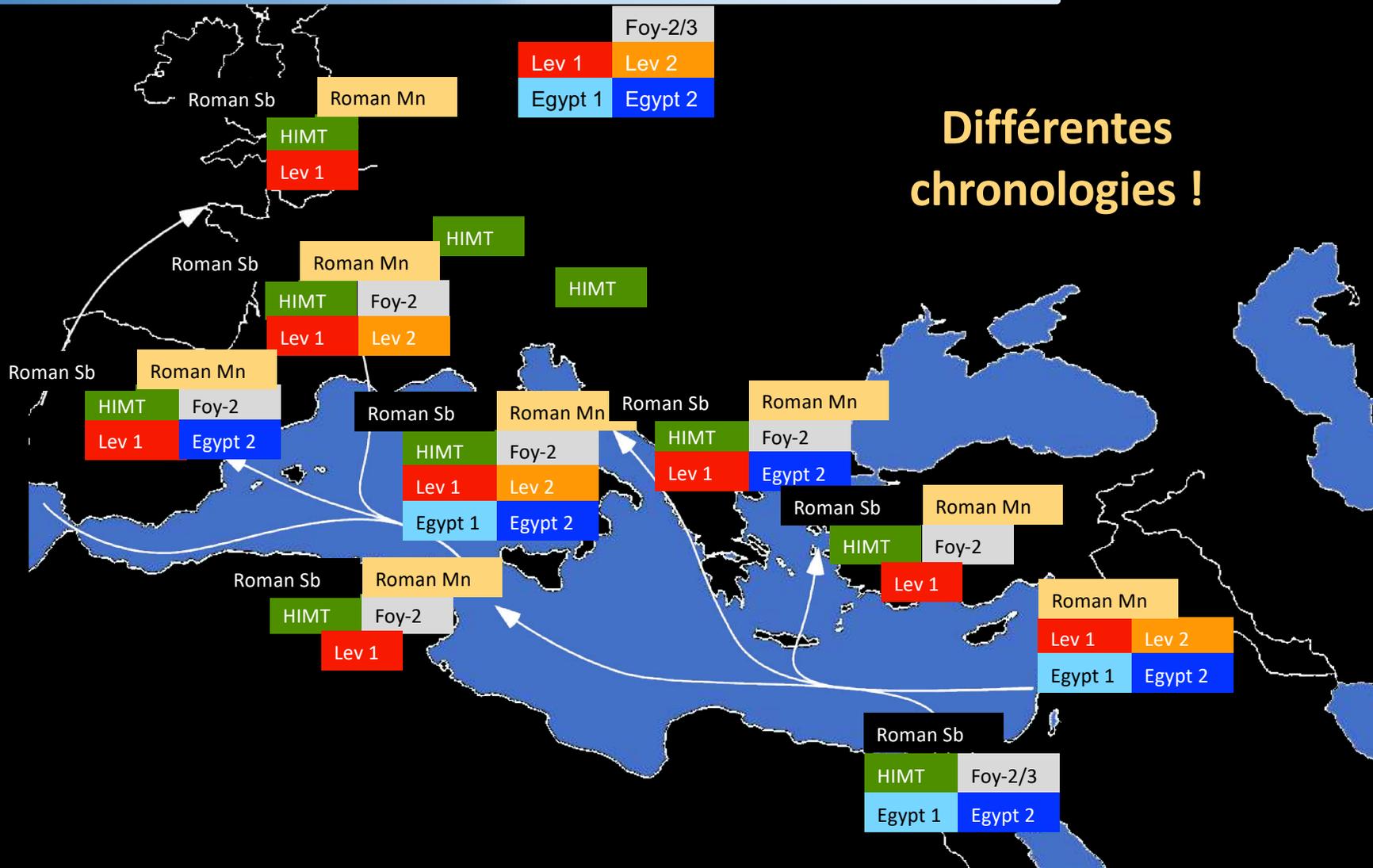
Production primaire & commerce < 800 CE



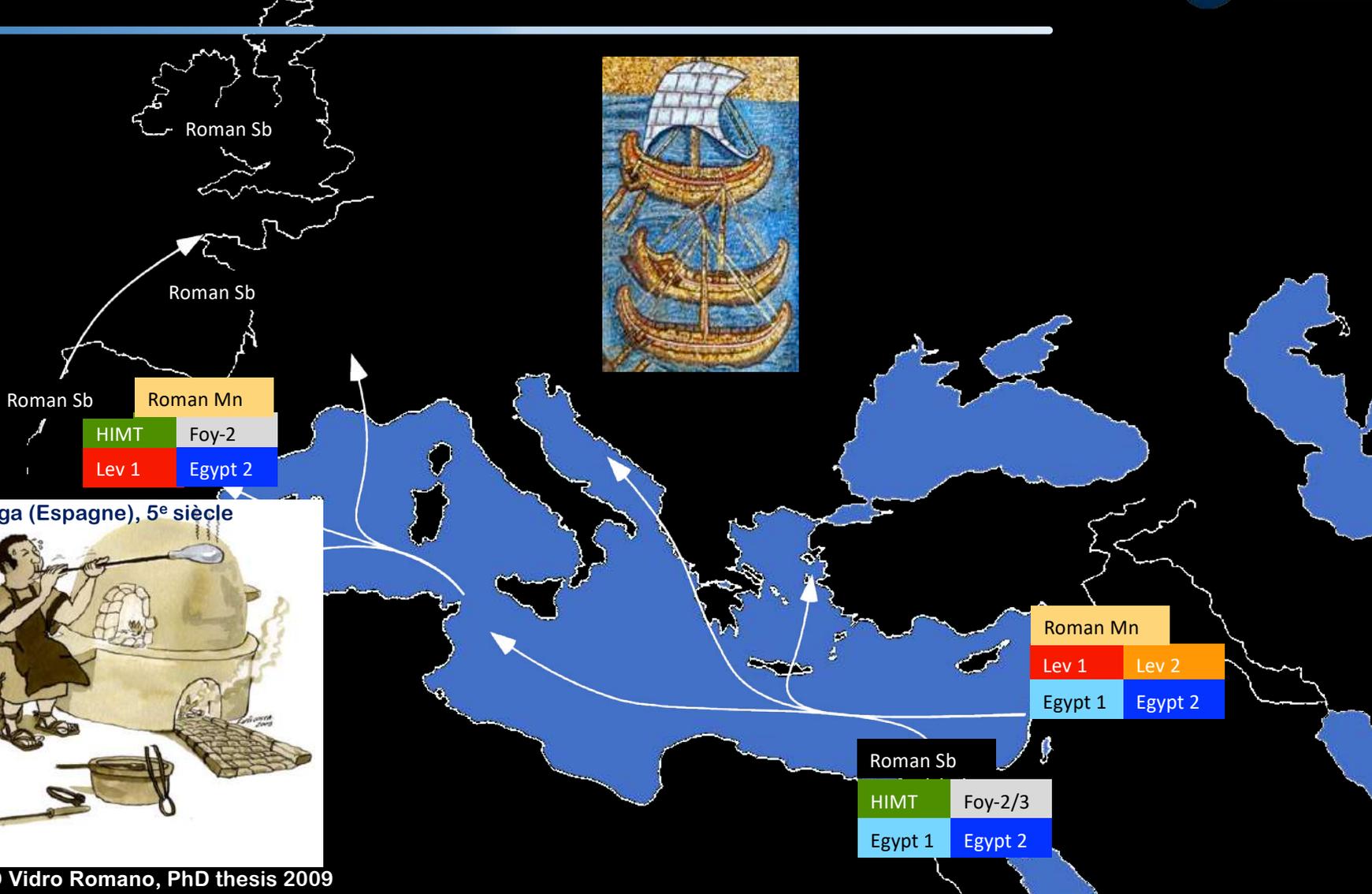
Production primaire & commerce < 800 CE



Différentes chronologies !



Ateliers secondaire - refonte et travail



Atelier à Braga (Espagne), 5^e siècle



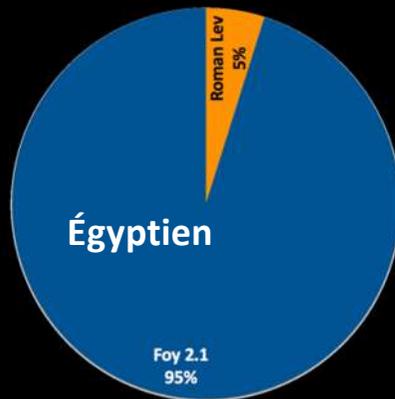
