



Projet SMACC

Rapport final : synthèse

N° AGP 30700

Mai 2016

ecal	Luc Bergeron Laurent Soldini
Heia-Fr	Fabienne Favre Boivin Jean-Marc Ribi Ana Slijepcevic Bruno Spahni
Heig-Vd	Alain Beuret
Hepia	Pascal Boivin Véronique Guiné
Partenaires	Ithaka Institute for Carbon Cycling Swiss-Biochar Université de Zurich HES-SO Valais
Responsable projet	Fabienne Favre Boivin (fabienne.favre@hefr.ch)

Table des matières

Introduction.....	4
Organisation du projet	4
Résultats.....	6
WP1 : Production de biochars et caractéristiques des différents biochars.....	7
Objectifs détaillés :.....	7
Résultats :.....	7
Bilan des livrables :	9
WP2 : Capacité d'épuration des eaux usées	9
Objectifs détaillés.....	9
Résultats:.....	10
Bilan livrables WP2 :.....	11
WP3 Technosols épurateurs pour les eaux de ruissellement	12
Objectifs détaillés:.....	12
Résultats:.....	12
Bilan livrables WP3 :.....	13
WP4 : design et dimensionnement des structures verticales végétalisées.....	14
Objectifs du WP4:.....	14
Résultats :.....	14
Bilan livrables WP4 :.....	15
WP5 : Technosols épurateurs pour les eaux de ruissellement.....	16
Objectifs du WP5:.....	16
Résultats :.....	16
Bilan livrables WP5 :.....	17
WP6 : Valorisation.....	18
Scientifique :.....	18
Pédagogique :	18
Economique :	19
Conclusions et perspectives:.....	21
Annexe 1.....	22
Annexe 2.....	23
Annexe 3.....	24
3.1 Cahier d'idées	25
3.2 Variantes de construction.....	26

3.3	Offres sous-traitants	27
3.4	Etude d'acceptabilité	28
3.5	Plan final de cassette en inox.....	29
3.6	Flyer	30
3.7	Cassette inox - Note de calcul.....	31
3.8	Démonstrateurs.....	32
Annexe 4.....		33

Introduction

En Suisse, plus de 30'000 substances organiques de synthèse sont utilisées couramment : que ce soit sous forme de produits pharmaceutiques, de soin corporel, d'entretien des façades ou des surfaces vertes. Elles se retrouvent fatalement dans les eaux naturelles, après avoir passé par les eaux usées ou les eaux de ruissellement. A ces dernières, s'ajoutent les substances inorganiques, souvent particulières, issues de l'usure des infrastructures routières et des véhicules qui les empruntent. Ce cortège de micropolluants constitue une menace pour les écosystèmes et *in fine* pour la santé humaine.

La législation Suisse en matière de protection des eaux a évolué pour prendre en compte ce problème. En effet, l'Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux 2008), a été modifiée en 2015 et exige désormais un traitement des micropolluants dans les stations d'épurations d'une certaine taille. Parallèlement, les normes et instructions pour le traitement des eaux de ruissellement préconisent désormais un traitement pour les axes routiers présentant un certain volume de trafic.

Si les bases légales et les aides à l'application sont prêtes, les solutions techniques sont elles encore en cours de développement.

Le projet SMart Clean Cities (SMACC) tend à répondre à ce manque en proposant des solutions techniques, tout en intégrant les contraintes rencontrées dans le tissu urbain : manque de place, îlots de chaleur, difficulté de gestion des déchets. L'élément clé des développements proposés est le biochar (matière organique pyrolysée) créé à partir de déchets verts urbains, non valorisés dans une autre filière. Le biochar représente un analogue aux charbons activés importés pour le traitement des polluants. Il est connu pour sa forte réactivité de surface et sa grande porosité. Il répond à la nécessité de gestion des micropolluants, mis en œuvre en STEP ou dans des structures filtrantes. Ces dernières, insérées dans du mobilier urbain au design étudié, et végétalisées, offrent des services supplémentaires comme par exemple l'ornementation et la régulation de la température. L'espace urbain si rare et si cher se voit ainsi valorisé sous différentes facettes.

Organisation du projet

Le projet est divisé en 6 *workpackages* (WP) dont les objectifs et livrables sont résumés dans la suite de ce rapport.

Tableau 1

	Objectifs	Délivrables
WP1	Production de biochars et caractérisation	<ol style="list-style-type: none"> 1. Publications scientifiques 2. Inscription dans la base de données biochar Suisse 3. Méthodes analytiques adaptées
WP2	Tests d'épuration en eaux usées	<ol style="list-style-type: none"> 1. Choix de biochar 2. Publications scientifiques 3. Journée d'étude VSA
WP3	Technosols épurateurs eaux de ruissellement	<ol style="list-style-type: none"> 1. Compositions optimales des substrats pour une performance maximale (débit, hauteur de colonne pour l'épuration). 2. Choix de végétalisation et contraintes d'irrigation et de volume de substrat associés. 3. Données de validation du fonctionnement pour la VSA 4. Publication scientifique sur les performances et la durabilité du substrat
WP4	Design et dimensionnement des structures verticales	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dessins techniques et prototypes (pour au moins deux situations cible retenues) 2. Critères de dimensionnement et de réalisation 3. Documentation détaillée pour les associations professionnelles (VSA, VSS).
WP5	Réalisation et suivi de prototypes en grandeur réelle	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sites de démonstration pour la diffusion de l'innovation 2. Plans de réalisation 3. Protocole et dispositif de suivi des installations 4. une optimisation / validation des conclusions du WP4

Résultats

Les résultats du projets et déivrables sont résumés dans ce chapitre. Les rapports complets et détaillés des différents *workpackages* sont disponibles dans les [annexes](#).

WP1 : Production de biochars et caractéristiques des différents biochars.**Objectifs détaillés :**

- 1) Préparation des biomasses végétales
- 2) Pyrolyse
- 3) Caractérisation des propriétés de surface
- 4) Choix des biochars les plus performants
- 5) Développement des méthodes analytiques
- 6) Développement de substrats végétalisables
- 7) Etude de la stabilité de la production des biochars

Résultats :

- 1) et 2) Préparation de biochars à partir de 3 biomasses végétales différentes : miscanthus, déchets de betterave sucrière, déchets de bois criblés.
- 3) Caractérisation des propriétés de surface des différents biochars ([Annexe 2, page 4 à 7](#)):

Les propriétés mesurées sont :

- la capacité d'échange cationique (CEC)
- la capacité d'échange anionique (AEC)
- l'innocuité pour la croissance végétale (par analyse des métaux relâchés en solution)
- la capacité de nutrition végétale (par analyse du contenu en azote, phosphore et potassium)
- la surface spécifique (SSA)
- l'analyse des groupes fonctionnels par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)
- La composition élémentaire en oxygène, hydrogène, carbone et azote,
- le pH
- l'effet de la granulométrie sur la réactivité des surfaces (mesurée par la CEC)
- les isothermes d'adsorption des différents biochars par rapport à 5 molécules cibles

Les principaux résultats sont :

- La CEC et la SSA sont fortement corrélées. La CEC sera donc préférée à l'avenir dans la caractérisation des surfaces vu son coût moins élevé et sa mise en œuvre facilitée.
- La granulométrie a un effet significatif sur les propriétés de surface. Elles sont donc caractérisées aux granulométries correspondant aux usages planifiés (technosol ou traitement des eaux usées).
- La FTIR n'est pas adaptée à ce type de biochar : leur nature condensée conduit à une adsorption totale du signal.
- Des isothermes d'adsorption des micropolluants cibles carbamazépine, sulfaméthoxazole, diclofenac, mécoprop et benzotriazole montrent que la capacité d'adsorption augmente pour les biochars activés par un traitement à la vapeur. Les biochars montrent de plus une diversité de comportement par rapport à une même molécule qu'il n'est pas possible d'expliquer avec les moyens utilisés dans cette étude. ([annexe 1, page 29](#))

4) Choix de biochars : le miscanthus est produit en agriculture conventionnelle et n'est pas un déchet. L'utiliser pour l'épuration ne constitue ainsi pas une revalorisation de déchets. Cette filière est donc écartée.

Les déchets de betterave sucrière trouvent une valorisation en agronomie, comme complément de fourrage dans l'élevage. Cette filière n'est donc pas retenue pour l'épuration.

Les déchets de bois criblés n'ont pas de possibilité de valorisation dans une autre filière. **Les biochars issus de déchets de bois représentent donc les meilleurs candidats pour les usages concernés par cette étude.**

5) Développement des méthodes analytiques :

Évaluation de la performance à l'aide des mini tests: tous les biochars ont des performances suffisantes dans les conditions de mini tests. Les biochars de miscanthus et betterave sucrière ont des performances d'épuration supérieures aux biochars de déchets de bois. ([Annexe 1, page 10](#))

Les molécules retenues pour l'étude de la capacité d'épuration des biochars sont celles citées dans le projet de révision de l'Oeaux : à savoir **la carbamazépine, le sulfaméthoxazole, le diclofenac, le mécoprop et le benzotriazole.**

Une méthode par spectroscopie de masse (MS) a été développée. Au vu du nombre important d'analyses à effectuer, une méthode analytique simple et rapide a été développée sur la base de la technique de l'injection en flow continu (FIA).

Les matrices analysées, bien que préparées à l'aide d'eau pure et d'une seule molécule cible, se sont avérées complexes. Cela est dû au relargage de molécules contenues dans les biochars. Ceci a nécessité le développement d'une seconde méthode analytique toujours basée sur la détection MS mais précédée d'une étape de séparation par chromatographie en phase liquide à haute performance

(HPLC). La méthode a été semi-validée et les limites de quantifications ainsi que les incertitudes de mesures ont été déterminées.

Une étude de stabilité des échantillons a été entreprise afin de déterminer la pertinence du délai entre la prise des échantillons et la date des analyses HPLC-MS.

- 6) Développement des substrats végétalisables : 3 substrats ont été développés et sélectionnés : des substrats à base de différents fumiers et de biochars le tout composté pendant 6-8 semaines dans un ratio volumique de 70/30 ; 50/50 et 30/70.

