

5^{ème} Ecole d'automne du GDR MBS

Eco-conception des matériaux biosourcés et géosourcés : de la ressource à la fin de vie

12 au 16 octobre 2025, Douai



Impact environnemental : lixiviation des bétons biosourcés et classement en fin de vie

Pr. David BULTEEL



Laboratoire
de Génie Civil
et géo-Environnement



IMT Nord Europe
École Mines-Télécom
IMT-Université de Lille



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité



GdR MBS
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS



Préambule

Les bétons végétaux présentent un fort intérêt :

- d'un point de vue tant technique (hygrothermique, phonique, etc ...)
- qu'environnemental lors de leurs élaborations



réduction de l'impact carbone

Se pose toutefois la question de la fin de vie de ces bétons végétaux :



Comment se positionnent-ils vis-à-vis du classement environnemental ?

Sommaire

- Rappel de ce qu'est la lixiviation et les modes opératoires
- Réglementation applicable pour le classement environnemental
- Cas d'étude de l'impact environnemental de bétons biosourcés en fin de vie

Lixiviation et modes opératoires

Définition :

La lixiviation est un processus de transfert de masse qui se produit par l'extraction de substances solubles d'un matériau solide mis en contact avec un liquide

Lixiviation et modes opératoires

Norme NF EN 12457-2 :

Caractérisation des déchets – lixiviation – essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés ou des boues



- Fraction granulaire : 0/4 mm (sans excès de fines)
- 90 g
- L/S = 10
- Eau déminéralisée
- Agitateur rotatif
- T = 20°C
- t = 24 h => Récupération par filtration sous vide à 0,45 µm
- Séparation en 2 (acidifié et non acidifié)
- Expression des résultats en mg/l (ppm) ou mg/Kg


x L/S (en l/Kg)

Lixiviation et modes opératoires

Norme NF EN 14405

Caractérisation des déchets - Essai de comportement à la lixiviation -
Essai de percolation à écoulement ascendant



Lixiviation et modes opératoires

Norme NF EN 14405

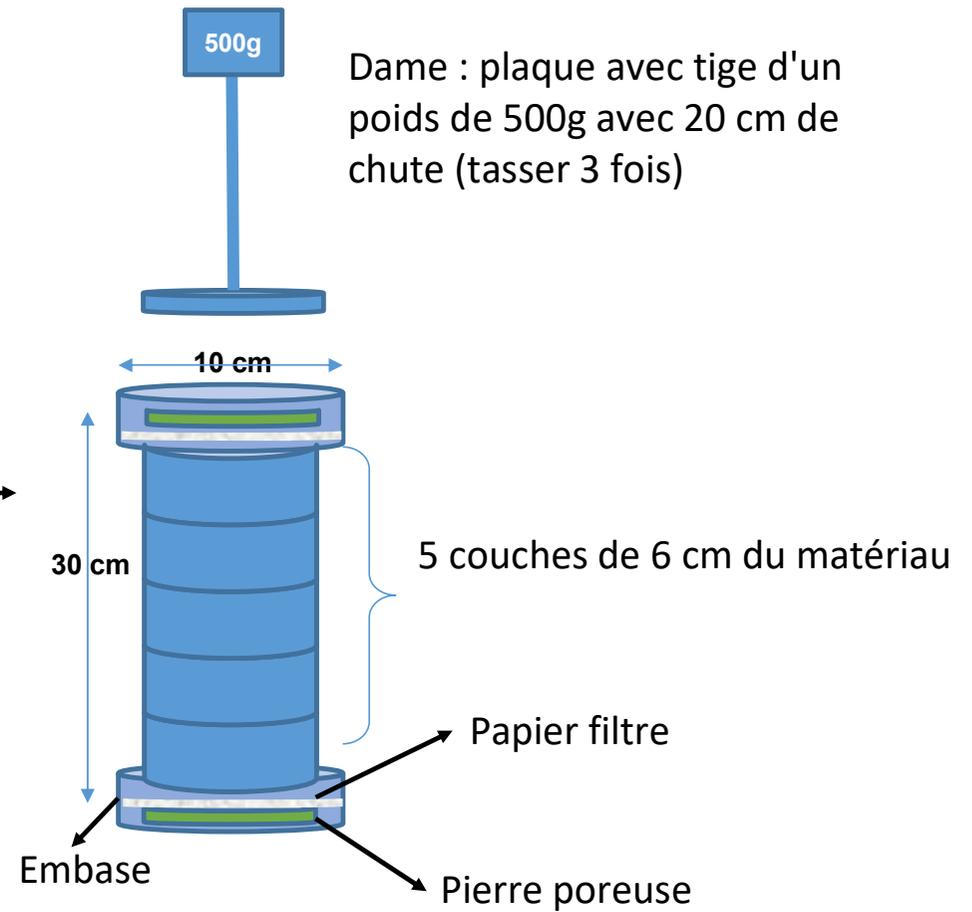
Caractérisation des déchets - Essai de comportement à la lixiviation -
Essai de percolation à écoulement ascendant