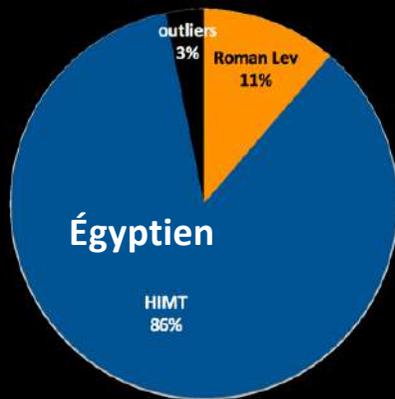
M. Da Cruz, O Vidro Romano, PhD thesis 2009

Étude de cas - la péninsule ibérique



l'époque romaine
tardive 4^e – 5^e siècle

antiquité tardive
6^e siècle



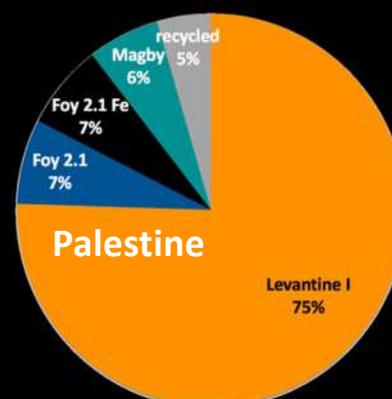
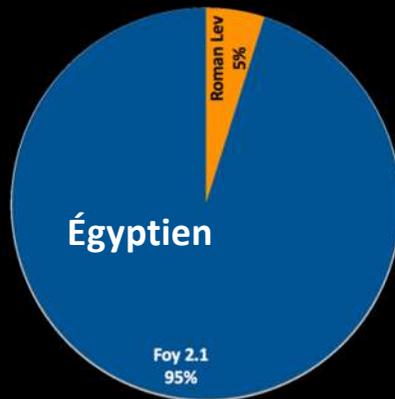
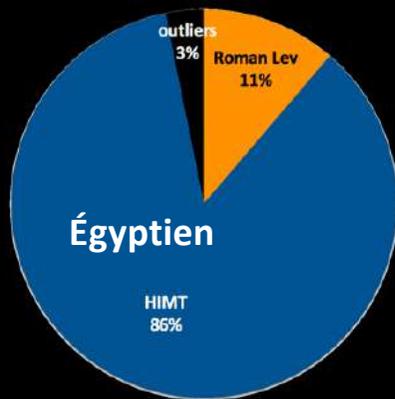
Étude de cas - la péninsule ibérique



