



ADAPTATION DES OUVRAGES EN MAÇONNERIE AUX NOUVELLES CONDITIONS DE SERVICE

Journée Technique
Vendredi 21 septembre 2017
à l'Amphithéâtre AUGUSTE BRULÉ



IMGC

Maison des Travaux Publics - Paris 8ème
21 septembre 2017

ADAPTATION DES OUVRAGES EN MAÇONNERIE
AUX NOUVELLES CONDITIONS DE SERVICE

ASSAINISSEMENT PAR DESSALEMENT *IN SITU* DES GRÈS EN ŒUVRE DU BARRAGE VAUBAN DE STRASBOURG

Jean-Didier Mertz
jean-didier.mertz@culture.gouv.fr



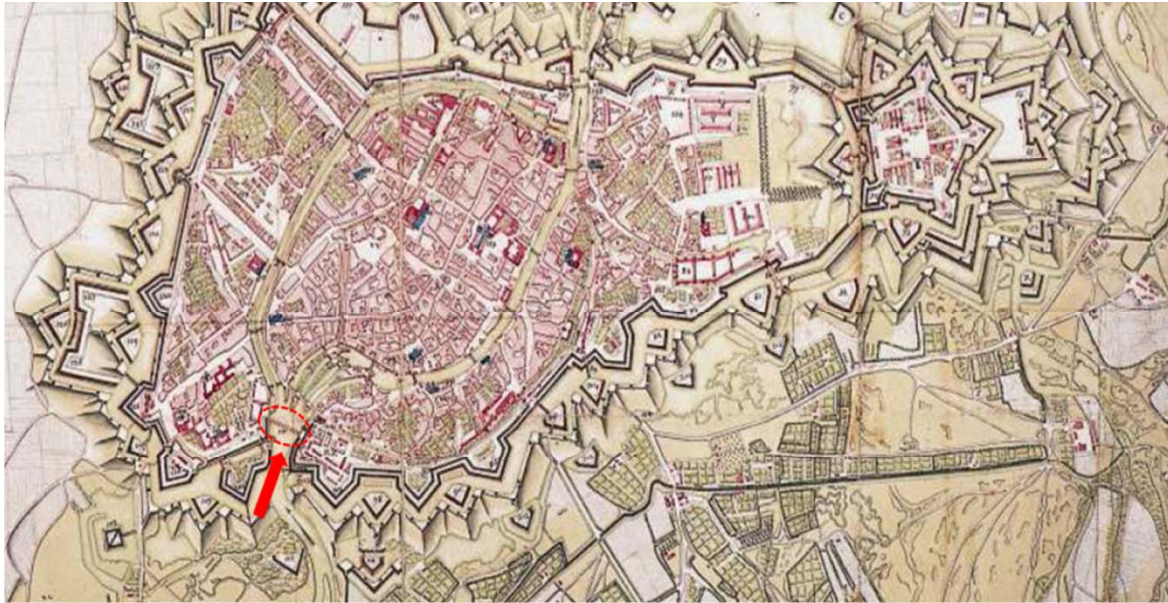
Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques
USR 3224

Plan

- Historique du barrage Vauban
- Altération des grès par les sels
- Principes et mécanisme de dessalement
- Optimisation des compresses
- Suivi d'efficacité et sélection d'une formulation
- Application *in situ*
- Conclusion

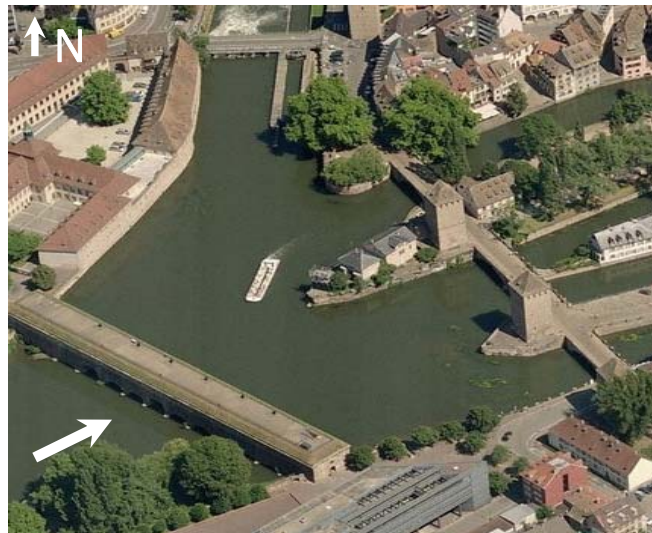
Historique et contexte de l'étude

3



Fortifications Vauban ~1750

*(Service d'Information Géographique,
ville de Strasbourg)*



- Construit en 1686-1700 par J. Tarade, suivant les plans de Vauban
- Protéger la ville en cas de siège
- Réguler les crues de la rivière, l'ill
- «grande écluse», inscrit MH (1971 et 95)

Historique et contexte de l'étude

4

- bâtiment long. 125m et larg. 15m, 3 niveaux et 13 arches
- à l'origine 3 ponts-levis, aujourd'hui 2 voies navigables
- 1965: terrasse panoramique avec talus engazonné sur voûte béton
réfection des enduits sur moellons en grès
- 1987: infiltrations d'eau récurrentes justifiant reprise de l'étanchéité



© www.all-free-photos.com

Altérations par les sels

5



Avant restauration, 2009

- Infiltrations de solutions depuis la terrasse
- Percolation à travers la dalle béton
- Remobilisation des solutions dans les enduits et les mortiers de joints
- Remontées capillaires