Les biochars destinés à la composition de technosols ne montrent pas de potentiel de toxicité. Ils contiennent des nutriments. Ils sont par ailleurs moins riches en métaux lourds que les charbons activés issus de l'importation que l'on trouve actuellement sur le marché. (Annexe 2, page 5)

- 7) Stabilité de la production dans le temps : les valeurs de CEC obtenues sont stables pour un même lot de biochar, et pour des lots de biochars différents. **La production industrielle à base de déchets de bois fournit donc un matériau aux propriétés de surface constantes dans le temps.** (Annexe 2, Figure 2)

Bilan des livrables :

Délibrables planifiés	Délibrables réalisés
1. Publications scientifiques	1. Communication au congrès BCD 2013 Bari *
2. Inscription dans la base de donnée biochar Suisse	2. Inscription faite
3. Méthodes analytiques adaptées	3. Méthodes développées et validées
4. Critères de choix des biochars pour l'épuration	4. Forte SSA, CEC, granulométrie adaptée l'usage.

*Favre Boivin F., Slijepcevic A., Guiné V., Sauty A., Boivin P., Piantini U., 2013. Characterisation of wood waste biochars for micro pollutant adsorption properties, Bari International Conference BCD: Biochars, Composts, and Digestates.

WP2 : Capacité d'épuration des eaux usées

Objectifs détaillés

- 1) Collecte des EU
- 2) Analyse des EU
- 3) Expériences d'épuration en batch

Résultats:

- 1) Cinq campagnes de prélèvement ont été réalisées dans les eaux de la station d'épuration (STEP) de Vidy. Les eaux ont été prélevées dans le décanteur secondaire, après lequel est prévu le traitement spécifique des micropolluants. Un protocole d'échantillonnage a été également établi et amélioré pour permettre les meilleures conditions d'analyses. ([Annexe 1, page 12](#))
- 2) Développement de la méthode analytique pour matrices d'eaux usées. Les eaux de STEP sont des matrices complexes dans lesquelles les micropolluants sont présents en faibles concentrations. Afin de pouvoir diminuer la limite de détection et de quantification mais également de pouvoir diminuer le temps d'analyse, une méthode de pré-concentration basée sur la micro-extraction en phase solide (solid phase micro extraction, SPME) a été testée à l'aide de différentes fibres d'absorption. Les tests ont porté sur des eaux réelles de STEP qui ont été dopées avec 5 mg/L de chaque micropolluant. Les taux de récupération observés pour un type de cartouche (cartouche IC), sont très bons et pour tous les micropolluants testés, ce qui permet d'abaisser la limite de détection au niveau désiré. La méthode a été validée par répétition et un protocole de préparation des échantillons a été établi. Sur cette base, une troisième méthode HPLC-MS en triple-quadrupole a été développée pour permettre la détection des très faibles concentrations de micropolluants dans des eaux réelles de STEP.

- 3) Développement et réalisation des tests en batchs :

Un protocole de test de la capacité d'épuration des biochars dans les eaux usées a été développé. Il permet de reproduire au laboratoire, avec des eaux usées prélevées en STEP, les conditions d'épuration rencontrées en conditions réelles.

5 campagnes d'échantillonnage et d'analyse ont été réalisées.

Les deux premières campagnes d'analyse montrent que les biochars issus de la filière déchets de bois criblés ne parviennent pas à épurer les eaux usées. Il est décidé d'améliorer les propriétés de surface de ces biochars par un traitement additionnel à la vapeur (activation à la vapeur).

Les trois campagnes suivantes sont réalisées avec des biochars activés à la vapeur. **Les performances de traitement des eaux usées par les biochars de déchets de bois activés à la vapeur sont équivalentes à celle d'un charbon activé issu de l'importation.** ([Annexe 1, page 24](#) ; [Annexe 1 page 26](#))

Bilan délivrables WP2 :

Proposition d'un choix de biochar pour l'épuration des micropolluants en remplacement des charbons actifs	Choix des biochars à base de déchets de bois activé à la vapeur
Publication scientifique sur les propriétés épuratives des micropolluants par les biochars	Communication congrès international (Bari, 2013)* Publication scientifique en cours de préparation (pour Bioressource Technology).
Journée d'étude pour la VSA	Non réalisé car non pertinent à ce stade de l'étude. L'étape de la mise en œuvre, qui intéresse la VSA, ne fait pas partie du projet SMACC. En cours : contact STEP de Vidy : demande de présentation des résultats.

* Slijepcevic A., Favre F., Piantini U., 2013. Biochar as alternative to activated chars for priority micro-pollutant waste water depuration. Bari International Conférence BCD 2013: Biochars, Composts, and Digestates.

WP3 Technosols épurateurs pour les eaux de ruissellement

Objectifs détaillés:

- 1) Test de la durabilité des substrats
- 2) Suivi de la croissance végétale
- 3) Test performance d'épuration sur les microcosmes
- 4) Test de mobilité / rétention de polluants sur mini colonnes
- 5) Mesure des caractéristiques hydrodynamiques des substrats

Résultats:

- 1) Un banc d'essai a été réalisé en partenariat avec le centre de formation professionnelle nature en environnement du canton de Genève pour mesurer l'évolution sur le long terme des performances physiques et du vieillissement des substrats développés.

Après 2 ans d'exploitation, **on n'observe aucun tassement** du substrat.

Les mesures des propriétés physiques des substrats faites au laboratoire montrent par contre une **diminution de la porosité totale** de 10% à 5 % pour les trois substrats testés. De plus, **la porosité moyenne augmente au détriment de la porosité fine, ce qui correspond à un processus d'agrégation biologique de la matière organique couramment observé dans les sols**. Cette hypothèse devra cependant être vérifiée sur le long terme.

- 2) La croissance végétale est suivie sur microcosmes et sur les prototypes implantés *in situ*. La liste des végétaux testés et leur performance sont consultables à l'[annexe 2, page 11](#). Les végétaux sont à choisir en fonction du régime hydrique de la cassette et du micro-climat local et du régime pluviométrique du site. Sur les prototypes testés, en période de grande sécheresse, une irrigation complémentaire s'est avérée nécessaire.
- 3) et 4) Les caractéristiques hydrodynamiques et les capacités épuratrices des substrats ont été mesurées sur des colonnes soumises à des charges hydrauliques et polluantes correspondant aux conditions annuelles rencontrées *in situ* à Perolles. Elles s'évaluent par :
 - a. le bilan de rétention des polluants dans le substrat,
 - b. par l'analyse de leur mobilité
 - c. Et par l'évolution de la perméabilité à saturation des substrats.

Les colonnes montrent une très **forte capacité d'épuration des polluants particulaires (70%)**.

La mobilité des polluants Cu, Zn, Ni, Pb, Cd a été observée : **Cu, Ni et Pb sont retenus dans les 10 premiers centimètres du substrat ; Cd migre jusqu'à 25 cm de profondeur et Zn jusqu'à 15 cm**. Ces deux derniers polluants sont connus comme les plus mobiles parmi les polluants métalliques.

Par ailleurs, **après avoir été exposés à une charge polluante d'une année** les substrats montrent une diminution de la perméabilité à saturation qui passe de **la valeur initiale de 1900-3600 mm/h à celle d'un sol de perméabilité moyenne (40 mm/h)**. La perte de perméabilité est due à un **colmatage limité à la surface du substrat** (5 premiers centimètres). La localisation en surface du colmatage permet un entretien facilité des installations.

Les perméabilités mesurées sont très favorables au traitement de grands volumes d'eaux ruisselés, ce qui correspond à une caractéristique recherchée de ces substrats ([annexe 2 page 6](#)).

Bilan délivrables WP3 :

Compositions optimales des substrats pour une performance maximale (débit, hauteur de colonne pour l'épuration).	Le dimensionnement des structures épuratrices répond aux contraintes locales de traitement (surface d'interception), la hauteur des cassettes a été réduite à 30 cm : compromis optimal entre volume de substrat et hauteur de traitement (piégeage des polluants). Plusieurs mélanges sont opérationnels, le suivi du relargage des composés fins et du COD devra être étudié pour une optimisation des systèmes.
Choix de végétalisation et contraintes d'irrigation et de volume de substrat associés.	Résistances des espèces testées évaluées. Choix à faire selon le régime hydrique des cassettes, l'exposition <i>in situ</i> et le régime pluviométrique.
Publication scientifique sur les performances et la durabilité du substrat.	Communication congrès international (Bari, 2013)* Communication congrès NOVATECH, (Lyon, 2016)** Publication en cours de préparation
Données de validation du fonctionnement pour la VSA	Présentation des résultats lors de l'inauguration du banc d'essai et visite du site. Présentation AquaPro Bulle, 2014.

*Boivin P., Guiné V., Sauty A., 2013. Biochar-based technosols : evaluation of their potential for different effluent deputation applications. Bari International Conférence BCD 2013: Biochars, Composts, and Digestates.

**Spahni B., Slijepcevic A., Froidevaux M., Ribl J.-M., Boivin P., Guiné V., Favre Boivin F., 2016. New green runoff waters treatment system (SMACC): in situ monitoring of the performance. Lyon, NOVATECH.

WP4 : design et dimensionnement des structures verticales végétalisées

Objectifs du WP4:

- 1) Proposition d'une structure verticale modulable
- 2) Elaboration d'un design des structures en fonction de situations types et des matériaux envisagés
- 3) Définition des conditions cadres pour la gestion de l'eau
- 4) Définition d'un débit nominal par unité de surface
- 5) Définition des contraintes statiques des diverses configurations
- 6) Proposition pour automatisation de gestion de l'eau

Résultats :

- 1) et 2) Sur la base d'un cahier des charges défini et approuvé par tous les partenaires du projet, l'ECAL a développé le design des futurs éléments.

Une typologie des situations dans lesquelles les systèmes de traitement des eaux SMACC (dit cassettes SMACC) peuvent être utilisés a été réalisée ([Annexe 3.1](#)).

L'étude a porté également sur le choix des matériaux de réalisation des cassettes : des variantes en bois, béton, métal, plastique, verre et céramique sont proposées. Seuls les trois premiers matériaux ont été retenus. Les coûts de production des matériaux bois, béton, métal ont été étudiés ([Annexe 3.2 et 3.3](#)).