l'époque romaine
tardive 4^e – 5^e siècle

antiquité tardive
6^e siècle

période wisigothique
6^e - 8^e siècle



Étude de cas - la péninsule ibérique

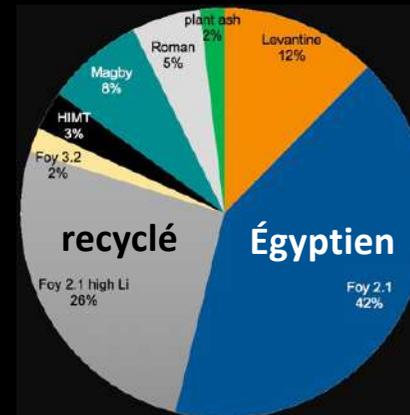
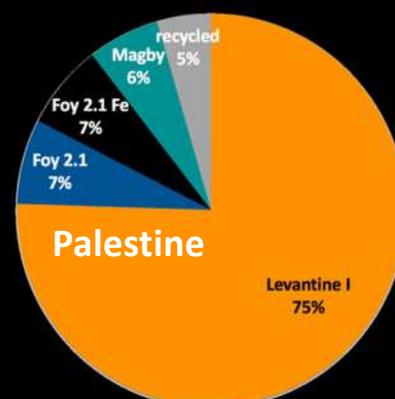
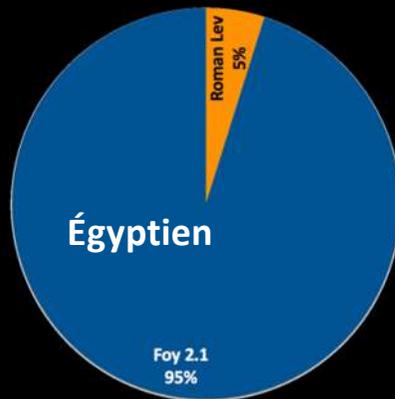
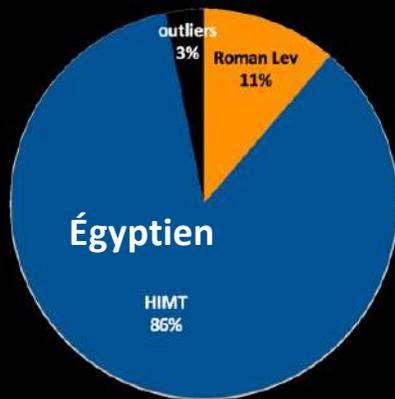


l'époque romaine
tardive 4^e – 5^e siècle

antiquité tardive
6^e siècle

période wisigothique
6^e - 8^e siècle

wisigothique et début
islamique 7^e - 9^e siècle



Étude de cas - la péninsule ibérique



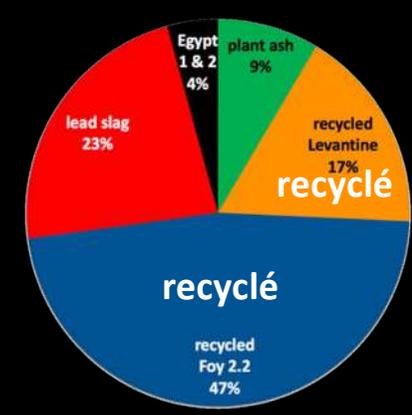
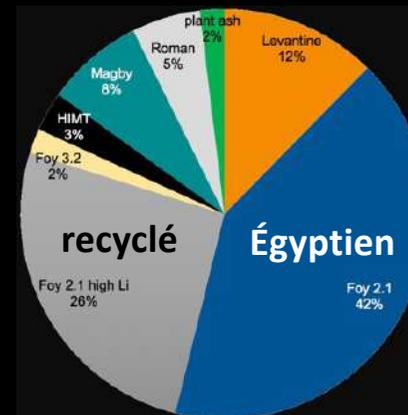
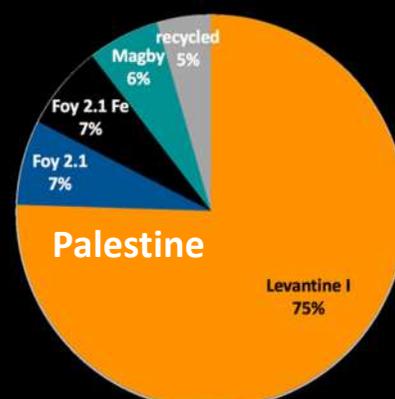
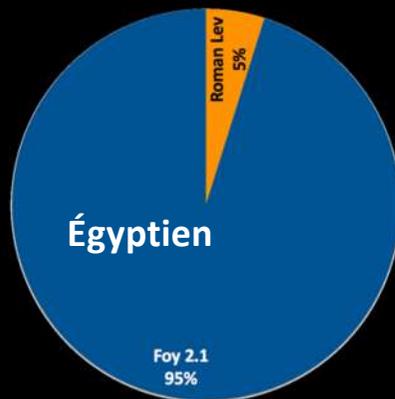
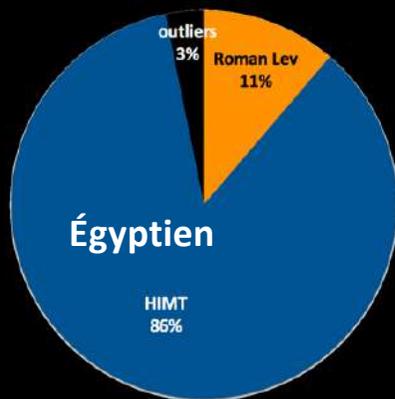
l'époque romaine
tardive 4^e – 5^e siècle

antiquité tardive
6^e siècle

période wisigothique
6^e - 8^e siècle

wisigothique et début
islamique 7^e - 9^e siècle

période islamique
8^e - 9^e siècle



Preuves analytiques du recyclage du verre

- Exemples de recyclage
- Marqueurs de recyclage
- l'organisation du recyclage
- dimensions socio-économiques