cliché LERM, 2008

Altérations par les sels

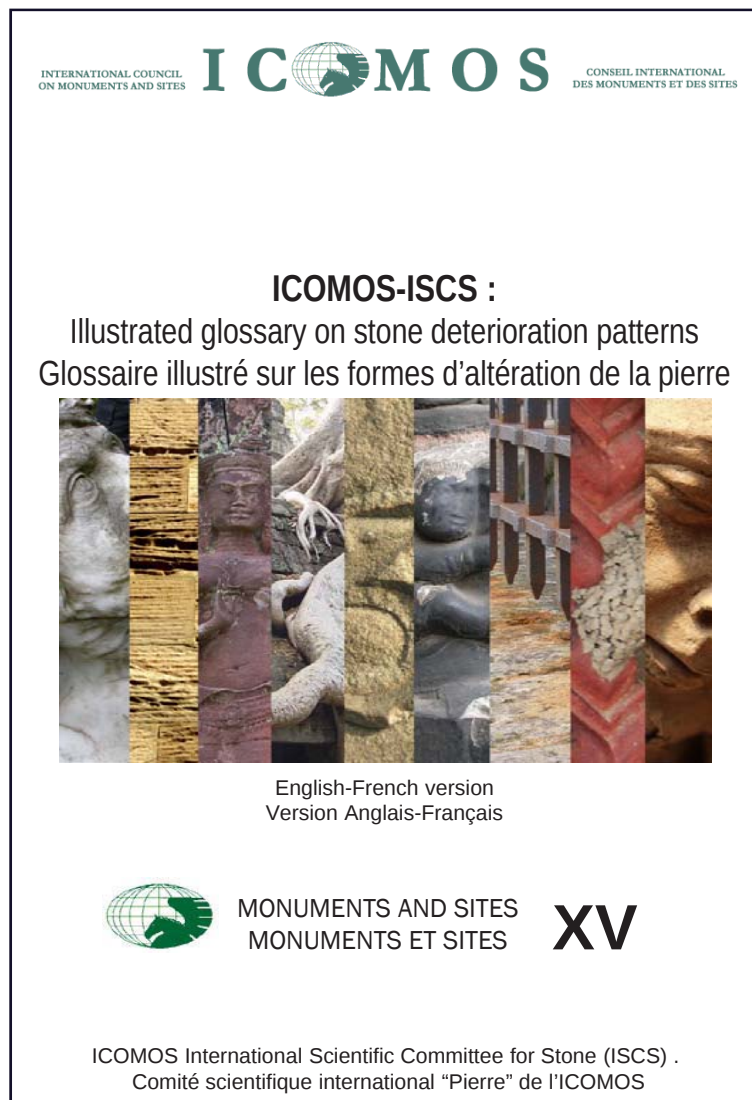
6



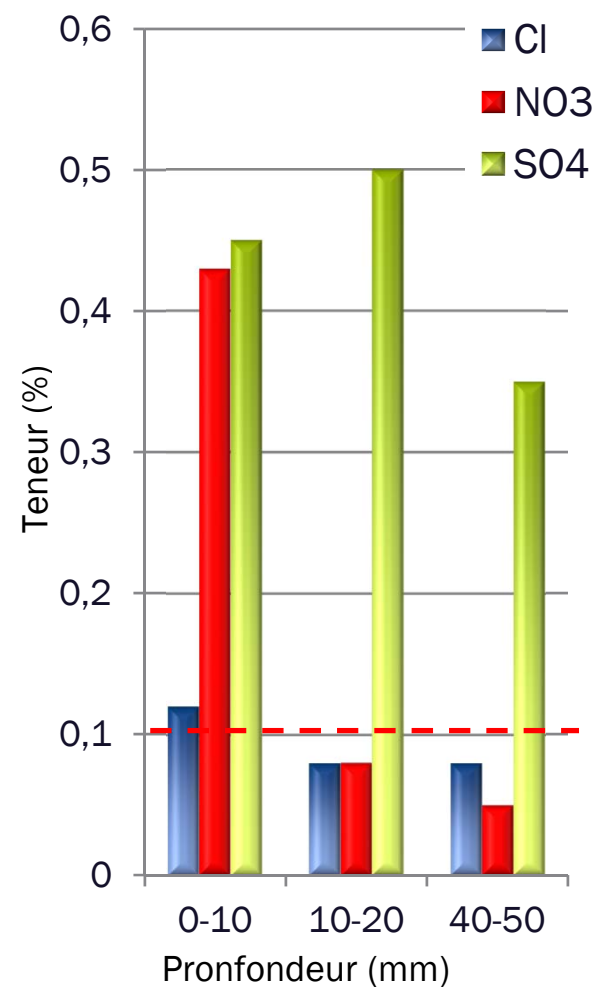
concrétions, efflorescences, désagréations sableuses...

Altérations par les sels

7

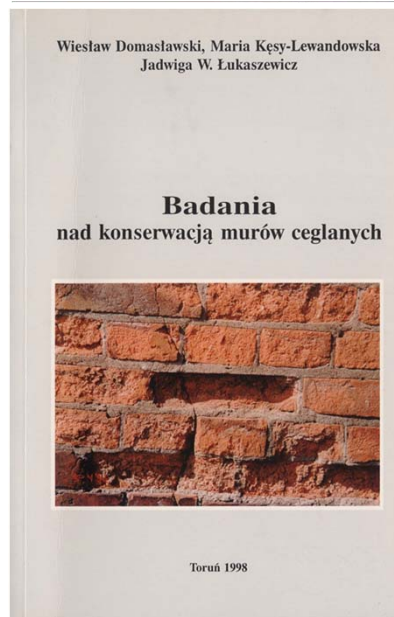
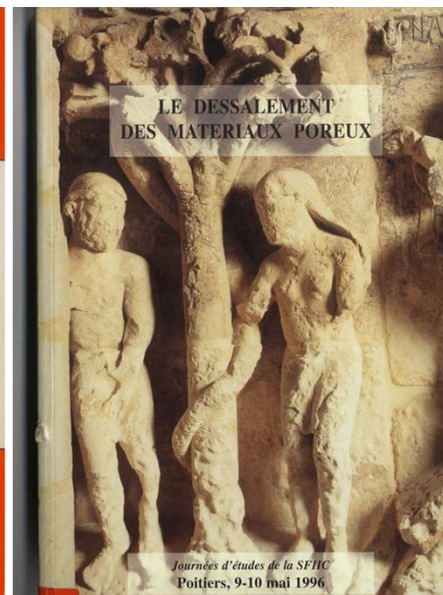
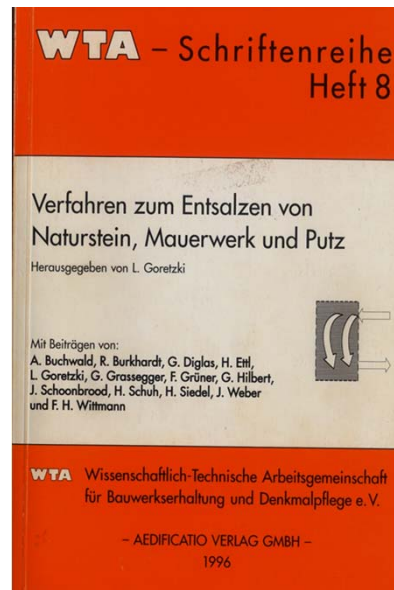