- 2) Des prototypes ont été réalisés. Le premier, un prototype en bois et inox, sous forme d'une tour végétalisée avec différentes variétés de plantes a été installé dans un lieu public à grande fréquentation (Plainpalais, Genève (voir le prototype). L'étude s'est focalisée sur le vieillissement des matériaux et le comportement de la population vis à vis des structures (risque de déprédations et acceptabilité) ([Annexe 3.4](#))
 - Le bois montre des traces de vieillissement.
 - Aucune déprédation n'est constatée.
 - Une étude d'acceptabilité des structures montre un accueil favorable de ces structures verticales végétalisées dans l'espace public.
 - Les contraintes statiques sont déterminées et le dimensionnement des ancrages est réalisé.

Le deuxième prototype, en acier inox, a été construit et installé comme démonstrateur sur le site de la HEIA-Fr. Il s'agit d'une tour végétalisée avec du gazon qui traite les eaux d'un parking. On y a étudié la résistance de la végétation et la durabilité du substrat ([Annexe 3.8, Figure 2](#)).

- Cette combinaison est optimale : la végétation est très résistante et protège le substrat.
 - L'inox ne montre aucun signe de vieillissement.
- 3) , 4) Les contraintes de gestion de l'eau de ruissellement retenues sont tirées des directives récemment élaborées par la confédération suisse (OFROU, 2013) et

réfléchies pour permettre une végétalisation. Ainsi, les systèmes sont dimensionnés et réalisés pour :

- traiter le 90% du volume annuel d'eaux de ruissellement du bassin versant auquel ils sont raccordés.
- Répartir l'eau sur les cassettes pour permettre de diminuer les épisodes de sécheresse pour la végétation

Le détail de la méthode est consultable à l'annexe 4, page 13-14.

- 4) Un choix fort d'orientation du projet est la modularité des systèmes proposés. De ce fait, il n'existe pas une configuration type d'installation mais les contraintes statiques de chaque configuration doivent être étudiées. Les contraintes statiques ont été étudiées pour les deux prototypes verticaux installés. Il a été remarqué que les approches conventionnelles de calcul pour chaque situation et matériaux choisis pouvaient s'appliquer (Annexe 3.7).
- Pour les deux prototypes, les contraintes statiques sont identifiées, les ancrages et les jonctions entre les différents modules sont dimensionnés.
- 5) Une analyse des coûts et bénéfices a montré que l'automatisation de la gestion de l'eau n'était pas favorable ni réaliste. Par contre, l'automatisation du contrôle de la performance des installations a été réalisée (Annexe 4, chapitre 6).

Bilan délivrables WP4 :

Dessins techniques et maquettes de prototypes	Cahier d'idées, dessins techniques, devis, prototypes construits
Critères de dimensionnement et de réalisation	Méthode de dimensionnement : détermination de la pluie de projet (intensité \leq à 90% des intensités sur une série temporelle) ; calcul de Qmax par cassette selon équation de Bernoulli. Calcul de Q ruisselé, calcul du nombre de cassettes nécessaires.
Documentation détaillée pour les associations professionnelles (VSA, VSS)	<p>Prototype présenté au salon des professionnels de l'eau AquaPro, Bulle (2014).</p> <p>Présentation des résultats lors de l'inauguration du banc d'essai et visite du site.</p> <p>Présentation des résultats à la VSS, novembre 2015.</p>

WP5 : Technosols épurateurs pour les eaux de ruissellement

Objectifs du WP5:

- 1) Réalisation d'un prototype et suivi de la performance des systèmes de traitement des eaux de ruissellement de chaussée sur 2 sites.

Résultats :

- 1) Un partenariat ville de Fribourg, canton de Fribourg, HEIA-Fr a été développé pour la construction d'un banc d'essai *in situ* : une passerelle de 20 m de longueur, équipée de 10 cassettes végétalisées, destinées au traitement de 300 m² de route a été construite et installée le long du Pont de Pérolles. Un dispositif semi automatique de suivi de la performance des installations a été installé.
- Mise en place d'une instrumentation de mesure robuste selon les règles de l'art.
 - i. La turbidité en entrée de système, en sortie et en surverse du système est mesurée.
 - ii. Les hauteurs d'eau en entrée, sortie et surverse du système sont mesurées.
 - iii. La pluviométrie est enregistrée à l'aide d'un pluviomètre à augets.
 - iv. Des préleveurs automatiques d'eau sont installés, ils sont asservis au volume de pluie.
 - v. Une station d'acquisition collecte toutes les données et déclenche les prélèvements automatiques.
 - Un protocole de contrôle et d'entretien des installations de mesure a été élaboré. L'usage a montré qu'un entretien hebdomadaire des instruments était nécessaire pour assurer une qualité de mesure adéquate.
 - Un code de traitement automatique des données brutes a été développé.
 - Les performances d'épuration, de durabilité du substrat et de la végétation sont analysées.
 - i. Le système de traitement montre une performance hydraulique très élevée (>90%). Ceci découle des qualités du substrat et de l'utilisation d'une méthode de dimensionnement adaptée.
 - ii. Les capacités de traitements, analysées du point de vue de l'abattement des MES et de l'abattement du cuivre total sont dans les limites inférieures des exigences de l'OFROU et s'élève à 57% et 48% respectivement.
 - iii. Le système conserve sa performance de traitement après 1 an d'exploitation. Cependant, les premières cassettes, les plus sollicitées, voient leur perméabilité largement réduite (de >2000 mm/h à <100 mm/h).

- Une optimisation des performances hydrauliques et épuratives du substrat devrait être réalisée : une légère diminution de la performance hydraulique devrait en effet permettre une augmentation de la performance épurative.
- Les différentes végétations installées *in situ* ont montré des résistances variables. En période de grande sécheresse (été 2015) des irrigations complémentaires ont été nécessaires. Les résultats des différentes variétés sont présentés à l'[annexe 2](#).

Bilan délivrables WP5 :

Site démonstration pour la diffusion de l'innovation	Site du Pont de Pérolles Site du parking de la HEIA-Fr Site du centre de formation professionnelle nature en environnement du canton de Genève
Plans de réalisation	Plans disponibles à l' Annexe 4 et annexe 3.5
Protocole et dispositif de suivi des installations	Protocole disponible à l' Annexe 4
Optimisation / validation des conclusions du WP4	Optimisation du substrat utile pour : <ul style="list-style-type: none"> • augmenter l'efficacité de traitement • diminuer la taille des installations • diminuer les concentrations de DOC en début d'exploitation • Contrôler le risque de perte des parties fines du substrat en début de traitement Optimisation méthode de végétalisation : <ul style="list-style-type: none"> • Solution gazon comme végétalisation validée. • Tester la compatibilité gazon / végétation ornementale. • Tester la végétalisation sur natte Optimisation des contenants : <ul style="list-style-type: none"> • Tester la possibilité d'utiliser des matériaux moins onéreux.

WP6 : Valorisation

Scientifique :

Publications :

Slijepcevic, A., Abiven S., Piantini U., Frey U., Favre Boivin F. Steam-activated wood waste-based biochars as micropollutant adsorbents in wastewater equally efficient as commercial activated carbon. *In preparation for Bioresources Technology.*

Guiné, V. and Boivin, P. – 2016 - Biochar based substrates for pesticides contaminated effluent treatment in new biobeds – J. Agro. Sust. Dev. – In preparation

Communications :

Boivin P., Guiné V., Sauty A., 2013. Biochar-based technosols : evaluation of their potential for different effluent depuration applications. Bari International Conférence BCD 2013: Biochars, Composts, and Digestates.

Favre Boivin F., Slijepcevic A., Guiné V., Sauty A., Boivin P., Piantini U., 2013.

Characterisation of wood waste biochars for micro pollutant adsorption properties, Bari International Conference BCD: Biochars, Composts, and Digestates.

Slijepcevic A., Favre F., Piantini U., 2013. Biochar as alternative to activated chars for priority micro-pollutant waste water depuration. Bari International Conférence BCD 2013: Biochars, Composts, and Digestates.

Spahni B., Slijepcevic A., Froidevaux M., Ribl J.-M., Boivin P., Guiné V., Favre Boivin F., 2016. New green runoff waters treatment system (SMACC): in situ monitoring of the performance. Lyon, NOVATECH

Pédagogique :

Slijepcevic A. (2014). Test et adaptation d'un biofiltre pour le traitement des eaux de ruissellement de chaussée. Travail de Master Hes-so.

Présentation des systèmes développés et des différents prototypes dès 2013 lors du cours bachelor Génie Civil HEIA-Fr : gestion des eaux de ruissellement

Présentation des substrats épurateurs et des systèmes développés dès 2013 lors des cours bachelor Génie Civil hepia : Environnement Construit et Agronomie hepia : Micropolluants agricoles

Présentations des systèmes développés dans les cours de formation continue : CAS Nature en ville (hepia) et formation VSA Spécialiste de l'évacuation des eaux de bien-fonds.

Travail de bachelor 2016 en cours sur la gestion des eaux de la route principale de la commune de Marly et du Pont de Pérolles. La possibilité d'utilisation à grande échelle des systèmes SMACC sera étudiée.

Vulgarisation :

Communication inauguration du banc d'essais du pont de Pérolles, HEIA-Fr, le 15 septembre 2015

Communication OFROU: Système décentralisé de traitement des eaux de chaussées », Ittigen, le 5.11.2015.

Exposition d'un prototype au salon Cleanteccity à Bern en mars 2013 – « Techno-soil greened walls depuration technology »

Exposition du prototype au salon Aquapro à Bulle, le salon des professionnels de l'eau en 2014.

Economique :

Après analyse des brevets existants dans le domaine du traitement des eaux ou domaines proches, il a été décidé de ne pas essayer de prendre un brevet : en effet, les brevets proches de cette thématique en cours de dépôts sont très peu soutenus. Cela présage peu de chance de réussite pour un investissement important.

Contacts en cours avec les CFF pour le traitement des eaux de ruissellement des voies ferrées en agglomérations.

Contacts en cours avec la STEP de Vidy.

Une difficulté importante pour le passage vers la commercialisation a été relevée et discutée avec la direction de la HES-SO (M. Moser). Nous prenons soin de

l'exprimer ici car elle est coutumière aux projets de développement issus de nos écoles.

En effet, à cette étape du projet, les prototypes réalisés nous ont permis de vérifier et de valider le potentiel technique de la solution proposée ainsi que l'intérêt qu'elle semble susciter auprès de potentiels acquéreurs, essentiellement les collectivités publiques.