Broken glass from the Serçe Limani
shipwreck, ca 1025 CE
© INA GW-1393, REF 4378

Compositions mixtes - recyclage à l'époque romaine

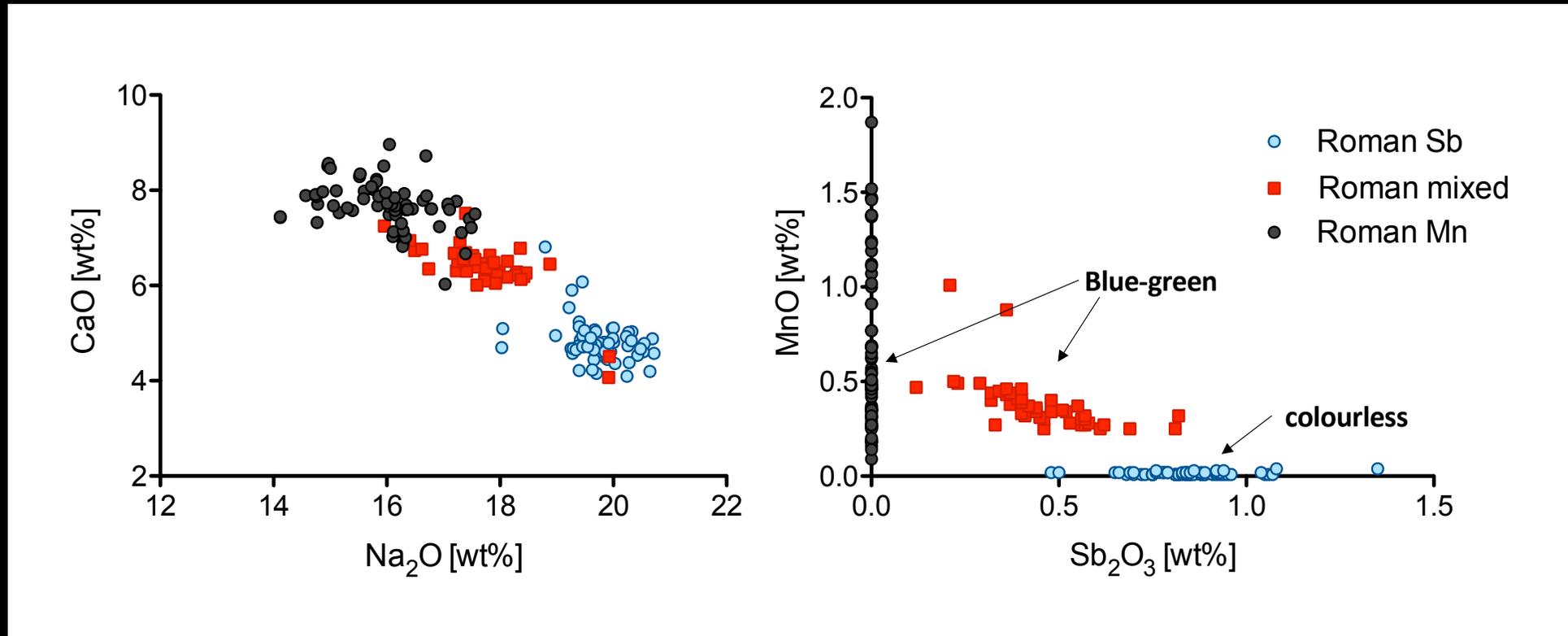


Épave « Iulia Felix » - recyclage à l'époque romaine



Épave de Iulia Felix, première moitié du II^e siècle de notre ère
in situ (Soprintendenza Archeologia Friuli-Venezia Giulia)
Modèle 3D de l'épave et de la cargaison in situ (Costa & Beltrame, 2021)