<http://www.international.icomos.org>



Dessalement des matériaux poreux

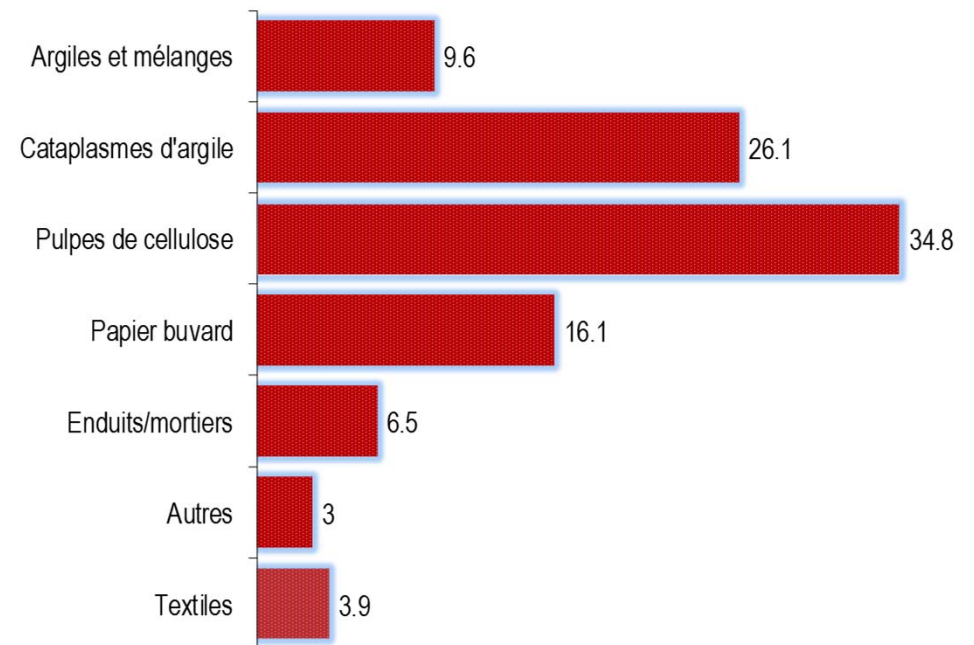
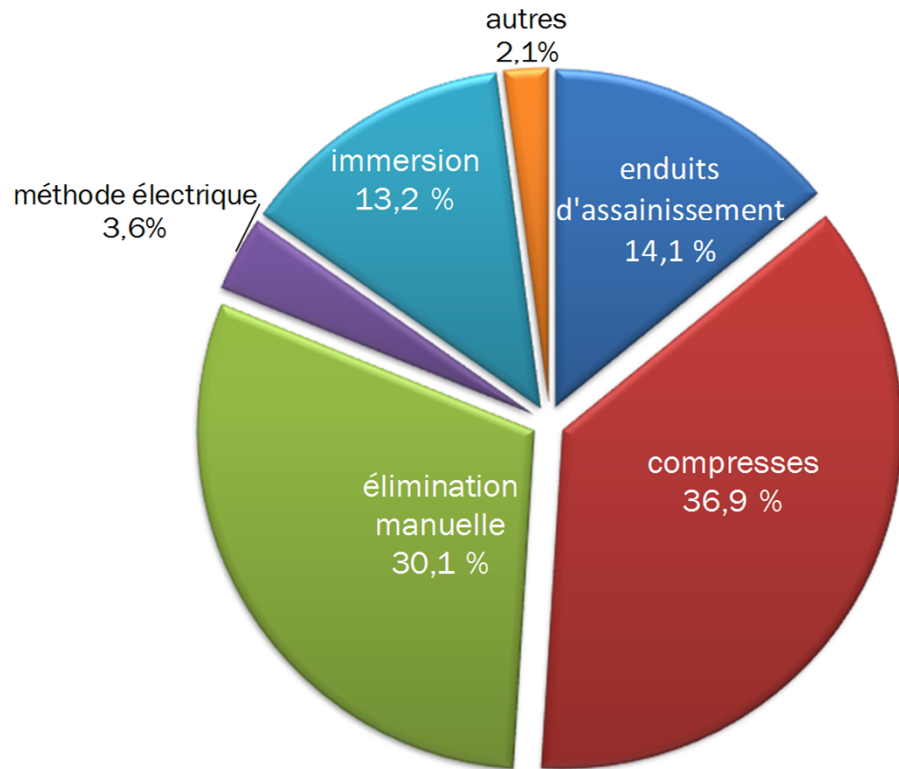
8



An international colloquium to be held at the
Cologne Institute of Conservation Science,
Cologne University of Applied Sciences
28-29 September 2009

Méthodes de dessalement

9

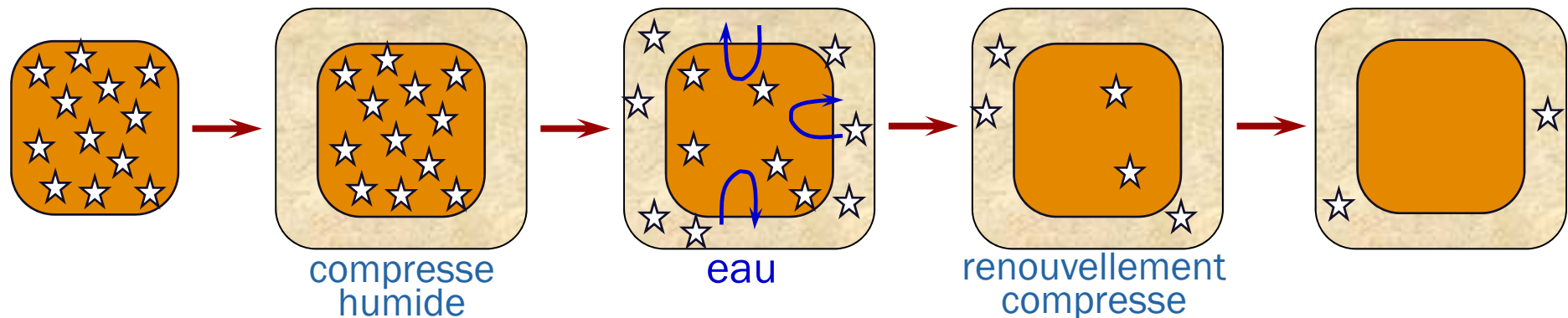


© Bildarchiv Preussischer Kulturbesitz

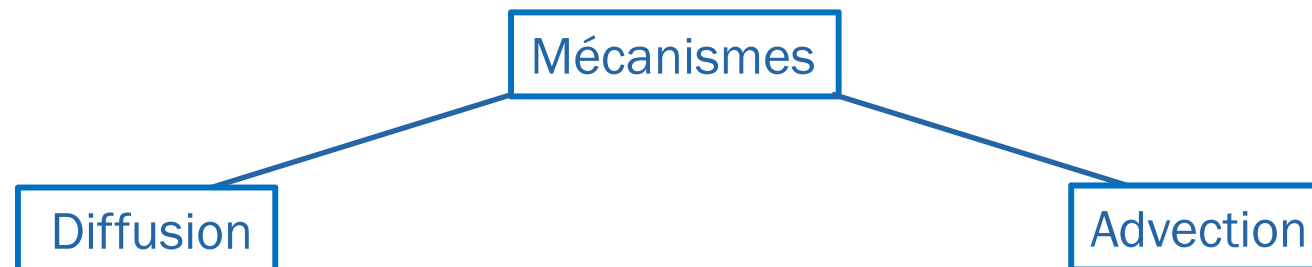
*Immersion des fragments de brique (Porte d'Ishtar, Babylone)
Berlin, Staatliche Museen, 1928*