- Fraction granulaire : 0/10 mm
- Masse introduite en fonction du chargement de la colonne
- L/S = 0,1 ; 0,1 ; 0,3 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5
- Eau déminéralisée
- T = 20°C
- Récupération des différentes fractions => Filtration sous vide à 0,45 µm
- Séparation en 2 (acidifié et non acidifié)
- Expression des résultats
 - mg/l et mg/Kg Matière Sèche
 - Teneur en élément cumulé en mg/Kg MS = f(L/S cumulée)
 - Concentration en mg/l = f(L/S)

L/S cumulé = 2
L/S cumulé = 10
Co

Lixiviation et modes opératoires

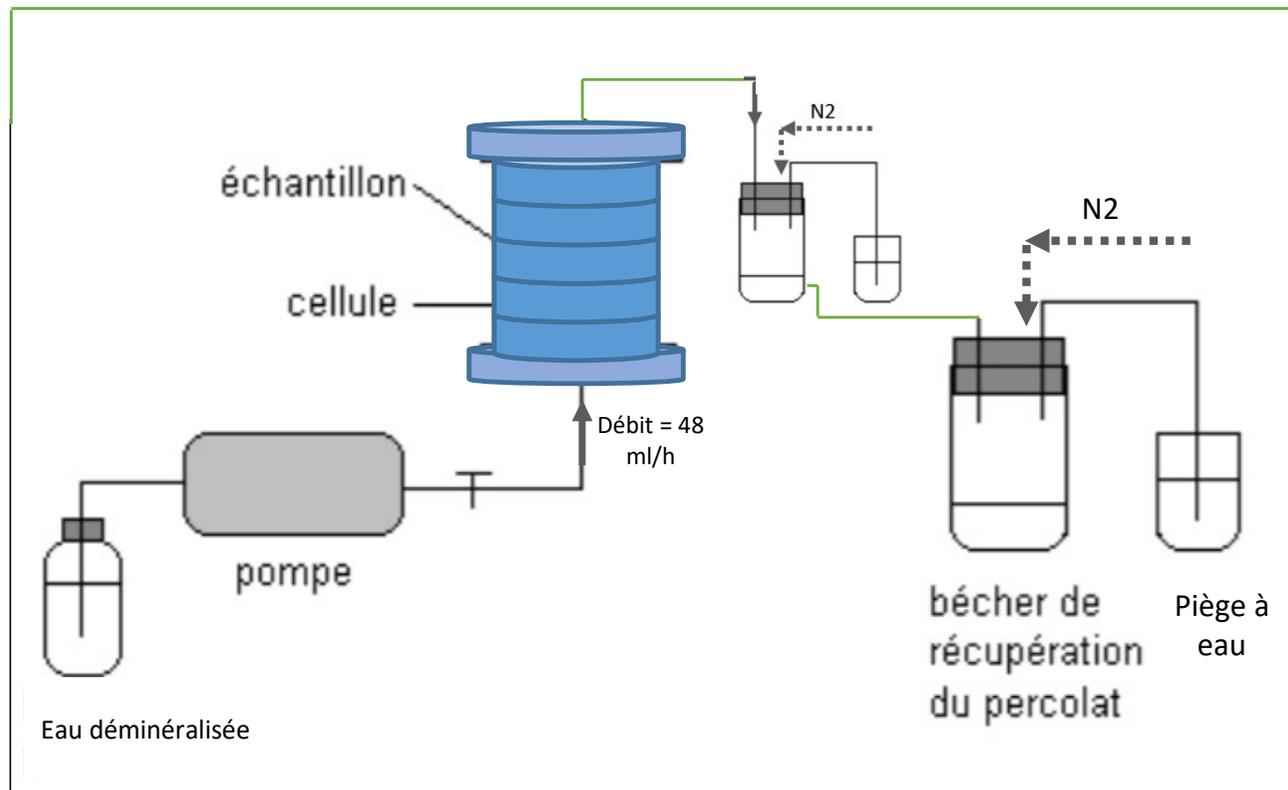
Norme NF EN 14405



Lixiviation et modes opératoires

Norme NF EN 14405

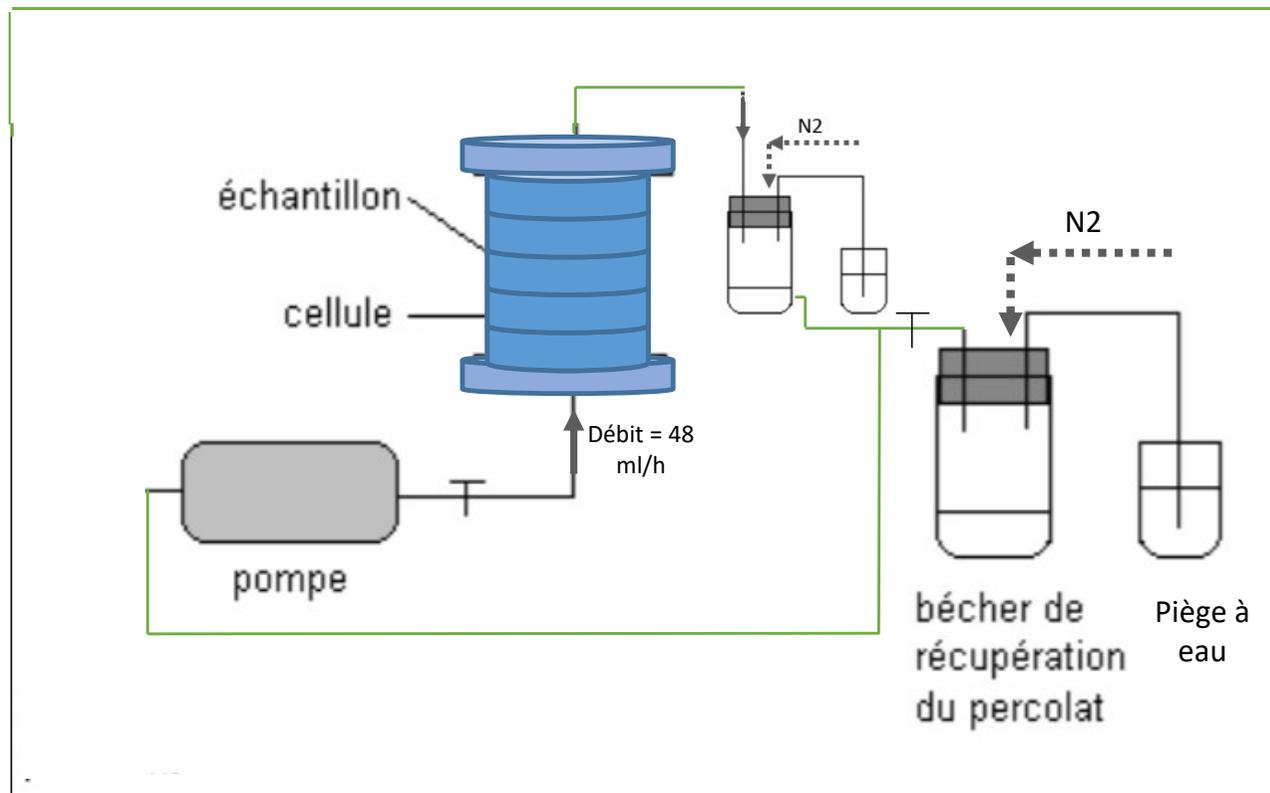
Circuit ouvert pour la récupération des percolats aux différents L/S