Compositions mixtes - recyclage à l'époque romaine



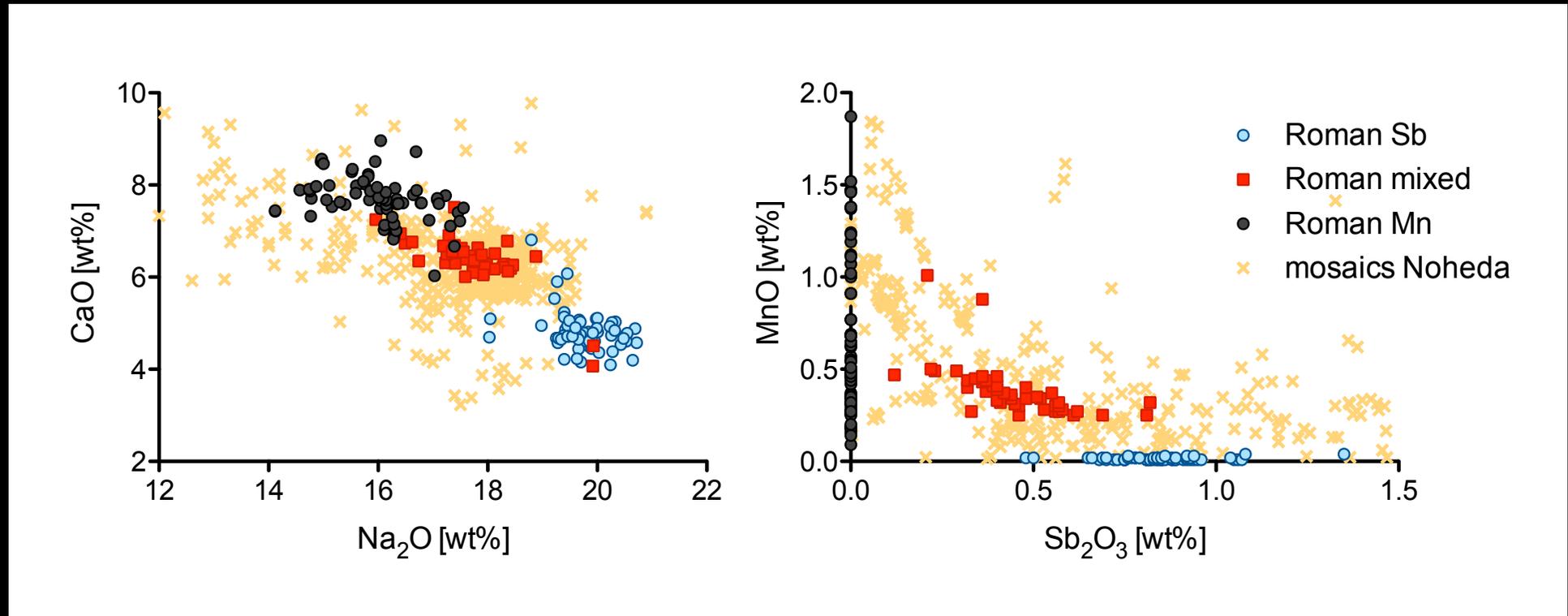
Data from Silvestri et al. (2008) and Silvestri (2008)

Tonneau d'environ 140 kg de verre de récipient brisé

Incolore > 3 000 fragments

Faiblement coloré (bleuâtre, verdâtre, bleu-vert) > 6 000 fragments

Tesselles de mosaïque - recyclage à l'époque romaine



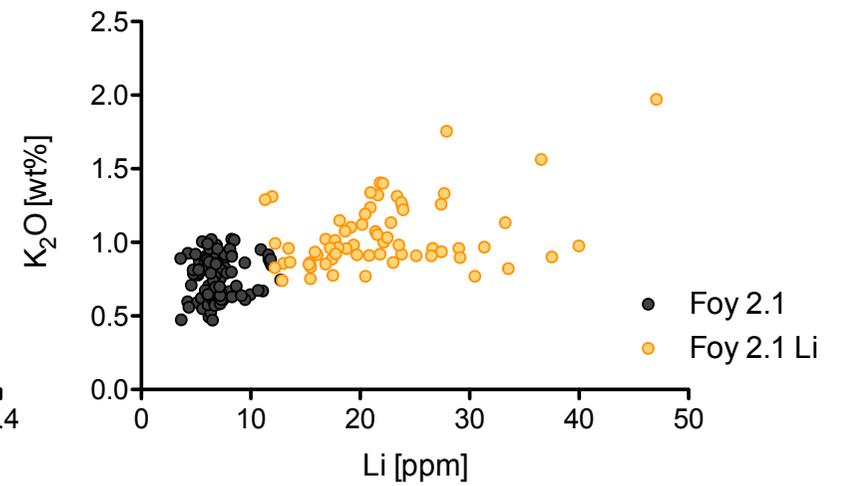
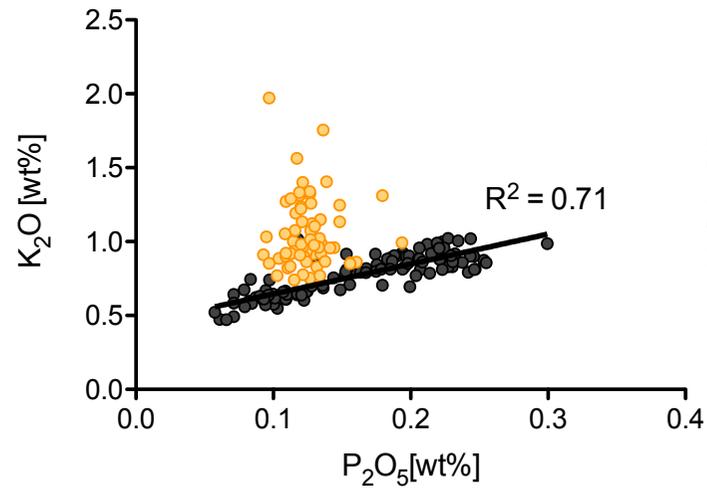
Noheda data from Schibille et al. (2020)