Or, pour aller de l'avant et poursuivre le développement jusqu'à une possible commercialisation du produit, il faudrait :

- réaliser une première étude de marché pour valider l'intérêt pressenti et évaluer le potentiel véritable du marché et, en parallèle
- réaliser une première étude d'industrialisation pour définir les coûts de production

Sans ces prérequis, difficile en effet d'intéresser une entreprise à investir dans le développement de cette opportunité d'affaires ou, encore, de créer une start-up bénéficiant des meilleures chances de succès.

Malheureusement, aucune aide concrète n'est disponible pour financer ce type d'activités qui permettraient de sortir les résultats du laboratoire et de tenter de les mettre à profit commercialement.

Conclusions et perspectives:

Ce projet a permis de mettre en évidence que la filière déchets de bois est pertinente pour la production de biochars utilisables pour le traitement des eaux de ruissellement. Une activation à la vapeur supplémentaire en fait un produit de performance équivalente aux charbons actifs pour le traitement des micropolluants dans les eaux usées. Cette filière offre donc une alternative moins polluante et locale aux produits d'importation. L'impact de la phase d'activation à la vapeur sur le bilan énergétique de la production devrait être étudié.

Les capacités d'épuration des micropolluants par les biochars sont fortement corrélées à leur surface spécifique et à leur capacité d'échange cationique. Ce dernier paramètre étant plus facile à caractériser, nous proposons de le conserver comme critère d'évaluation rapide de la capacité d'épuration d'un biochar.

Plusieurs solutions d'intégration pour transformer un simple contenant en mobilier urbain ont été étudiées, notamment en variant les matériaux. Le bois, le béton et l'acier inox ont été sélectionnés pour leur intérêt en terme de coût, de durabilité, de mise en forme et d'esthétique. En fonction des contextes et des quantités à produire, le projet est à même de proposer la meilleure option.

Diverses végétations ornementales ont été testées : elles offrent une gamme de résistances et nécessitent des entretiens variés. Elles doivent donc être choisies en fonction de ces critères.

S'il fallait penser à la généralisation de l'utilisation de déchets non valorisés de biochars pour le traitement des eaux, une étude portant sur les conditions de sécurisation de la filière d'alimentation en déchets pour la production de biochars devrait être réalisée. Potentiellement, les besoins en biochars pour l'épuration se chiffrent pour la Suisse en millions de tonnes par an, dans un marché européen de production de déchets agricoles largement excédentaire par rapport à ce besoin. Il s'agirait de préciser les conditions nécessaires à réaliser ce potentiel.

Annexe 1

WP 1 :

Production de biochars et caractérisation des différents biochars (propriété de structure et de surface).

WP 2 :

Tests d'épuration des eaux de STEP par des biochars au lieu de charbons actifs.

Ana Slijepcevic, Collaboratrice scientifique HEIA-FR

Fabienne Favre Boivin, professeure HEIA-FR

Umberto Piantini, professeur HES-SO-Valais

Urban Frey, professeur HES-SO-Valais



Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg
Hochschule für Technik und Architektur Freiburg

INSTITUT ITEC

**WP1: PRODUCTION DE BIOCHARS ET CARACTÉRISATION DES
DIFFÉRENTS BIOCHARS (PROPRIÉTÉ DE STRUCTURE ET DE
SURFACE).**

**WP2 : TESTS D'ÉPURATION DES EAUX DE STEP PAR DES
BIOCHARS AU LIEU DE CHARBONS ACTIFS.**

N° SAGE-X : 12906 30700

Ana Slijepcevic, Collaboratrice scientifique HEIA-FR

Fabienne Favre Boivin, professeure HEIA-FR

Umberto Piantini, professeur HES-SO-Valais

Urban Frey, professeur HES-SO-Valais

RAPPORT FINAL



Hes·so // **FRIBOURG
FREIBURG**

Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale
Fachhochschule Westschweiz



1 Résumé

Dans le but de satisfaire à la future législation en matière de la protection des eaux, de nombreuses stations d'épuration en Suisse devront être équipées de traitements supplémentaires permettant d'éliminer les polluants organiques traces (micropolluants) des eaux usées. L'efficacité du traitement sera évaluée sur des composés cibles (benzotriazole, carbamazépine, diclofenac, mecoprop, sulfaméthoxazole), et devrait atteindre un abattement de 80% sur la totalité de la chaîne de traitement.

L'adsorption sur charbon actif est une technique qui fait actuellement ses preuves. Cependant, les charbons actifs sont des produits importés, issus pour partie de ressources non renouvelables, et contenant des métaux lourds. Un produit analogue au charbon actif de par leur fonctionnement est les biochars, des déchets végétaux pyrolysés, dont la production locale existe.

L'objectif de ce travail est de vérifier la performance comme adsorbants de micropolluants dans les eaux usées des biochars produits à base de déchets végétaux.

En premier lieu, les substrats les mieux adaptés sont choisis parmi les sources de déchets existantes. Ensuite, des essais d'abattement de micropolluants en solution pure sont effectués. Sur la base des résultats de ces essais, une filière de production de biochars est sélectionnée et cinq biochars sont testés en laboratoire, dans des conditions équivalentes à celles prévalent en station d'épuration. De plus, une caractérisation des propriétés d'adsorption des biochars est réalisée sous forme de la mesure des isothermes d'adsorption. Les caractéristiques des biochars, ainsi que leur capacité d'abattement des micropolluants, sont comparés avec un charbon activé de référence, utilisé efficacement dans le traitement des eaux usées.

Des corrélations sont ensuite recherchées entre les taux d'abattement en eau usée et les paramètres de propriétés de surface mesurés au WP1 et WP2 des biochars utilisés. Ceci a pour but de sélectionner les mesures les plus pertinentes et les moins coûteuses pour estimer une capacité d'abattement de la pollution et la stabilité de la qualité des biochars sur une longue période de production.

Les biochars à base de déchets de bois criblés, produits à la déchetterie de la Coulette (VD), ainsi que leur équivalents activés à la vapeur, ont été retenus pour les essais d'abattement de micropolluants en eau usée, à la fois pour leur bilan écologique et leurs capacités d'abattement en eau pure. Un biochar à base de bois de hêtre, ainsi que son équivalent activé à la vapeur ont aussi été testés.

Les résultats montrent que les biochars non-activés ont un abattement faible (entre 5 et 20%) pour quatre composés-cibles (benzotriazole, carbamazépine, diclofenac, sulfaméthoxazole). Le biochar à base de déchets de bois activé à la vapeur montre un abattement proche, voir meilleur que le charbon actif de référence. Dans les conditions d'essai, le taux d'abattement des composés cibles est satisfaisant (en moyenne 70%, atteint 80%) pour le diclofenac et la carbamazépine, mais en dessous (en moyenne 30%, atteint 50%) pour le benzotriazole et le sulfaméthoxazole. En tenant compte de la totalité de la chaîne de traitement, le niveau d'abattement exigé est potentiellement satisfait.

La capacité d'échange cationique, corrélée à la surface spécifique (SSA) du biochar, s'avère aussi fortement corrélée à l'abattement des micropolluants en eau usée. S'agissant d'une méthode analytique facile à mettre en œuvre, la CEC est un paramètre à retenir pour le suivi systématique de la qualité des biochars lors de la pyrolyse et l'activation, dans le but d'assurer la stabilité de la production sur une période prolongée, en vue d'une exploitation industrielle.

2 Notations

2.1 Caractères latins

BET	$[m^2 g^{-1}]$	Méthode Brunauer, Emmett, Teller (surface spécifique d'adsorption)
CEC	$[cmolc kg^{-1}]$	Capacité d'échange cationique
COD/DOC	$[mg L^{-1}]$	Carbone organique dissous / Dissolved organic carbon
COT/TOC	$[mg L^{-1}]$	Carbone organique total / Total organic carbon
C_s	$[\mu g g^{-1}]$	Concentration sur solide à l'équilibre
C_{sMax}	$[\mu g g^{-1}]$	Concentration sur solide maximale (paramètre de Langmuir)
C_w	$[\mu g L^{-1}]$	Concentration en solution à l'équilibre
$DV_{(10,50,90)}$	$[\mu m]$	Diamètres caractéristiques (distribution en volume)
HAP	$[mg L^{-1}]$	Hydrocarbures aliphatiques polycycliques
K_f	$[(\mu g g^{-1})(\mu g L^{-1})^n]$	Constante de Freundlich
K_l	$[L \mu g^{-1}]$	Constante de Langmuir
K_{ow}, D_{ow}	$[\]$	Rapport des concentrations octanol/eau (molécule non-dissociée ou dissociée)
n	$[\]$	Paramètre d'intensité d'adsorption (Freundlich)
PCB	$[mg L^{-1}]$	Polychlorobiphényles

2.2 Abréviations

BT	Benzotriazole
CZ	Carbamazepine
CA	Charbon activé
CAP	Charbon activé en poudre
DF	Diclofenac
DIN	Deutsches Institut für Normung
EAWAG	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung,
MP	Abwasserreinigung und Gewässerschutz
OFEV	Office fédéral de l'environnement
Oeaux	Ordonnance sur la protection des eaux
SM	Sulfamethoxazole
SSA	Surface spécifique (Specific surface area)
STEP	Station d'épuration
UF	Ultrafiltration

3 Introduction

La présence de micropolluants dans les eaux usées et leur faible abattement dans les stations d'épurations conventionnelles sont au centre des préoccupations environnementales en Suisse ces dernières années [Abegglen and Siegrist 2012]. Suite à la détection de traces de divers produits pharmaceutiques, phytosanitaires ou d'entretien dans les eaux réceptrices mais aussi dans l'eau potable [Vieno 2007; Morasch, Bonvin et al. 2010; Perazzolo, Morasch et al. 2010], une modification de la base légale suisse, l'ordonnance sur la protection des eaux [OEaux 1998], a été proposée : elle exigerait un abattement de 80% minimum des substances organiques traces.