Principe du dessalement par compresse

10

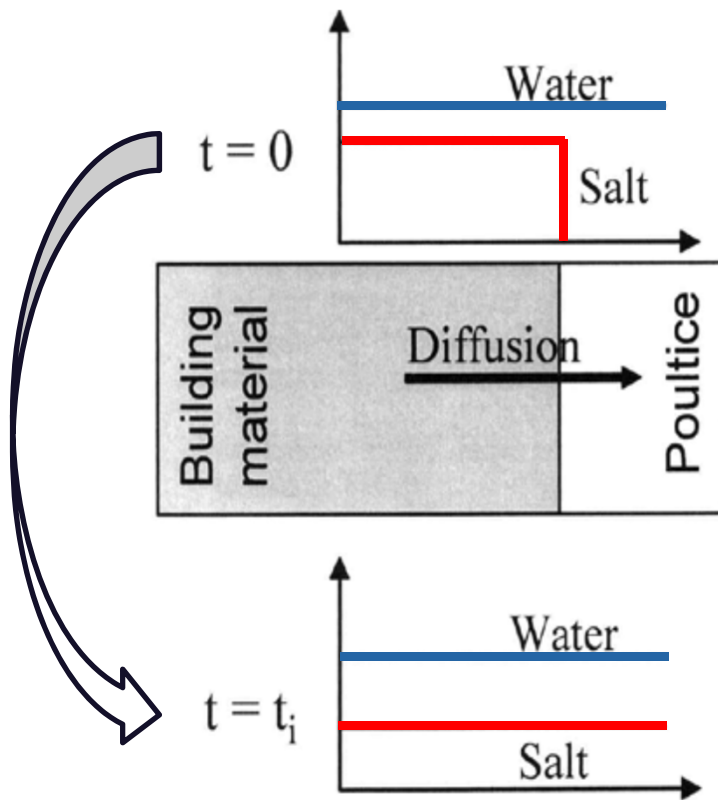


- Transfert de l'eau de la compresse dans le substrat
- Dissociation des sels en ions
- Transfert en retour de la solution du substrat vers la compresse



Diffusion

11

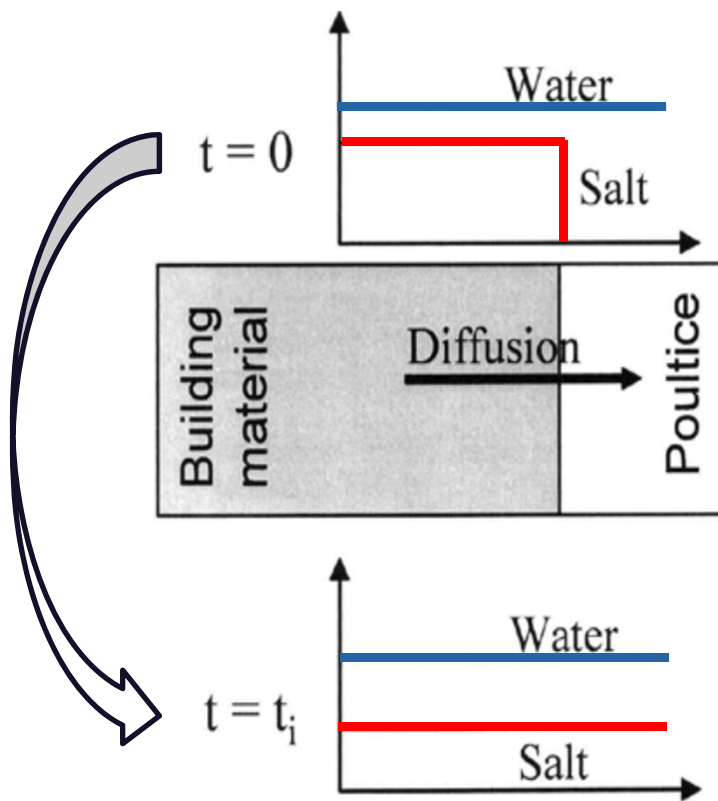


(Grasseger et al., 2003
recommandations WTA Merkblatt)

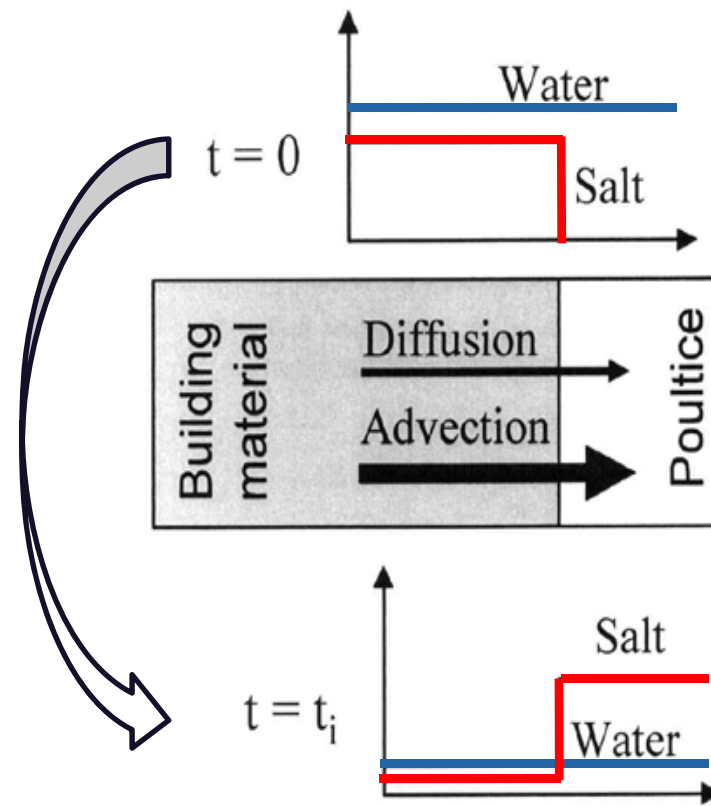
- Théoriquement efficace
- Renouvellement des compresses
- Maintien d'une continuité hydraulique dans les milieux
- Processus très long (plusieurs semaines,...)