Lixiviation et modes opératoires

Norme NF EN 14405

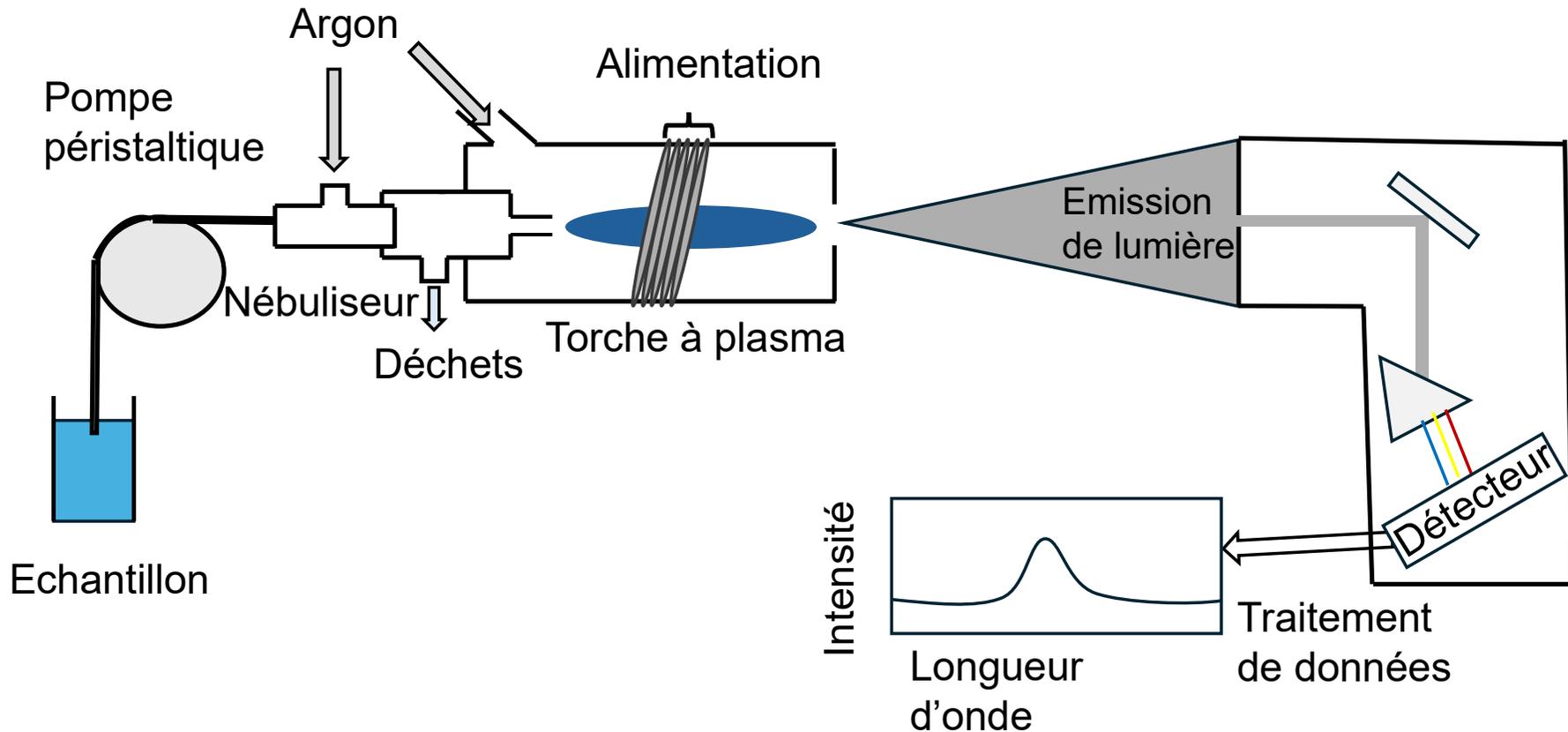
Circuit fermé pour la mise en équilibre de la colonne lors de la première fraction