Selon la nouvelle ordonnance, le rendement d'épuration sera mesuré sur la base d'un nombre limité de substances indicatrices (organiques persistants) appartenant aux domaines d'application suivants: produits chimiques d'usage domestique, médicaments et biocides [OFEV 2009]. Dans le but de satisfaire à cette exigence, les stations d'épuration devraient doubler, voire tripler leur rendement actuel. Les techniques à utiliser ne sont pas spécifiées, mais selon l'état d'expérience actuelle, deux procédés semblent les plus prometteurs : l'oxydation à l'ozone ou l'adsorption sur charbon actif. Une combinaison des deux est envisageable. Les coûts de l'installation et d'exploitation de ces procédés seront élevés, et leur bilan énergétique et environnemental est aussi en question. L'ozonation est une technique rapide et efficace, mais comporte des risques, est coûteuse en énergie, et crée des produits de transformation pouvant être toxiques. Le traitement au charbon actif est plus lent et demande une étape de séparation, mais apparaît actuellement comme optimal pour l'élimination des polluants des eaux usées [Abegglen 2009].

Actuellement, le charbon actif utilisé dans l'industrie en Suisse est principalement originaire d'Asie, où il est produit soit à partir de charbon minéral ou de bois, mais aussi à partir de végétaux cultivés uniquement dans ce but (bambou, miscanthus). De nouvelles filières de production, basées principalement sur des déchets végétaux (coquilles de noix, noyaux, écorces, déchets de bois...), se développent actuellement. L'industrie suisse produit des quantités importantes de déchets végétaux : leur pyrolyse permettrait de produire un biochar localement, présentant un bon bilan écologique, utilisable pour les technologies de dépollution. Le charbon végétal ainsi produit est appelé *biochar*. Des filières de production de biochars existent déjà en Suisse et dans le monde.

Les biochars montrent des propriétés chimiques et physiques favorables à l'épuration proches de celles d'un charbon. Les particularités d'un biochar par rapport à un charbon classique résident d'une part dans la source de biomasse (par exemple déchets agricoles), et d'autre part dans la technique de pyrolyse, traitement thermique en absence de produits oxydants qui implique un contrôle de température, pression, composition de l'atmosphère et flux de gaz, permettant de contrôler le degré de carbonisation de la biomasse [Antal and Groenli 2003].

Ce travail a pour objectif de tester des biochars produits en Suisse à base de déchets organiques comme adsorbants de micropolluants dans les eaux usées.

Cette étude contient les différentes étapes suivantes : i) sélectionner une filière et une technique de production optimale d'un point de vue écologique et économique, permettant de fournir un biochar suffisamment efficace dans l'abattement des micropolluants en eau usée. ii) Dans une deuxième étape, caractériser simplement la capacité d'adsorption des charbons en utilisant des tests d'adsorption en laboratoire avec des polluants en solution pure. iii) Mesurer la capacité d'abattement de micropolluants par les biochars dans l'eau usée, en conditions d'exploitation réelle.

4 Matériel et méthodes

4.1 Biochars étudiés

A partir de la base de données *Biochar Science Network Switzerland*, les biochars les mieux adaptés pour une application dans le traitement des eaux usées ont été sélectionnés.

Plusieurs caractéristiques ont été prises en compte : les propriétés d'adsorption et leur reproductibilité, la faible teneur en métaux lourds, HAP et PCB (qualité « premium » selon European Biochar Certificate, correspondant aux matériaux adaptés à un contact alimentaire) [EBC 2012], la complexité de la mise en place de la filière de production, le bilan financier, écologique et énergétique de la filière de production et d'activation, ainsi que la stabilité de la production dans le temps.

4.1.1 Caractéristiques de biomasse, pyrolyse et activation

Les biochars choisis sont produits dans des pyrolyseurs conçus par l'entreprise Pyreg, qui développe des systèmes optimisant les flux de matière et rend possible l'utilisation des gaz libérés lors de la pyrolyse directement comme source d'énergie pour le réacteur du pyrolyseur [PYREG 2011].

Les trois biochars choisis ont été produits par l'entreprise Swiss-Biochar. Le biochar BC21 a été produit à partir de *Miscanthus*, graminée riche en lignocellulose, et le biochar BC34 à partir de déchets de betterave sucrière. Le biochar BC0912 a été produit à partir de déchets de bois criblés (essences mixtes). Dans le cas des trois biochars, la biomasse a été transformée dans une unité de pyrolyse Pyreg 500W, pendant 20 min à 700 °C. Un charbon actif commercial (CA) testé avec succès dans l'élimination des micropolluants dans l'eau usée a été utilisé pour la comparaison de l'efficacité de l'adsorption.

Des biochars activés produits au sein de la même filière ont aussi été testés. Un biochar à base de bois de hêtre pur (BH0) et le biochar BH17 à base de déchets de bois criblés, équivalent de production du BC0912 ont été activés par différentes méthodes : vapeur (atmosphère Ar, 900 °C, 1h, ajout vapeur 0.3 l/h), l'acide phosphorique, hydroxyde de potassium (avant et après la pyrolyse) (600 °C, 10 min, ajout agent activant 0.3 l/h, concentration 20%), et une incubation en présence de ferments lactiques. L'activation chimique a été menée soit sur le biochar (après pyrolyse) soit sur la biomasse de départ, lors du processus de pyrolyse. L'activation avec lactoferments a été effectuée en incubant la biomasse de départ en présence d'une mélasse fermentée à pH 4.

Les biochars BH1-10 sont produits à partir du biochar à base de bois de hêtre pur BH0, et les biochars BH11-BH16 sont produits à partir du biochar à base de déchets de bois criblés BH17, équivalent de production du BC0912 (Tableau 4-1).

4.1.2 Analyses physico-chimiques

Les biochars utilisés pour les tests en eaux usées ont été caractérisés de manière plus détaillée par des analyses de composition chimique et de surface.

La teneur en carbone, hydrogène, azote et oxygène de la matrice organique est déterminée selon la norme DIN 51732 (Essai des combustibles solides - Détermination du carbone, de l'hydrogène et de l'azote total - Méthodes instrumentales) et DIN 51733 (Essai des combustibles solides - Analyse élémentaire et calcul de l'oxygène). La teneur en oxygène est déterminée en déduisant la teneur en cendres et C, H, N organiques de la masse totale de matière sèche. L'appareil utilisé est un CNH TruSpec Micro Analyser (Leco®).

La teneur en cendres est déterminée selon la norme DIN 51719 (Essais des combustibles solides - Détermination du taux de cendres).

La surface spécifique d'adsorption est déterminée selon la norme ISO 9277 (Détermination de l'aire massique (surface spécifique) des solides par adsorption de gaz -- Méthode BET) et DIN 66132 (Détermination de la surface spécifique des matières solides par adsorption d'azote - procédé différentiel monopoint suivant Haul et Dümbgen).

La masse volumique est déterminée selon la norme DIN 66137 (Détermination de la masse volumique solide - Partie 2: Pycnométrie à gaz).

La teneur en eau est déterminée selon la norme DIN 51718 (Essai des combustibles solides - Détermination de la teneur en eau et de l'humidité de l'échantillon pour analyse).

La composition élémentaire, le taux de cendres, la teneur en eau ainsi que la surface spécifique ont été mesurés par le laboratoire Eurofins Umwelt Ost GmbH Freiberg (09633 Halsbrücke, Allemagne).

La capacité d'échange cationique est déterminée selon la norme NF X31-130 (Qualité des sols - Méthodes chimiques - Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations extractibles - la méthode au chlorure de cobaltihexamine) au laboratoire Sols et substrats de l'institut d'agronomie de la haute école du paysage, de l'ingénierie et d'architecture (Hepia) de Genève.

Tableau 4-1 : Liste des adsorbants testés (non-activés et activés par divers procédés)

Code	Type d'activation (si activé)	Tests d'adsorption en solution pure	Caractérisation physico-chimique	Tests d'adsorption de polluants-cibles en eau usée	Isothermes d'adsorption avec polluants-cibles
CA	<i>Charbon activé commercial de référence</i>	*	*	*	*
BC21	<i>Biochar à base de Miscanthus, non-activé</i>	*	*		
BC34	<i>Biochar à base de déchets de betterave, non-activé</i>	*	*		
BC0912	<i>Biochar à base de déchets de bois criblés, non-activé</i>	*	*	*	*
BH0	<i>Biochar à base de bois de hêtre pur, non-activé</i>	*	*	*	
BH1; BH2	<i>BH0 activé à la vapeur</i>	*	*	*	
BH3; BH4	<i>BH0 activé à l'acide phosphorique, pendant pyrolyse</i>	*			
BH5; BH6	<i>BH0 activé à l'acide phosphorique, après pyrolyse</i>	*			
BH7; BH8	<i>BH0 activé à l'hydroxyde de potassium, pendant pyrolyse</i>	*			
BH9; BH10	<i>BH0 activé à l'hydroxyde de potassium, après pyrolyse</i>	*			
BH11; BH12	<i>BH17 traité aux ferments lactiques</i>	*	*		
BH13; BH14	<i>BH17 activé à la vapeur</i>	*	*	*	*
BH15; BH16	<i>BH17 activé à l'acide phosphorique, après pyrolyse</i>	*			
BH17	<i>Biochar à base de déchets de bois criblés (idem BC0912)</i>	*	*	*	*

4.2 Micropolluants testés

Des centaines de composés organiques en trace (micropolluants) sont présents dans les eaux usées. Sur la base de mesures et de modélisations, un certain nombre de composés ont été sélectionnés par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) comme traceurs de la pollution des eaux par les micropolluants provenant des réseaux d'assainissement. Hormis l'impact négatif démontré sur les milieux récepteurs, les substances indicatrices doivent remplir un certain nombre de critères : elles sont détectées en concentrations mesurables et de façon répétée dans les eaux de surface en Suisse, et il a été démontré qu'elles parvenaient dans les cours d'eau récepteurs essentiellement par la voie des eaux usées urbaines ; le déversement de ces substances est homogène dans le temps et dans l'espace dans les zones urbaines ; les données de consommation, leur métabolisme dans le corps (si elles sont ingérées et métabolisées), ainsi que leur taux de dégradation biologique en station d'épuration sont connus [Götz, Mettler et al. 2013].

Cette liste se limite actuellement aux composés suivants : pour les médicaments - la carbamazépine (antiépileptique), le diclofenac (analgésique), le sulfaméthoxazole (antibiotique) ; pour les produits d'entretien - le benzotriazole (anticorrosif) et pour les biocides - le mécoprop (herbicide). Suivant l'état de la recherche, la liste est susceptible d'évoluer [OFEV 2009; EAWAG 2010].