Tesselles de mosaïque - recyclage à l'époque romaine



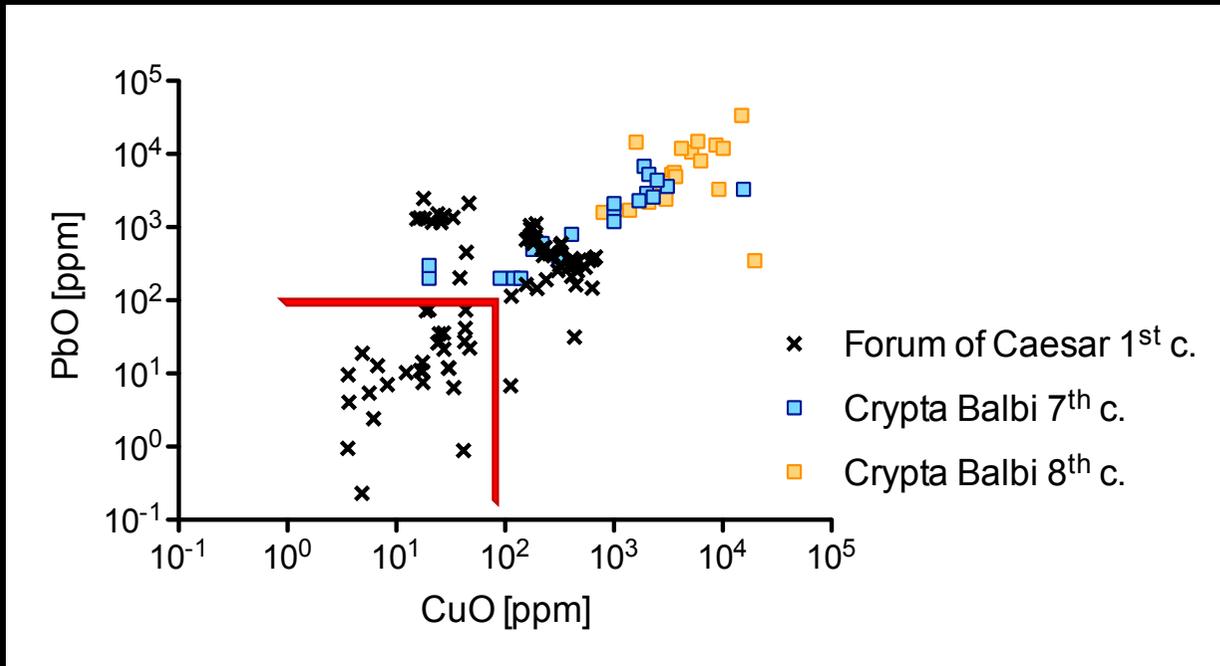
4th-century Roman Villa in Noheda (Spain), elaborate floor mosaic with large amount of glass tesserae

Contamination accidentelle - environnement du four / combustible



Schibille et al. (2022)

Contamination accidentelle - colorants et opacifiants



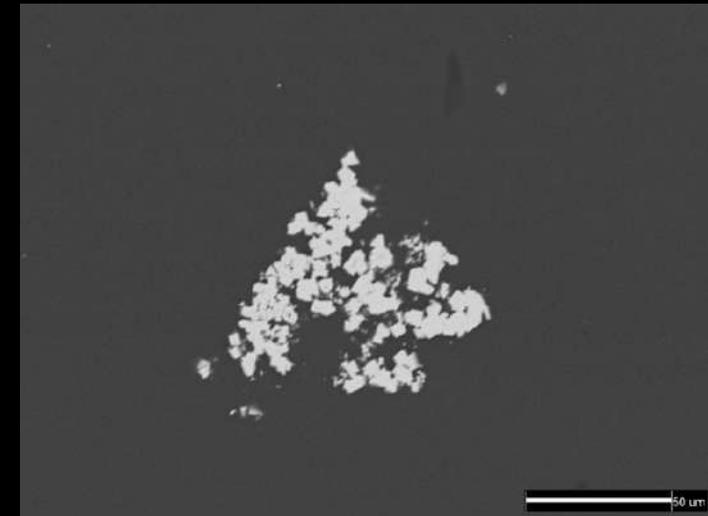
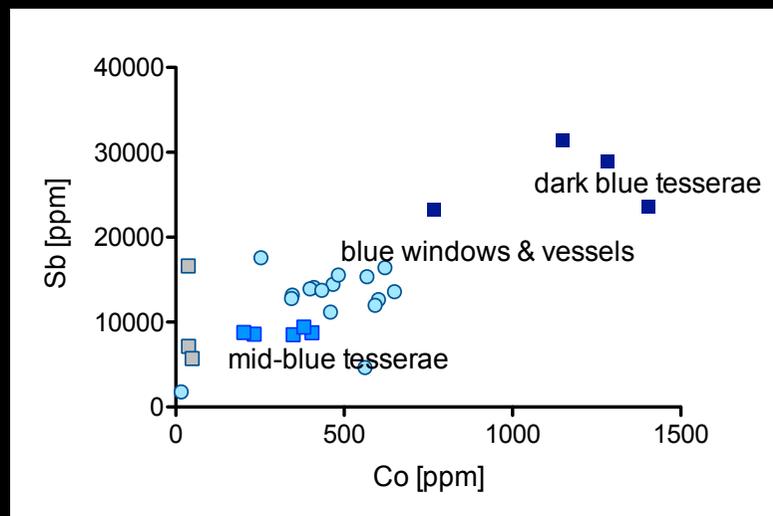
Crypta Balbi data (Mirti et al. 2000 & 2001); Forum of Caesar (unpublished data)

Augmentation des colorants & opacifiants

dans du verre par ailleurs non coloré au-dessus des niveaux de fond de la source de silice, par exemple CuO ou PbO > 100 ppm

l'incorporation accidentelle de calcin coloré (verre brisé)