Lixiviation et modes opératoires

Analyses chimiques des lixiviats

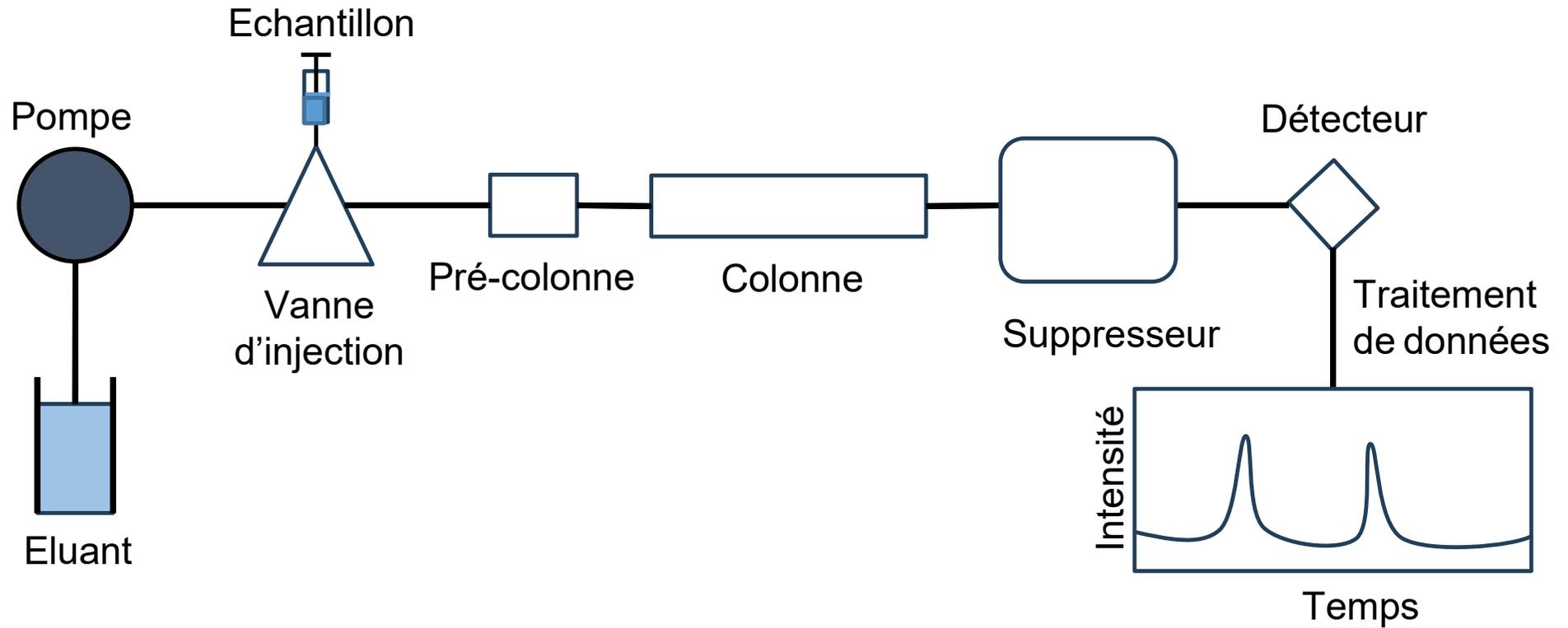
- Spectrométrie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES)



Lixiviation et modes opératoires

Analyses chimiques des lixiviats

- Chromatographie ionique



Seuils réglementaires environnementaux

Valeurs limites sur des lixiviats

(d'après l'article 16 et l'annexe II de la directive 1999/31/CE)