Diffusion



Advection



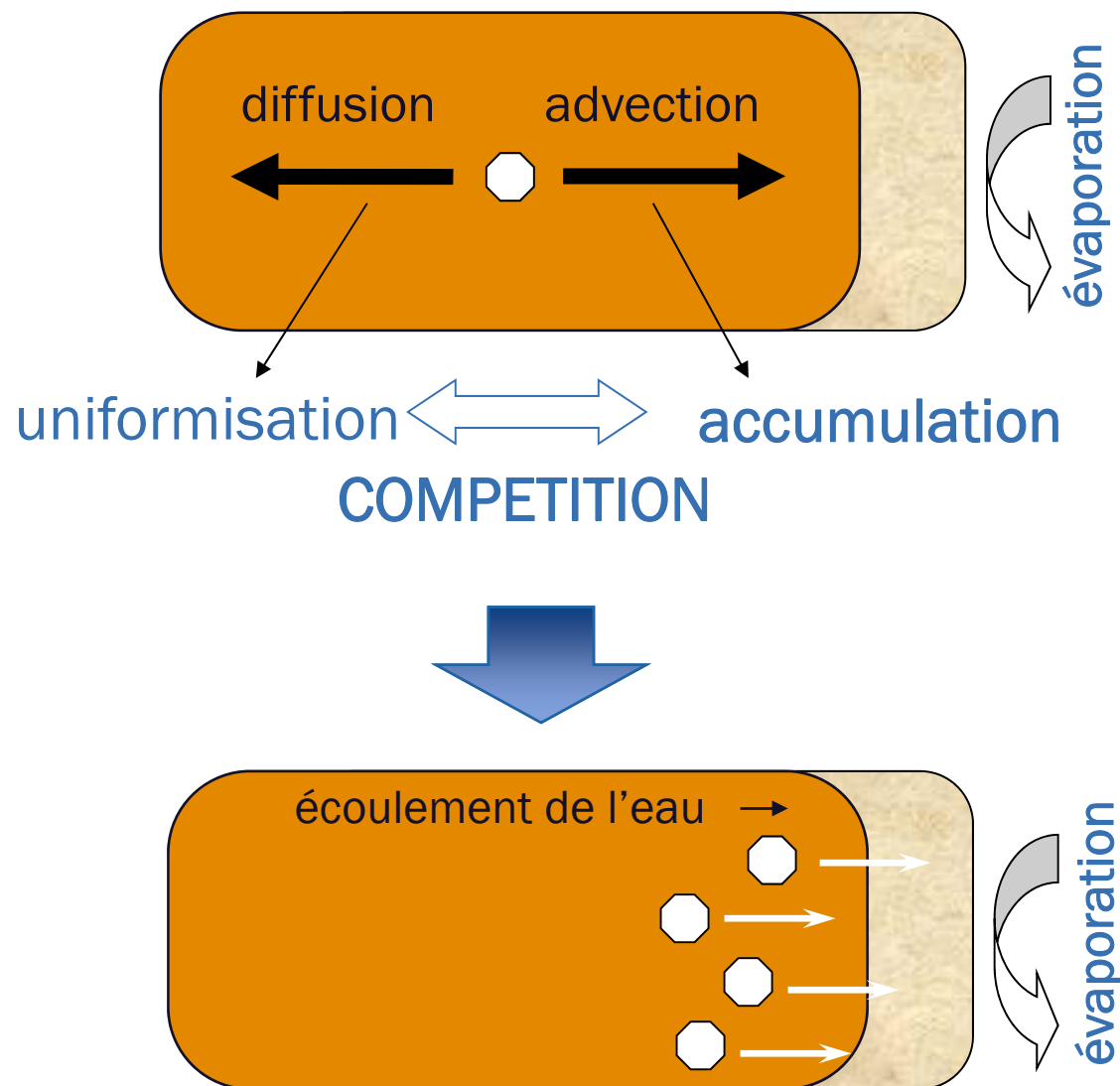
12

(Grasseger et al., 2003
recommandations WTA Merkblatt)