Le recyclage au début de la période médiévale



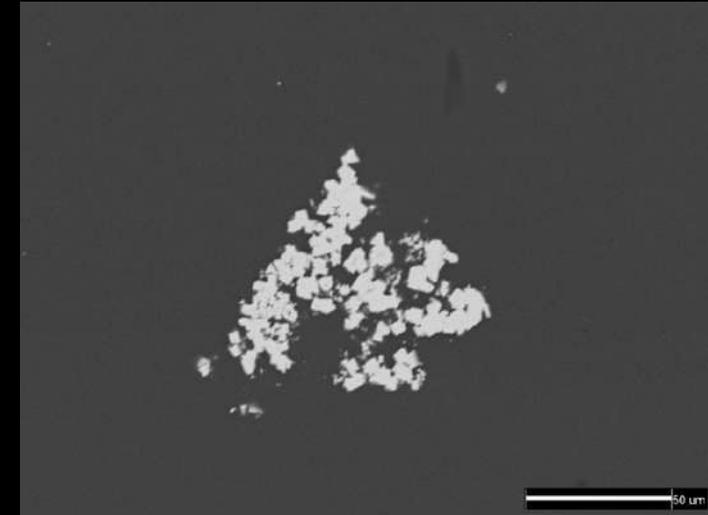
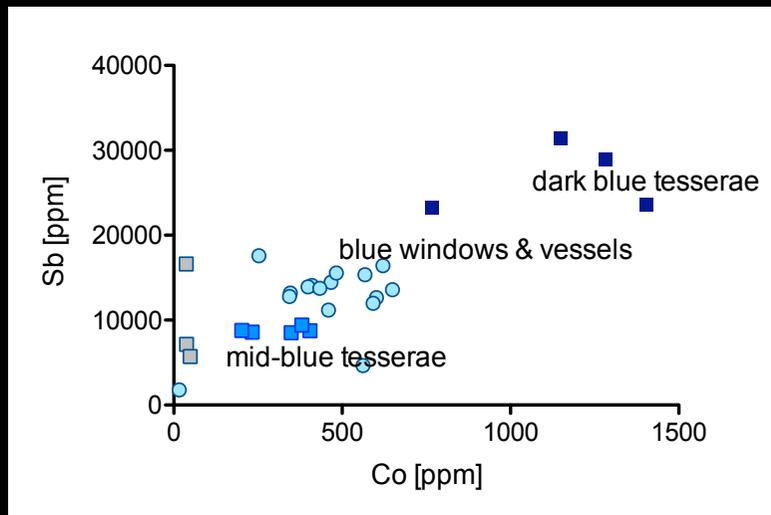
Schibille & Freestone (2013)

Schauss (2008), MSc, University of Cardiff



San Vincenzo al Volturno,
9th-century monastery in Southern Italy

Le recyclage au début de la période médiévale



Schibille & Freestone (2013)

Schauss (2008), MSc, University of Cardiff



San Vincenzo al Volturno,
9th-century monastery in Southern Italy

Recyclage des tesselles de mosaïque du 1^e au 3^e siècle

Les tesselles bleues de cobalt ont été utilisées pour produire du verre bleu translucide pour les fenêtres et les récipients.

Le recyclage au début de la période médiévale

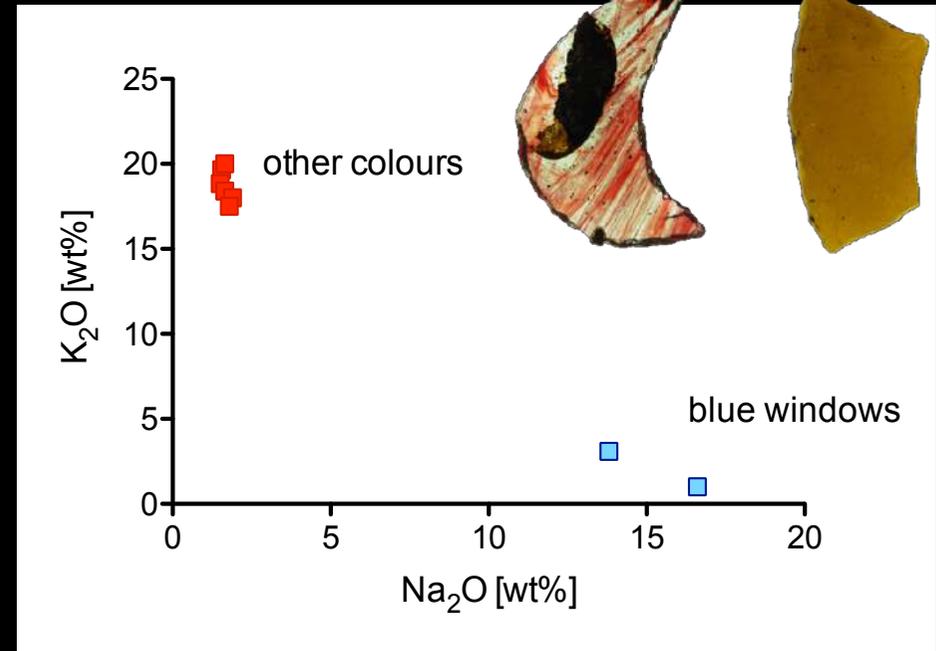
Roman tesserae



Carolingian windows



Le recyclage au début de la période médiévale



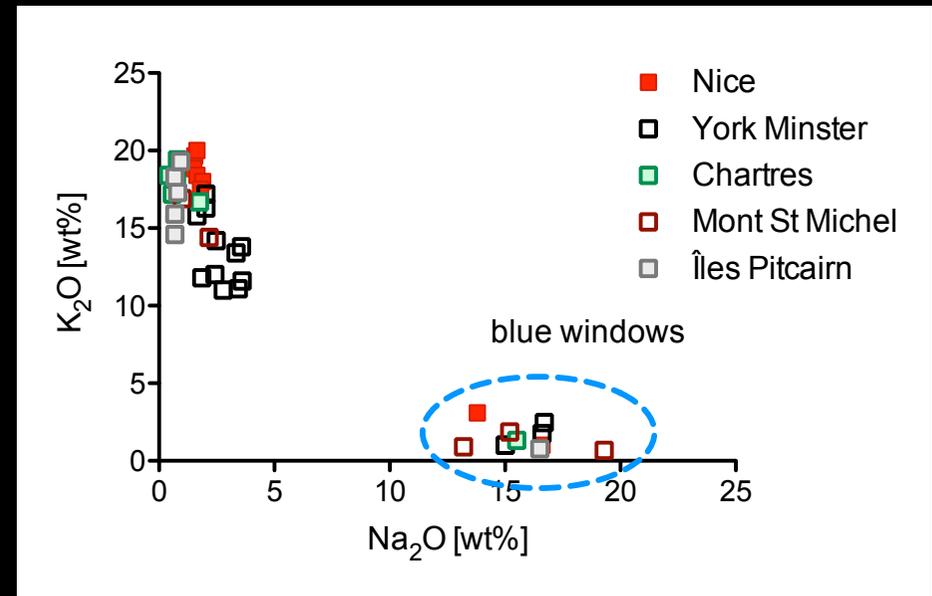
Vitraux de l'ancienne cathédrale de Nice (11e siècle), Pactat (2022)