4.2.1 Caractéristiques des composés influençant la sorption

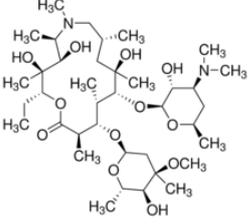
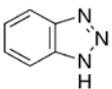
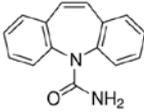
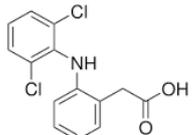
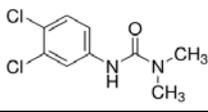
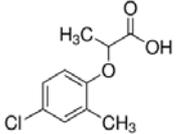
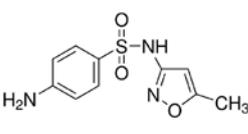
Dans le cas de techniques d'élimination des micropolluants par adsorption sur des matériaux carbonés, certaines propriétés des composés peuvent fortement influencer l'efficacité du traitement : le poids et la taille de la molécule, sa forme (linéaire, ramifiée ou cyclique), les groupes fonctionnels, la constante de dissociation, la polarité [Moreno-Castilla 2004]. De façon générale, les molécules peu polaires, ayant une meilleure affinité pour la phase carbonée que pour la phase aqueuse, sont mieux adsorbées que les substances polaires ou chargées.

La constante de dissociation (pK_a) indique si la molécule donnée est à l'état neutre ou chargé au pH du milieu expérimental. Une variation du pH peut donc produire une modification de la charge de la molécule, et donc son affinité pour une surface chargée.

La taille et la forme de la molécule influencent la possibilité d'accéder aux micropores du biochar [Baudu 2001; Delle Site 2001; Villacañas 2006; Snyder, Adham et al. 2007].

La liste de polluants utilisés pour les essais est élaborée sur la base des données bibliographiques, des caractéristiques physico-chimiques des composés, et de l'expertise du laboratoire partenaire. Elle contient les cinq molécules cibles définies dans le projet de l'OFEV, et est complétée par deux substances supplémentaires, l'azithromycine (molécule de grande taille) et le diuron (composé neutre, très stable, permettant une bonne précision analytique). Les substances de référence sont obtenues auprès de Sigma Aldrich sous forme de poudre de qualité analytique.

Tableau 4-2 : Liste des substances prises en considération et leurs caractéristiques principales (en gras, polluants-cibles définis dans le projet OFEV)

Substance	Formule développée	Formule brute	Poids moléculaire	Solubilité (eau) g/l	log K_{ow} (non-dissocié)	pKa	log D_{ow} pH 7 (si dissocié)
Azithromycine (produit pharmaceutique, antibiotique) [McFarland, Berger et al. 1997]		C38-H72-N2-O12	749	0.007	4.02	8.74	
Benzotriazole (produit d'entretien, anticorrosif) [Serjeant and Dempsey 1979; Hansch, Leo et al. 1995]		C6-H5-N3	119	19	1.44	8.37	
Carbamazepine (produit pharmaceutique, antiépileptique) [Dalpozzo, Donzelli et al. 1989; Jones, Voulvoulis et al. 2002]		C15-H12-N2-O	236.7	0.018	2.45	13.9	
Diclofenac (produit pharmaceutique, anti-inflammatoire) [Avdeef, Box et al. 1998]		C14-H11-Cl2-NO2	296.15	0.05	4.51	4.15	1.37
Diuron (produit phytosanitaire, herbicide) [Hansch, Leo et al. 1995]		C9-H10-Cl2-N2-O	233	0.036	2.68	NA	
Mecoprop (produit phytosanitaire, herbicide) [Dallos, Wienke et al. 1993; Chamberlain, Evans et al. 1996]		C10-H11-Cl-O3	214.36	0.734	3.13	3.11	-0.19
Sulfamethoxazole (produit pharmaceutique, antibiotique) [Hansch, Leo et al. 1995; Boreen, Arnold et al. 2004]		C10-H11-N3-O3-S	253.28	0.5	0.89	6	

4.3 Tests d'abattement en solution pure

4.3.1 Biochars et micropolluants utilisés

Il s'agit d'évaluer l'efficacité des biochars en tant qu'adsorbants de micropolluants par des tests en solution contenant un seul composé, permettant d'uniformiser les tests et faciliter l'analyse des échantillons.

Lors d'une première étape de tests, trois biochars présentant la surface d'adsorption la plus élevée (selon analyse BET, 200-350 N-m²/g) ont été sélectionnés pour les premiers essais avec les micropolluants. Il s'agit de biochars obtenus à base de *Miscanthus* (BC21), des déchets de betterave sucrière (BC34), et des déchets de bois criblés (BC0912).

Les micropolluants choisis parmi les molécules cibles pour les premiers tests sont le diuron (pesticide), le benzotriazole (anticorrosif), et l'azithromycine (antibiotique). Ils couvrent un panel de taille, de polarité et de type de groupes fonctionnels.

Lors d'une deuxième étape, des biochars activés par différentes techniques ont aussi été testés en solution pure, en présence de deux composés faisant partie des cinq molécules-cibles, le benzotriazole et le diclofenac.

4.3.2 Protocole de travail

Chaque substance est premièrement dissoute dans un petit volume d'éthanol (1 mg/ml), et ensuite diluée à 10 mg/L dans CaCl₂ 0.01M et utilisée le jour même pour préparer les réactions (voir protocole plus loin).

Le biochar est séché à l'étuve (24h, 40°C), broyé à l'aide d'un broyeur automatique Retsch ZM 200 avec un tamis avec ouvertures de 80 µm, de sorte à présenter une granulométrie proche de celle du charbon actif de référence (annexe 9.11) :

- Charbon activé du commerce : Dv10 = 5.7±0.06 ; Dv50 = 16,3±0.06 ; Dv90 = 46.7±0.75
- Biochars broyés : Dv10 = 5.5±0.2 ; Dv50 = 18.7±3.3 ; Dv90 = 50.7±13.1

Il est ajouté aux échantillons sous forme d'une suspension-mère de 10 mg/ml dans CaCl₂ 0.01M

Les expériences sont effectuées dans l'eau ultra pure additionnée de CaCl₂ 0.01M pour simuler la force ionique de l'eau usée. Une solution d'un micropolluant unique est mise en présence de biochar : il n'y a donc pas d'effet de compétition entre divers micropolluants, ni avec la matière organique dissoute.

Pour la première étape des essais (biochars non-activés uniquement), différentes concentrations de polluant et de biochar sont testées pour déterminer les conditions d'essai optimales. Le premier ratio testé se rapproche des rapports rencontrés en conditions d'application : 20 mg/l de biochar pour des concentrations initiales de micropolluants jusqu'à 100 µg/l [Margot 2011]. Un deuxième ratio correspondant à une concentration de biochar dix fois plus élevée est testé pour assurer une adsorption (car l'on s'attend à une adsorption relativement faible) : 200 mg/l de biochar pour une concentration initiale de 100 µg/l de polluant. Les mêmes rapports mais des quantités 10 fois plus élevées de polluant sont aussi testés, pour avoir la sécurité de pouvoir quantifier le polluant avant et après, même en cas de forte adsorption : 200 mg/l de biochar pour 1000 µg/l de polluant et 2000 mg/l BC pour 1000 µg/l de polluant. Lors de chaque série de réactions, une référence d'adsorption efficace est préparée contenant 20 mg/l de charbon actif en poudre commercial (CA) et 100 µg/l de polluant.

Suite aux résultats obtenus lors de ces premiers tests, lors de la deuxième étape des essais, incluant les biochars activés, l'adsorption est testée sur des solutions pures contenant du benzotriazole et du diclofenac, à des concentrations de 20 et 200 µg/l, en présence de 10 mg/l de biochar. La concentration initiale est obtenue à partir d'un échantillon de la solution mère de polluant diluée à 100 µg/l. Un témoin négatif est constitué de la solution CaCl₂ 0.01M avec 10 mg/l de biochar. Les témoins sont traités de la même manière que les autres échantillons.

Les réactions sont effectuées dans des bouteilles en verre brun, volume 100 ml, à 20 °C ± 2 °C (température ambiante) sous agitation (100 rpm), pendant 48h – temps permettant de manière générale à arriver à l'équilibre d'adsorption pour une majorité de substances, tout en évitant la dégradation du micropolluant [Chen 2008]. Chaque essai est doublé.

Suite à l'adsorption, les échantillons sont filtrés sur 0.4 µm (filtres seringue Chromafil RC, Macherey-Nagel), conservés et transportés dans des bouteilles en verre brun, réfrigérés à 5°C et analysés dans les 3 jours.

La concentration de micropolluants en solution est quantifiée par chromatographie en phase liquide à haute performance suivie par une détection par spectrométrie de masse (HPLC-MS/MS en triple-quadrupole) au laboratoire de chimie analytique de la HES-SO Valais (Institut Technologies du vivant, Sion), à l'aide de la colonne Nucleodur C18 Gravity 150/4.6 3 µm et l'appareil HPLC-MS/MS Varian 320. En cas de concentration inférieure à la limite de quantification de la méthode, une étape de préconcentration est effectuée par microextraction en phase solide (solid phase micro extraction, SPME), à l'aide de la colonne INTERCHIM 302H-200/3 Polyclean 302H 200MG/3ML.

4.3.3 Traitement de données

Le taux d'abattement (T) de la molécule après réaction avec le biochar est calculé comme suit :

$$T [\%] = \frac{C_i - C_w}{C_i} \cdot 100$$

Avec C_i la concentration initiale (témoin positif) [µg/l] et C_w la concentration en solution après réaction [µg/l].

Pour chaque test, y compris les témoins, deux répétitions ont été effectuées. La moyenne des deux résultats est calculée.

4.4 Test d'efficacité en eau usée

4.4.1 Choix de micropolluants dont l'abattement est mesuré

Les composés dont l'abattement est analysé sont les 5 molécules cibles indiquées dans le projet de révision de l'OEaux comme référence pour l'efficacité des techniques d'abattement de micropolluants : benzotriazole, carbamazépine, diclofenac, mecoprop, sulfaméthoxazole [OFEV 2009].