Transfert ionique par advection

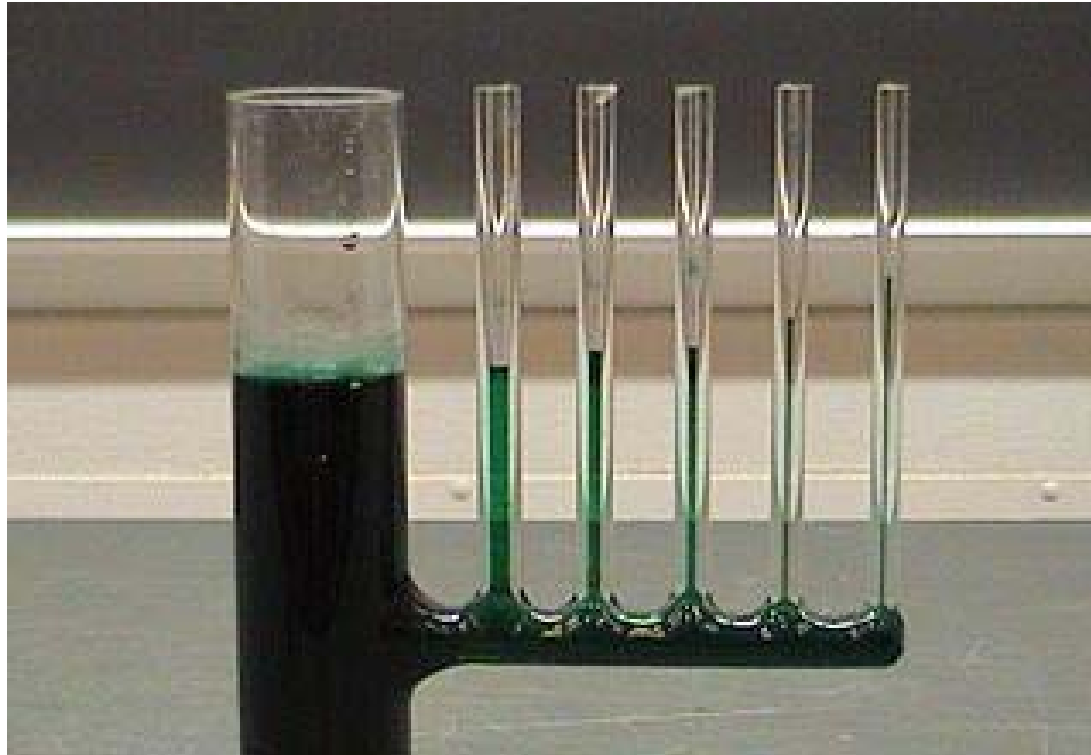
13



Transfert ionique par advection

14

Force motrice de l'advection = pression capillaire



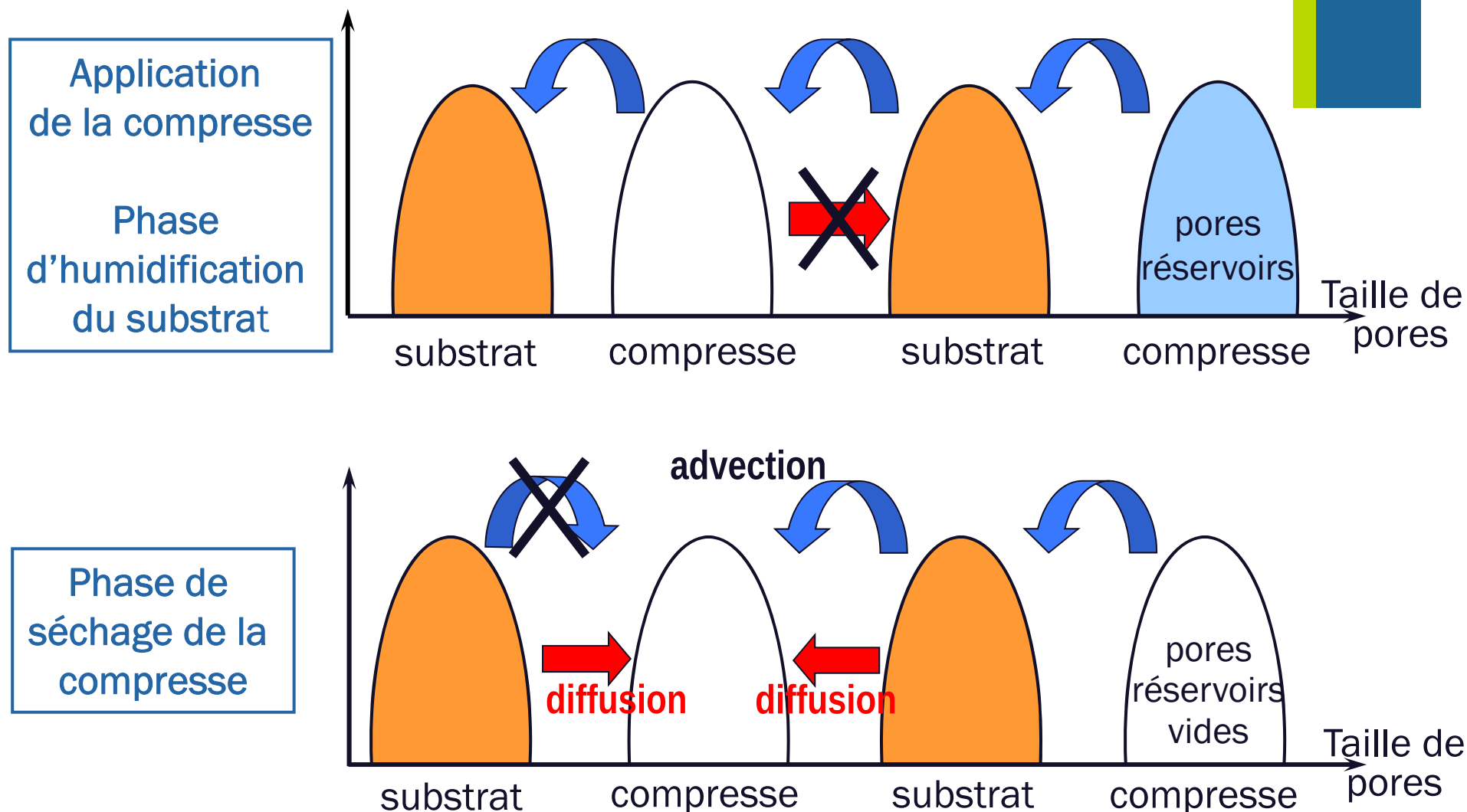
(Pel, 2009)

Plus les pores d'un milieu poreux sont fins, plus forte est la pression capillaire

Pour assurer le transfert d'une solution, il faut et il suffit que les pores (de la compresse) soient plus petits que ceux du substrat (à dessaler)

Advection et taille de pores

15



(Pel & al., *Journal of Cultural Heritage*, 11 (2010), 59-67)

Dessalement par advection

16

Avantages

- Transfert rapide (quelques heures) des sels lors du séchage de la compresse
- Grande efficacité
- Faible degré d'humidité résiduelle dans la pierre

Inconvénients

- Risque de retrodiffusion des sels si nouvelle compresse
- Risque de concentration des sels à l'interface pierre-compresse si rupture de la continuité hydraulique
- Adapter la distribution des tailles de pores de la compresse en fonction de celle du substrat



optimisation

Propriétés et qualités des compresses

17

- **Présenter une forte teneur en eau (pores réservoirs)**
capacité de dissolution des sels en milieu poreux
- **Présenter une distribution porale adaptée**
favoriser l'advection (→ composition et constitution)
- **Présenter une bonne adhérence et faible retrait**
maintien de la continuité hydraulique (→ essais rhéologiques de consistance et ouvrabilité EN452-2)
- **Présenter des composants inertes pour le support**
innocuité et stabilité
- **Facilité de mise en œuvre et d'élimination**

Composants des compressees

mélanges à base de sable, d'argile et de cellulose

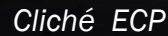
18

avantages

inconvénients

sable (<i>normalisé 0.5-1 ou 1-2mm</i>)	limite le retrait	faible adhésion
argile	forte pression de succion ralenti le séchage	retrait, fissuration
<i>kaolinite</i> <i>bentonite</i>	forte adhésion forte rétention en eau	résidu au détachement
cellulose BC1000 (700µm) BC200 (300µm) BWW40 (200 µm)	pores réservoirs améliore l'adhésion	augmente le retrait
microbilles (<i>verre,..</i>)	ralenti le séchage	densité, coût
tensioactif, épaississant	améliore l'adhésion, ouvrabilité	

Pré-sélection sur critères techniques



Test d'adhérence

appliquées par Josée soarès le 24/3 à 10h30

Nature, taille et proportions des sables

	F3	F6	F10	F15	F20
en masse	???				
Formules					
Poraver sphères creuses 0,1 à 0,3 mm	15	24,15	9,91		
Sable quartz 0,2 à 0,6 mm	10	32,20	36,69		
BC1000	3,5	2,42	1,89		
BWW40	1,5	0,00	0,00		
Kapinite	69,6	34,86	42,76		
Bentonite		6,05	8,75		26,25
Adjuvant	0,4	0,32	0,00		0,00
total	100	100,00	100,00	100,00	100,00
rappor eau/matière sèche	2,5	1,27	0,95	1,89	1,34

Teneur en eau

Types de fibres de cellulose

	F3	F6	F10	F15	F20
Porosité Hg (%)	41,4	39,9	44,8	44,5	45,4
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,23	1,22	1,25	1,22	1,31
Surface spécifique (m ² /g)	21,96	17,51	16,06	17,61	15,01
Rayon de gyration médian (en volume) µm	1,91	1,08	0,29	1,05	0,11

Propriétés de porosité

	F3	F6	F10	F15	F20
du pt de vue structure de pores	trop collant	trop sec	ok		
du pt de vue texture	trop faible	trop faibl	mauvais		

Vitesse séchage

sphères 0/0,5 et F2
sable 0/0,720,c'est du

Nature et quantité d'argiles

Appréciation d'adaptation pour grès correct ?