Pour un L/S = 10
comme dans le cas
NF EN 12457-2

<i>Paramètres (mg/Kg de Matière sèche)</i>	<i>Valeurs à respecter (déchets inertes)</i>	<i>Valeurs à respecter (déchets non dangereux)</i>	<i>Valeurs à respecter (déchets dangereux)</i>
(As)	0,5	2	25
(Ba)	20	100	300
(Cd)	0,04	1	5
(Cr)	0,5	10	70
(Cu)	2	50	100
(Hg)	0,01	0,2	2
(Mo)	0,5	10	30
(Ni)	0,4	10	40
(Pb)	0,5	10	50
(Sb)	0,06	0,7	5
(Se)	0,1	0,5	7
(Zn)	4	50	200
(Cl)	800	15000	25000
(F)	10	150	500
(SO ₄)	1000	20000	50000
Indices Phénols	1	50	100
COT	500	800	1000
Fraction soluble	4000	60000	100000

Seuils réglementaires environnementaux

Valeurs limites sur matériaux bruts (d'après la directive 1999/31/CE)

Paramètres (mg/Kg de Matière sèche)	Valeurs à respecter (déchets inertes)	Valeurs à respecter (déchets non dangereux)	Valeurs à respecter (déchets dangereux)
COT	30000	50000	60000
BTEX	6	30	
PCB	1	50	
C10-C40	500	5000	
HAP	50	100	

Cas d'étude de l'impact environnemental de bétons biosourcés en fin de vie

➔ Choix des ressources végétales

- ✓ Chènevotte : blanche (C) et roui (CHR)
- ✓ Anas de lin (L)
- ✓ Paille de colza (CLZ)

➔ Formulations de Bétons végétaux (BC, BCHR, BCLZ, BL)

- Ciment
- Granulats entiers à des ratios L/G réaliste et intermédiaire

Granulats représentant >80%v à $L/G_{vol} = 0,32$ (soit $L/G_{mass} = 4$)

Granulats représentant $\approx 50\%$ à $L/G_{vol} = 0,57$ (soit $L/G_{mass} = 7$)

- eau
- Sable

D'après l'étude :

M. Chaussy, A. Day, F. Becquart,
D. Bulteel, B. Laidoudi,
Study of the Environmental Profile
of Plant-based Concretes in an End-
of-Life Scenario
ICCBM, 2025

Cas d'étude de l'impact environnemental

Résultats des analyses sur lixiviats pour les ressources végétales (NF EN 12457-2)

Paramètres (mg/Kg MS)	C	CHR	CLZ	L	Liant CEMI	(déchets inertes)	(déchets non dangereux)	(déchets dangereux)
(As)	<0,011	<0,011	0,02	<0,01	<0,01	0,5	2	25
(Ba)	5,25	4,97	3,88	5,6	9,22	20	100	300
(Cd)	<0,006	<0,006	0,016	0,008	<0,005	0,04	1	5
(Cr)	<0,06	<0,06	<0,06	<0,05	3,43	0,5	10	70
(Cu)	0,99	0,68	0,68	0,35	0,06	2	50	100
(Hg)	0,0013	0,0042	<0,0057	<0,0011	<0,001	0,01	0,2	2
(Mo)	<0,06	<0,06	0,31	<0,05	2,2	0,5	10	30
(Ni)	0,22	0,09	<0,06	<0,05	<0,05	0,4	10	40
(Pb)	0,08	0,17	0,1	0,28	0,1	0,5	10	50
(Sb)	<0,011	<0,011	<0,011	<0,01	<0,01	0,06	0,7	5
(Se)	<0,011	<0,011	<0,011	<0,01	0,07	0,1	0,5	7
(Zn)	3,14	4,38	4,04	4,16	<0,5	4	50	200
(Cl)	2089,9	176,2	5490	106	279	800	15000	25000
(F)	<1,11	<1,12	1,14	1,2	7,1	10	150	500
(SO ₄)	11	<5	75,2	<5	153	1000	20000	50000
Indices Phénols	3	0,9	1,3	1	0,1	1	50	100
COT	12254	3568	17085	6667	80	500	800	1000
Fraction soluble	34790	11730	64470	17240	34970	4000	60000	100000