4.4.2 Conditions de traitement

Dans cette étude, le traitement spécifique des micropolluants en STEP fait suite à la décantation secondaire, après le traitement biologique. L'eau usée est prélevée à la station d'épuration de Vidy, à la sortie du décanteur secondaire, suite à un traitement par lit fluidisé avec nitrification totale [Margot 2011]. Un prototype de traitement des micropolluants y est actuellement testé. On y applique un temps de contact charbon/eau de 30 minutes, et une concentration de charbon de 15 mg/l, mais l'objectif à atteindre pour l'exploitation est de 10 mg/l, dans le but de diminuer le colmatage du système d'ultrafiltration. En effet, le charbon est séparé de l'effluent par ultrafiltration (seuil de coupure 30 nm), et c'est cette étape qui limite la quantité de charbon qu'il est possible d'ajouter par rapport aux besoins énergétiques et au colmatage des filtres.

4.4.3 Prélèvement, réaction, filtration et analyse

L'eau usée est prélevée à la sortie du décanteur secondaire dans un récipient en verre de 5 L, homogénéisée par agitation et distribuée dans les bouteilles en verre brun de 200 ml. Tous les récipients utilisés sont préalablement lavés à l'acétone et rincés à l'eau ultrapure. Suite à l'ajout de biochar en poudre en suspension (voir 4.3.2) pour obtenir une concentration de 10 mg/l, le mélange est agité (100 rpm) à température ambiante (20 ± 2 °C), pendant 30 min.

Le mélange est ensuite filtré à l'aide d'une colonne de filtration en verre, sur des filtres en cellulose régénérée, diamètre des pores 0.45 µm (Whatman), et conservée au réfrigérateur jusqu'à l'analyse (entre 2 et 3 jours). Un échantillon non-traité au biochar et filtré est utilisé comme témoin positif (pas d'abattement), et un échantillon contenant de l'eau déminéralisée comme témoin négatif. Un échantillon traité au charbon actif commercial est utilisé comme référence d'adsorption efficace. Chaque échantillon est préparé à double.

5 campagnes de test en eau de STEP ont été menées:

- 1^{ère} campagne : 05 juin 2013
- 2^{ème} campagne : 20 septembre 2013
- 3^{ème} campagne : 14 avril 2014
- 4^{ème} campagne : 20 mai 2014
- 5^{ème} campagne : 24 juin 2014

La liste des biochars utilisés et des tests appliqués est disponible au Tableau 4-1.

Une étude de stabilité des échantillons du moment du prélèvement jusqu'au moment de l'analyse a été entreprise afin de valider le choix des délais appliqués.

La concentration de micropolluants en solution est mesurée à la HES-SO Valais à l'aide de la colonne Zorbax Eclipse Plus C18 et de l'appareil UHPLC Agilent 1290 infinity associé à un détecteur MS QTOF

Agilent G6530A, en recourant systématiquement à une étape de préconcentration par SPME (INTERCHIM 302H-200/3 Polyclean 302H 200MG/3ML).

Lors des quatre campagnes, la teneur en carbone organique dissous a été mesurée par oxydation thermique dans l'eau usée non-traitée et dans chaque échantillon après traitement avec les biochars à l'aide du TOC-5000A de Shimadzu.

4.4.4 Traitement de données

Le taux d'abattement (T) des polluants après traitement est calculé comme suit :

$$T [\%] = \frac{C_i - C_w}{C_i} \cdot 100$$

Avec C_i la moyenne des deux mesures sur l'eau usée filtrée non-traitée [$\mu\text{g/l}$] et C_w la concentration en solution après traitement [$\mu\text{g/l}$].

Si la concentration de polluant après traitement est inférieure à la limite de détection, l'abattement est considéré 100%. Dans le cas où la concentration après traitement mesurée est supérieure à la concentration initiale, alors que le témoin négatif est bien négatif, si cette différence est inférieure à la limite de quantification, l'abattement est considéré comme 0% ; si elle est supérieure, le résultat est considéré comme non-valide.

Le taux d'abattement du carbone organique dissous par les biochars testés est estimé par la différence entre l'eau usée brute et l'eau usée traitée par le biochar. La teneur en COD mesurée après traitement est soustraite de la concentration initiale (eau usée brute), divisée par la concentration initiale et multipliée par 100 pour obtenir le taux d'abattement.

4.5 Isothermes d'adsorption des polluants-cibles

Il s'agit de caractériser au mieux les biochars issus des déchets de bois criblés, qui seront proposés comme alternative à l'utilisation de charbons activés actuellement commercialisés pour l'élimination des micropolluants des eaux usées.

Les isothermes d'adsorption des molécules benzotriazole, carbamazépine, diclofénac, mécoprop, sulfaméthoxazole sont mesurés sur deux lots de biochars non-activé (BC0912 et BH17), un biochar activé par la vapeur obtenu à partir de ce biochar (BH14), et le charbon activé de référence (CA).

4.5.1 Protocole expérimentale

10 mg de biochar par litre sont mis en présence de cinq concentrations différentes de polluant obtenues à partir d'une solution-mère de 10 mg/l : 10, 20, 50, 100, 200, 400 et 1000 $\mu\text{g/l}$ dans une solution CaCl_2 0.01M. Ces concentrations sont proches des concentrations rencontrées en STEP mais permettent également des concentrations finales dans les limites de détection de la méthode analytique ($> 0.1 \mu\text{g/l}$). Pour le charbon activé de référence, uniquement 4 concentrations de polluant sont testées : 50, 100, 400 et 1000 $\mu\text{g/l}$.

Un témoin positif est préparé à partir de la solution-mère de polluant, sans biochar, qui donnera la référence pour la concentration initiale de la substance. Un témoin négatif de manipulation est préparé contenant uniquement la solution CaCl_2 0.01M. Une répétition est faite pour chaque échantillon, sauf pour les témoins négatifs. L'expérience est effectuée dans des bouteilles en verre brun de 100 ml avec un

bouchon à vis avec joint téflon. Les échantillons sont tous vortexés brièvement (5 sec) puis agités (agitateur latéral Gerhardt, 90 RPM) pendant 48h, à température ambiante (20 +/- 2°C), à l'obscurité. Le pH n'est pas contrôlé, mais est mesuré en début et en fin de réaction pour tous les échantillons. Pour éliminer le biochar et arrêter la réaction, les échantillons sont filtrés sur seringue (filtres Chromafil RC, 0,45 µm). La substance restant en solution est quantifiée par la technique décrite sous 4.3.2 (HPLC-MS/MS).

4.5.2 Traitement de données

La concentration initiale est obtenue par la moyenne des deux mesures de concentration de la solution mère de polluant. La concentration en polluant mesurée après traitement indique la concentration en phase liquide C_w , exprimée en [µg/l]. La différence entre la concentration initiale et la concentration mesurée représente la quantité de polluant adsorbée sur les 10 mg de biochar par litre. Cette concentration de polluant (*adsorbat*) par unité de masse de biochar (*adsorbant*) représente la concentration solide C_s , exprimée en [µg/g]. Les points de l'isotherme indiquent les concentrations en phase solide et liquide à l'équilibre. Chaque point est la moyenne entre deux réactions effectuées dans les mêmes conditions.

4.5.3 Modélisation d'isothermes

Deux modèles d'adsorption sont ajustés aux points expérimentaux obtenus (entre 4 et 7 selon les biochars) : les modèles de Freundlich et de Langmuir [Freundlich 1906; Langmuir 1916]. Selon de nombreuses publications, dont [Sun and Meunier 2003; Marsh and Rodriguez-Reinoso 2006; Foo and Hameed 2010]. Ces modèles à deux paramètres permettent de décrire l'adsorption en monocouche (pas d'interactions entre les molécules d'adsorbat) sur des solides micro- à mésoporeux [Sun and Meunier 2003; Marsh and Rodriguez-Reinoso 2006; Foo and Hameed 2010].

Le modèle de Langmuir est construit sur l'hypothèse que l'adsorption se fait en une seule couche, le nombre total de sites est limité (C_sMax), et ils sont tous d'énergie équivalente [Langmuir 1916; Foo and Hameed 2010]. Expression :

$$C_s = C_sMax \cdot K_l \cdot \frac{C_w}{1 + (K_l \cdot C_w)}$$

C_sMax : quantité maximale de polluant pouvant être adsorbée par unité de masse de biochar (peut être interprété comme le nombre total de sites d'adsorption)

K_l : constante de Langmuir, exprime l'énergie d'adsorption ou l'affinité de la molécule pour l'adsorbant [Farrel 1994].

L'expression rationnelle peut être linéarisée sous la forme suivante :

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_sMax} + \frac{1}{(K_l \cdot C_sMax)} \cdot \frac{1}{C_w}$$

Le modèle de Freundlich est construit sur l'hypothèse que le nombre total de sites est en large excès par rapport à la quantité d'adsorbat, et les sites d'adsorption sont énergétiquement hétérogènes. Ce modèle est plus généralement utilisé pour décrire l'adsorption de composés organiques sur un charbon à partir de l'eau [Freundlich 1906; Foo and Hameed 2010]. L'isotherme de type Freundlich peut aussi être expliquée comme une superposition des courbes de Langmuir pour les différents niveaux d'énergie caractérisant les divers sites d'adsorption que possède le charbon [Delle Site 2001]. Expression :

$$C_s = K_f \cdot C_w^{\frac{1}{n}}$$

n : paramètre indiquant l'intensité de l'adsorption

K_f : constante de Freundlich, exprime la capacité d'adsorption des sites pour une répartition énergétique donnée.

L'expression exponentielle peut être linéarisée sous la forme suivante :

$$\text{Log}(Cs) = \text{Log}(K_f) + \frac{1}{n} \cdot \text{Log}(Cw)$$

4.5.4 Ajustement des paramètres des modèles aux données

L'ajustement des paramètres du modèle aux données expérimentales a été effectué par régression linéaire sur les expressions linéarisées des modèles et par optimisation non-linéaire à l'aide de l'outil Solveur d'Excel.

La régression linéaire présente l'avantage d'une meilleure visualisation graphique pour une comparaison plus aisée des caractéristiques d'adsorption des différents couples biochar-substance, mais l'optimisation non-linéaire donne une meilleure estimation des paramètres de l'isotherme, car elle ne transforme pas le lot de données et ne crée pas de distorsion dans la distribution de l'erreur [Boulinguez, Le Cloirec et al. 2008].