mise en coupelle pour déterminer le retrait (dans silicagel à 20°C) le 27/3/2012

masse de la coupelle = 2,89

Retrait au séchage	F1	F2	F2bis	F2ter	F3	F6	F10	F15	F20
longueur initiale (mm)	38,79	38,81	38,85	38,87	38,86	20,68	19,07	18,19	19,72
longueur finale (mm)	28,03	31,45	32,76	32,78	37,16	19,82	18,26	17,38	18,78
retrait (%)	27,7	19,0	15,7	15,7	4,4	14,46	12,86	12,25	13,06

Retra

	F3	F6	F10	F15	F20
	10,90	11,13	8,18	10,28	
	10,87	11,11	8,14	10,23	
	10,87	11,11	8,14	10,22	

43,97	45,21		
42,54	44,13		
42,45	44,33		
42,87	44,60	42,84	39,64

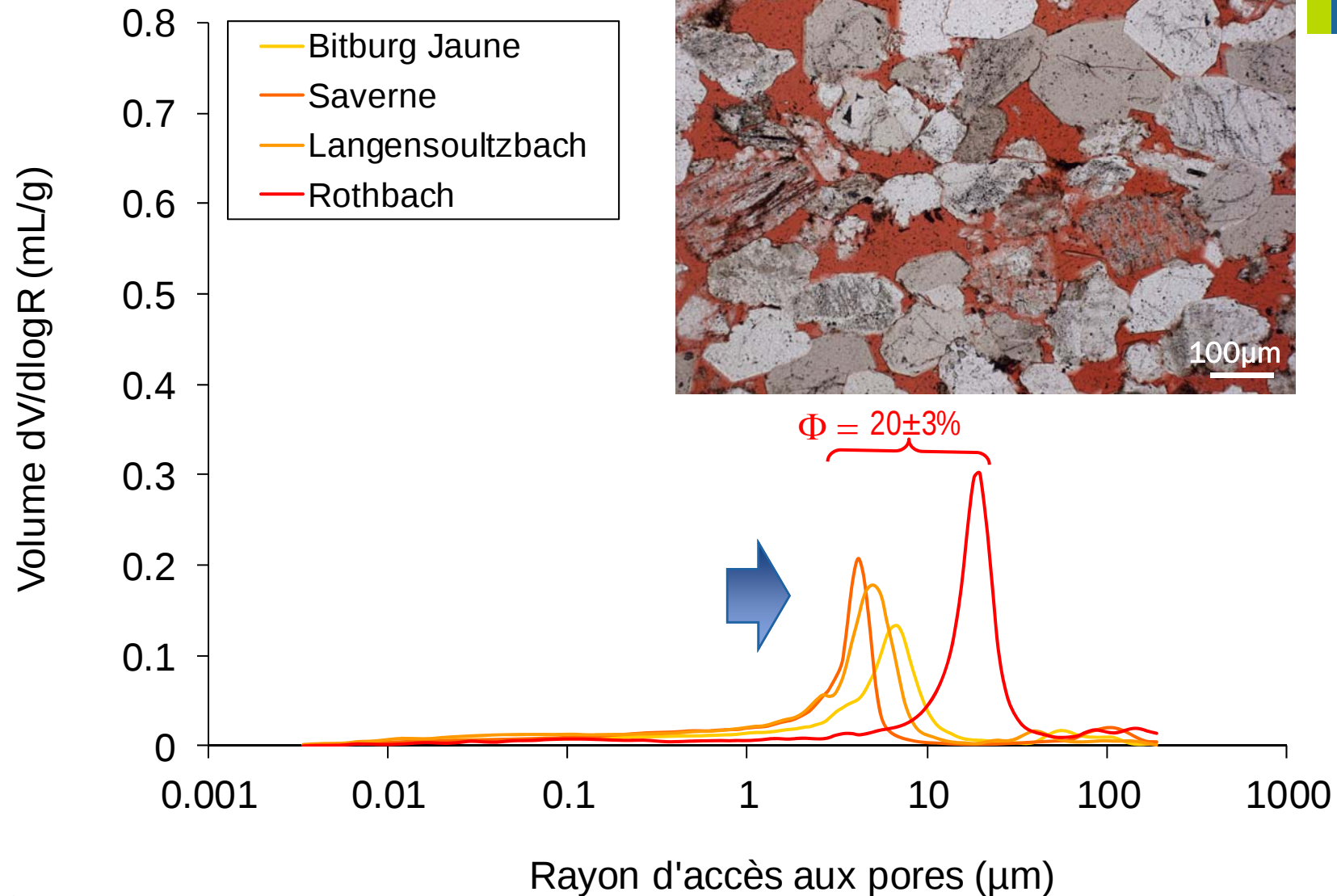
46,46 lam initial



Microstructure des grès en œuvre

Distribution porale (MIP)