Le recyclage au début de la période médiévale



Bleu de Chartres
verre au natron

Notre-Dame de la Belle Verrière,
Cathédrale de Chartres
Fin du 12e siècle



Data from Brill (1999)

Le recyclage au début de la période médiévale



- Verre romain de type natron
- Colorant romain au cobalt
- Opacifiant à l'antimoine datant d'avant le 4^e siècle

MAIS l'objet est médiéval

**Des objets similaires ont depuis été
découverts dans des contextes
archéologiques sûrs datant du
11^e - 12^e siècle**

Reliquaire Saint Savin, 11^e siècle © Alienor.org, Musées de la ville
de Poitiers et de la Société des Antiquaires de l'Ouest

Le recyclage au début de la période médiévale



XII. DE DIVERSIS VITRI COLORIBUS NON TRANSLUCIDIS

Inveniuntur in antiquis aedificiis paganorum in musivo opere diversa genera vitri, videlicet album, nigrum, viride, croceum, saphireum, rubicundum, purpureum; et non est perspicax, sed densum in modum marmoris, et sunt quasi lapilli quadri, ex quibus fiunt electra in auro, argento et cupro, de quibus in suo loco sufficienter dicemus.

Inveniuntur etiam vascula diversa eorumdem colorum, quae colligunt Franci in hoc opere peritissimi, et saphireum quidem fundunt in furnis suis, addentes ei modicum vitri clari et albi, et faciunt inde tabulas saphiri pretiosas ac satis utiles in fenestris. Faciunt etiam ex purpura et viridi similia.



Dans les anciens bâtiments païens, dans les mosaïques, on trouve différentes sortes de verre, par exemple, du blanc, du noir, du vert, du jaune safran, du bleu, du rouge et du violet ; et le (verre) n'est pas transparent, mais opaque comme le marbre. Et ce sont, pour ainsi dire, des petites pierres en forme de cube, à partir desquelles sont fabriqués les émaux sur l'or, l'argent et le cuivre, dont nous parlerons suffisamment dans un endroit approprié.

Nous trouvons également divers petites vaisselles faits de ces couleurs, qui sont collectés par les Franconiens, très expérimentés dans cette technique. Ils font fondre dans leurs fours, ajoutent un peu de verre incolore clair et obtiennent de précieuses plaques de verre bleu, qui conviennent bien pour être utilisées comme vitres. Ils les fabriquent également (les vitres) à partir de verre violet et vert.

Theophilus (1070-1125 CE), De Diversis Artibus

Sources écrites sur le recyclage du verre



Le verre brisé et sa collecte sont mentionnés dans la littérature de la seconde moitié du 1^e siècle de notre ère.

Martial (*Epigrammata*), Statius (*Silvae*) & Juvenal (*Satires*) font référence à la collecte de verre brisé et à l'échange contre du soufre

Cassius Dio (ca. 165-235 CE) remarque que l'empereur Claude accorde la citoyenneté romaine à un prix aussi bas que la valeur du verre cassé



Dépôt de calcin provenant de Londres ;
la pile mesure environ 0,4 m;

© Historic England



Calcin provenant d'un atelier local,
Augusta Raurica, Suisse, 2^e - 3^e siècles



Morceaux de verre brut et de calcin trouvés
dans un atelier byzantin à Beth Shean, Palestine

© Freestone

Dépôts de calcin (verre brisé)

Camps militaires (e.g. Nijmegen, Guildhall Yard London, Alzey, Hambacher Forest)

Contexte urbain (e.g. Augusta Raurica, Avenches, Trier, London, Sardis, Bet Shean)

Églises (Palaestina Salutaris / Tertia)

Épaves (Iulia Felix, Serçe Limani)



Organisation et importance du recyclage ?



Broken glass from the Serçe Limani shipwreck, ca 1025 CE
© INA GW-1393, REF 4378

Organisation et dimensions socio-économiques



- Le recyclage était omniprésent et le verre était exploité de toutes les manières possibles depuis le 1^e siècle de notre ère.
- Augmentation du recyclage à la fin de l'Antiquité et au début du Moyen Âge
- Économie locale contre échanges à longue distance
- Valeur économique du calcin de verre



Le coût d'un récipient en verre était entre 10 et 20 fois plus élevé que celui d'un récipient en poterie de taille équivalente

Que peut-on apprendre de l'histoire du recyclage du verre ?



➤ Reconnaître la valeur économique et technique du recyclage

Indépendance des importations à longue distance

Économies de carburant et réduction des coûts de production

Source importante de colorants

➤ Sélection et séparation soigneuses des couleurs

Recyclage "à l'identique" pour éviter que les propriétés du verre ne soient "brouillées"

Recyclage illimité (en circuit fermé)

Réutilisation