Cas d'étude de l'impact environnemental

Résultats des analyses sur bruts pour les ressources végétales

<i>Paramètres (mg/Kg MS)</i>	<i>C</i>	<i>CHR</i>	<i>CLZ</i>	<i>L</i>	<i>Liant CEMI</i>	<i>Seuils inertes</i>	<i>Seuils non dangereux</i>	<i>Seuils dangereux</i>
COT	46000	47200	45300	47900	<3000	30000	50000	60000
BTEX	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	6	30	
PCB	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	1	50	
C10-C40	1694	164	404	107	29	500	5000	
HAP	<6,090	<1,6	<1,83	<2,16	<1,6	50	100	

Cas d'étude de l'impact environnemental

Résultats des analyses sur lixiviats pour les bétons végétaux (NF EN 12457-2)

Paramètres (mg/Kg MS)	BC-0,32	BC-0,57	BCHR-0,32	BCHR-0,57	BCLZ-0,32	BCLZ-0,57	BL-0,32	BL-0,57	Seuils inertes	Seuils non dangereux	Seuils déchets dangereux
(As)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,5	2	25
(Ba)	8,37	4,44	6,47	4,58	8,47	5,33	5,77	5,82	20	100	300
(Cd)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,04	1	5
(Cr)	0,19	0,23	0,23	0,23	0,27	0,36	0,73	0,17	0,5	10	70
(Cu)	0,63	0,22	0,56	0,31	0,93	0,35	0,9	0,3	2	50	100
(Hg)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01	0,2	2
(Mo)	0,32	0,18	0,23	0,18	0,38	0,24	1,77	0,19	0,5	10	30
(Ni)	0,21	0,08	0,15	0,07	0,25	0,12	0,12	0,07	0,4	10	40
(Pb)	0,13	0,06	<0,05	0,07	0,09	0,12	0,29	<0,05	0,5	10	50
(Sb)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,05	<0,01	0,06	0,7	5
(Se)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	0,1	0,5	7
(Zn)	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	4	50	200
(Cl)	53	23	21	27	95	44	63	14	800	15000	25000
(F)	4,9	4,4	4,8	4,3	4,6	5,1	7,9	4,2	10	150	500
(SO ₄)	69	59	67	71	90	48	1537	59	1000	20000	50000
Indices Phénols	0,8	0,3	0,8	0,3	0,2	<0,1	1	0,4	1	50	100
COT	1500	600	2000	780	1000	420	2200	770	500	800	1000
FS	20620	16640	23080	17960	18920	19340	21500	18830	4000	60000	100000

Cas d'étude de l'impact environnemental

Résultats des analyses sur bruts pour les ressources végétales

Paramètres (mg/Kg MS)	BC-0,32	BC-0,57	BCHR-0,32	BCHR-0,57	BCLZ-0,32	BCLZ-0,57	BL-0,32	BL-0,57	Seuils inertes	Seuils non dangereux	Seuils dangereux
COT	27000	19000	37000	13000	29000	11000	38000	19000	30000	50000	60000
BTEX	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	6	30	
PCB	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	1	50	
C10-C40	35	28	<25	<25	<25	28	<25	<25	500	5000	
HAP	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	50	100	

Conclusion

- Classement environnemental selon la directive 1999/31/CE pour le cas d'étude :
 - Ressources végétales : « dangereux »



COT, fraction soluble, indice phénol et parfois Zn et Cl

- Bétons végétaux : « non dangereux voire dangereux »



COT, fraction soluble

- L/G_{vol} influence fortement et logiquement la classification

+ le volume de granulat est faible  meilleur est le classement



Seuil à ne pas dépasser en termes d'incorporation

Conclusion

- Ces résultats constituent une première étape vers l'intégration de la recyclabilité dans la formulation des bétons végétaux



Réfléchir plus attentivement à la composition des formulations et à la sélection des différents constituants du matériau final afin de garantir un scénario de recyclage pérenne en fin de vie, encore inexistant à ce jour pour les matériaux biosourcés



Réfléchir aux traitements des ressources végétales pour limiter le relargage et respecter les seuils environnementaux



Évolution législative plus adaptée aux matériaux biosourcés riches en carbone organique