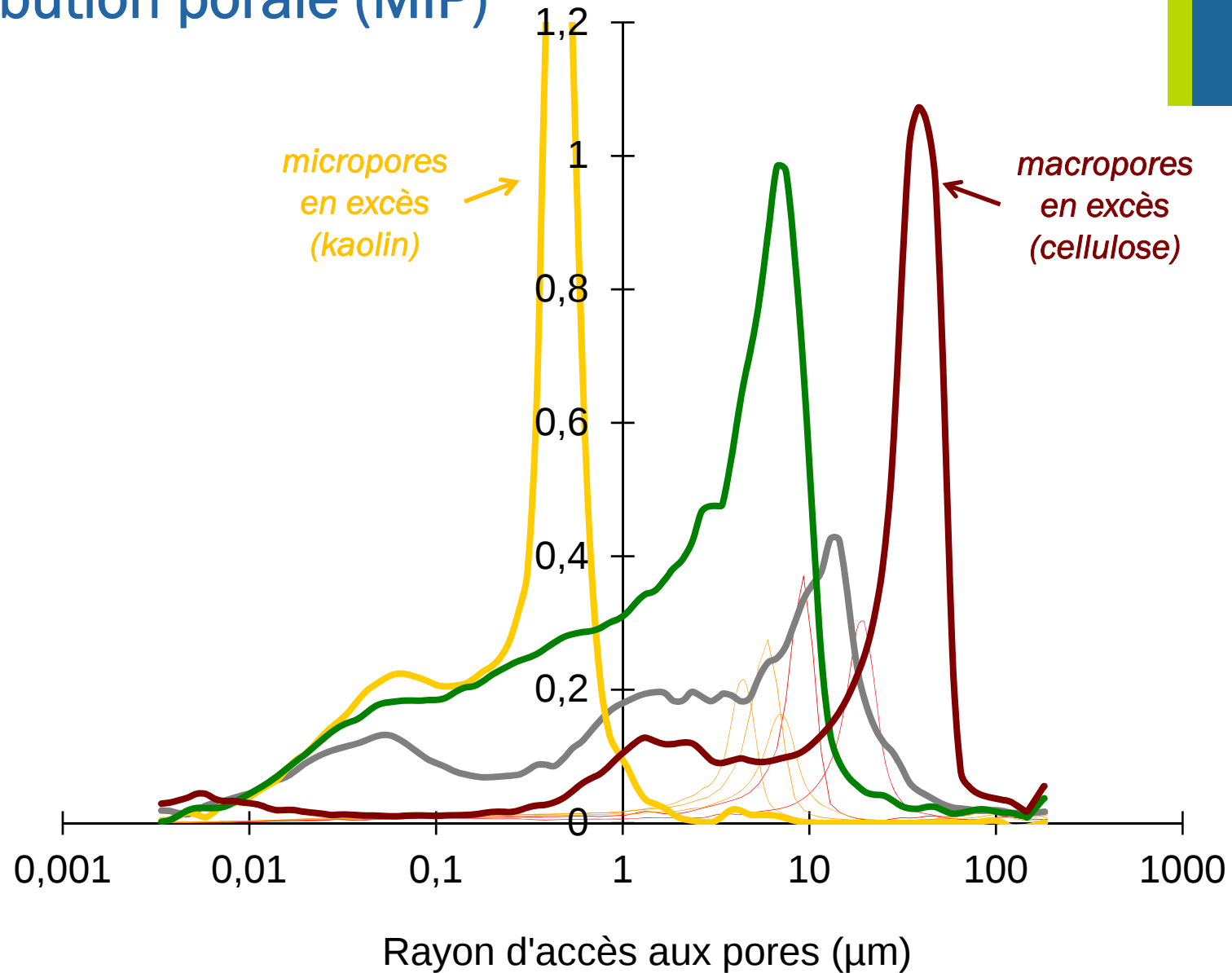
20



Microstructure des grès en œuvre

Distribution porale (MIP)

21



Tests de faisabilité *in situ*

22

Protocole

- 3 applications successives
- durée de mise en place : 3 jours
- dosage des sels avant/après chaque dépose de compresse (même pierre)
- suivi de la conductivité des compresses



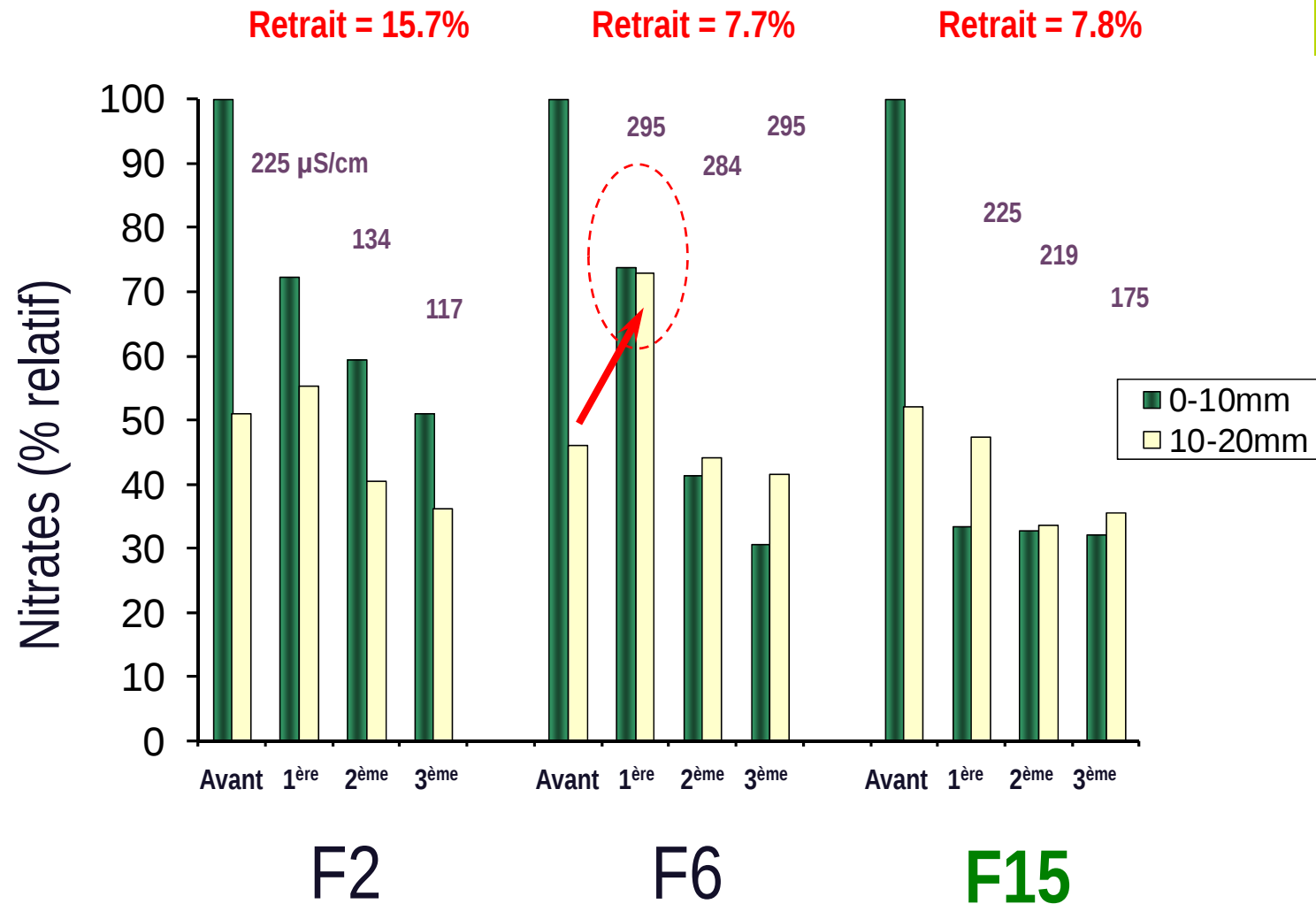
1^{ère} application (F15)



après la 3^{ème} application

Suivi d'efficacité et sélection d'une compresse

23



Conclusion

24

- Mise en œuvre d'une méthodologie innovante et efficace
- Conservation et respect des épidermes originaux
- Assainissement des parements en moellons préparés pour recevoir un enduit adapté
- Intérêt d'un accompagnement scientifique pour des raisons techniques, de qualité et économiques (gain de temps)



2008



Journée technique de l'IMGC

2012



application à l'airless
compresse: 4.5 - 5 kg/m²
épaisseur 8-12 mm
1000 m²

21 septembre 2017



IMGC

Maison des Travaux Publics - Paris 8ème
21 septembre 2017

ADAPTATION DES OUVRAGES EN MAÇONNERIE
AUX NOUVELLES CONDITIONS DE SERVICE

Remerciements :

Florence Mathonat



Christophe Bottineau



Régis Furlani



Stéphane Logel



José Soarès



MERCI POUR VOTRE ATTENTION