4.6 Corrélations entre caractéristiques physico-chimiques des biochars et taux d'abattement

Les capacités d'adsorption de différents polluants sont conditionnées par de nombreux paramètres de la surface des biochars, comme ceux des composés cibles. Les tests d'adsorption dans des conditions réelles d'utilisation (eau usée) donnent la meilleure évaluation de cette capacité : toutefois ces tests sont relativement coûteux et complexes à mettre en œuvre. Une analyse des corrélations entre les caractéristiques physico-chimiques et le taux d'abattement en eau usée permet d'indiquer quels paramètres, parmi ceux mesurés, conditionnent le plus l'adsorption des molécules testées. Les corrélations entre les paramètres des modèles d'isothermes d'adsorption et le taux d'abattement en eau usée ont aussi été testées.

Ce lien entre paramètres et taux d'abattement est exprimé par le coefficient de corrélation de Pearson et par le coefficient de régression linéaire [Baudu 2001; Chen 2008; Qiu, Sun et al. 2014]. Les résultats graphiques d'analyses en composantes principales ont été utilisés pour représenter les relations entre les paramètres et les abattements.

5 Résultats et interprétation

5.1 Caractérisation des biochars étudiés et utilisés dans les tests de traitement des eaux usées

Tableau 5-1 : Paramètres physico-chimiques analysés (moyennes sur 3 mesures) sur les biochars sélectionnés pour les tests d'abattement de micropolluants en eau usée

Code	Type	C %	H %	N %	O %	Cendres (%)	Teneur en eau %	BET_N ₂ (m ² /g)	Densité (g/cm ³)	CEC (cmolc *kg ⁻¹)	Rapports atomiques calculés		
											H/C	O/C	O+N/C
BH0	Biochar à base de bois de hêtre, non-activé	84.4	0.96	0.45	0.5	4.1	9.6	320.2	1.8	15	0.1362	0.0040	0.0086
BH1	Biochar à base de bois de hêtre, activé à la vapeur	50.4	0.23	0.15	1.6	39.9	7.8	1156.8	2.6	74.9	0.0548	0.0233	0.0260
BH12	Biochar à base de déchets de bois criblés, traité aux ferments lactiques	74.8	1.6	0.37	3.7	14.9	4.5	98.7	1.6	4.7	0.2559	0.0374	0.0415
BH13	Biochar à base de déchets de bois criblés, activé à la vapeur	51.4	0.08	0.25	0.1	46.7	1.5	992.5	2.7	50.5	0.0184	0.0014	0.0055
BH14	Biochar à base de déchets de bois criblés, activé à la vapeur	56.4	0.05	0.16	0.2	40.1	2.9	977.2	2.6	50.5	0.0103	0.0026	0.0051
BH17	Biochar à base de déchets de bois criblés, non-activé	81	1.28	0.44	1.3	8.2	7.7	299	1.7	13.4	0.1886	0.0120	0.0166
BC0912	Biochar à base de déchets de bois criblés, non-activé	76.1	1.19	0.5	2.7	15.7	3.7	206.4	1.7	22.8	0.1868	0.0266	0.0321
CA	Charbon activé de référence	86.7	0.23	0.49	0.8	7.6	4	1100	3	92.5	0.0319	0.0075	0.0123

Ces résultats montrent qu'avec l'activation à la vapeur, la teneur en carbone organique baisse et le taux de cendres augmente, ce qui est dû à la température d'activation élevée (*burn-off* élevé). Le rapport H/C baisse, ce qui indique une augmentation du taux de carbonisation et des structures aromatiques alors que le rapport oxygène/carbone, lié à la présence de groupes fonctionnels de type acide et à la polarité de surface [Chen 2008; Ahmad, Lee et al. 2013], baisse pour les biochars à base de déchets de bois criblés, et augmente pour le biochar à base de hêtre. Le biochar traité aux lactoferments présente en revanche une augmentation du taux d'hydrogène et d'oxygène par rapport à la composition initiale. Les biochars produits dans les mêmes conditions à partir d'une source de biomasse identique, les biochars BC0912 et BH17, ainsi que les biochars activés à la vapeur BH13 et BH14, montrent des caractéristiques proches.

La surface spécifique augmente d'environ un facteur 3 suite à l'activation à la vapeur et s'approche de celle caractérisant le charbon actif de référence. Le traitement aux lactoferments provoque une diminution de la SSA. La capacité d'échange cationique augmente d'un facteur 2 à 5, mais reste toutefois, pour les biochars à base de déchets de bois activés à la vapeur, deux fois moins élevée que celle du charbon actif de référence.

5.2 Résultats des tests en solution pure

5.2.1 Biochars non-activés à base de trois biomasses différentes

Il s'agit ici des premiers résultats permettant d'évaluer la capacité d'adsorption des trois biochars bruts (BC34, BC21 et BC0912) pour trois micropolluants: le diuron (pesticide), le benzotriazole (anticorrosif), et l'azithromycine (antibiotique), présentant des différences de polarité, de taille et de groupes fonctionnels, en solution pure, et de la comparer au charbon activé commercial (CA).

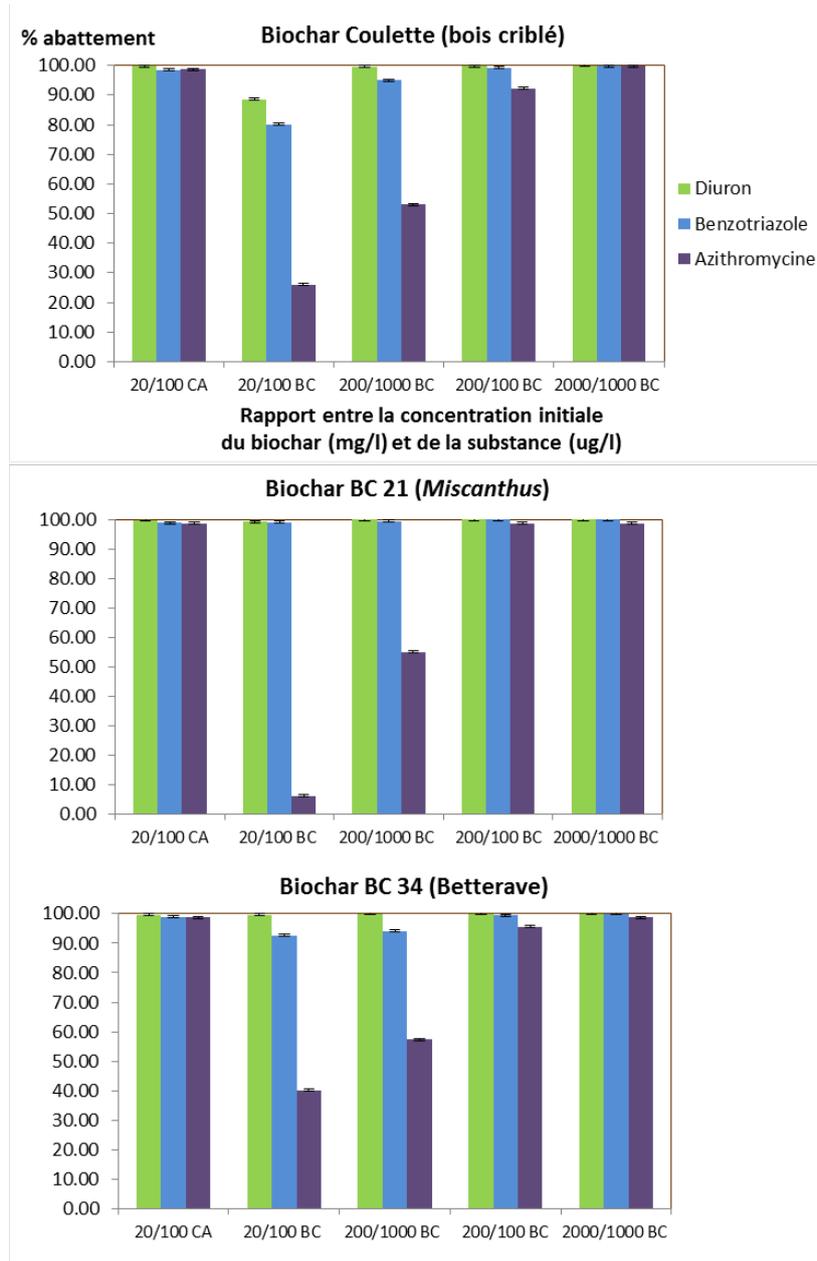


Figure 5-1 : Comparaison de l'abattement de chaque composé par les 3 biochars (BC) et le charbon activé (CA) à différents rapports de concentrations biochar/polluant (mg/l vs µ/l). Pour chaque expérience, la moyenne de deux essais est présentée. La moyenne des écarts d'abattement (%) entre les deux répétitions pour la totalité des analyses est 0.73 (%), avec un écart type de 1.57 (%).

Le rapport de concentrations se rapprochant le plus des conditions d'utilisation réelles est 20 mg biochar pour une concentration de 100 µg de polluant par litre d'eau, et c'est le taux d'abattement dans ces conditions-là qui est le plus intéressant. **Ces résultats montrent à la fois une adsorption, et la possibilité de quantifier les polluants en solution.**

Lors de ces tests avec les polluants en solution pure, le biochar à base de Miscanthus présente la meilleure capacité d'adsorption pour le diuron et le benzotriazole, comparable au charbon activé de référence. L'azithromycine est faiblement adsorbée par les biochars en comparaison au charbon activé. Toutefois, **les taux d'abattement observés pour les trois biochars sont proches.**

Le Miscanthus est cultivé spécifiquement pour fournir le biochar, et les déchets de betterave peuvent être mieux valorisés en tant que fourrage ou engrais de haute qualité. L'ensemble de ces observations mènent à choisir **le biochar à base de déchets de bois criblé** pour la suite de l'étude. **Il s'agira donc de tester l'efficacité du biochar à base de déchets de bois sur l'abattement de micropolluants en conditions d'application, en eau usée.**

5.2.2 Biochars activés : comparaison d'efficacité en solution pure

Ces résultats permettent de comparer les capacités d'adsorption de biochars issus de différentes filières d'activations produits au sein de SwissBiochar et de confirmer l'efficacité du biochar issu de déchets de bois criblés activé à la vapeur.

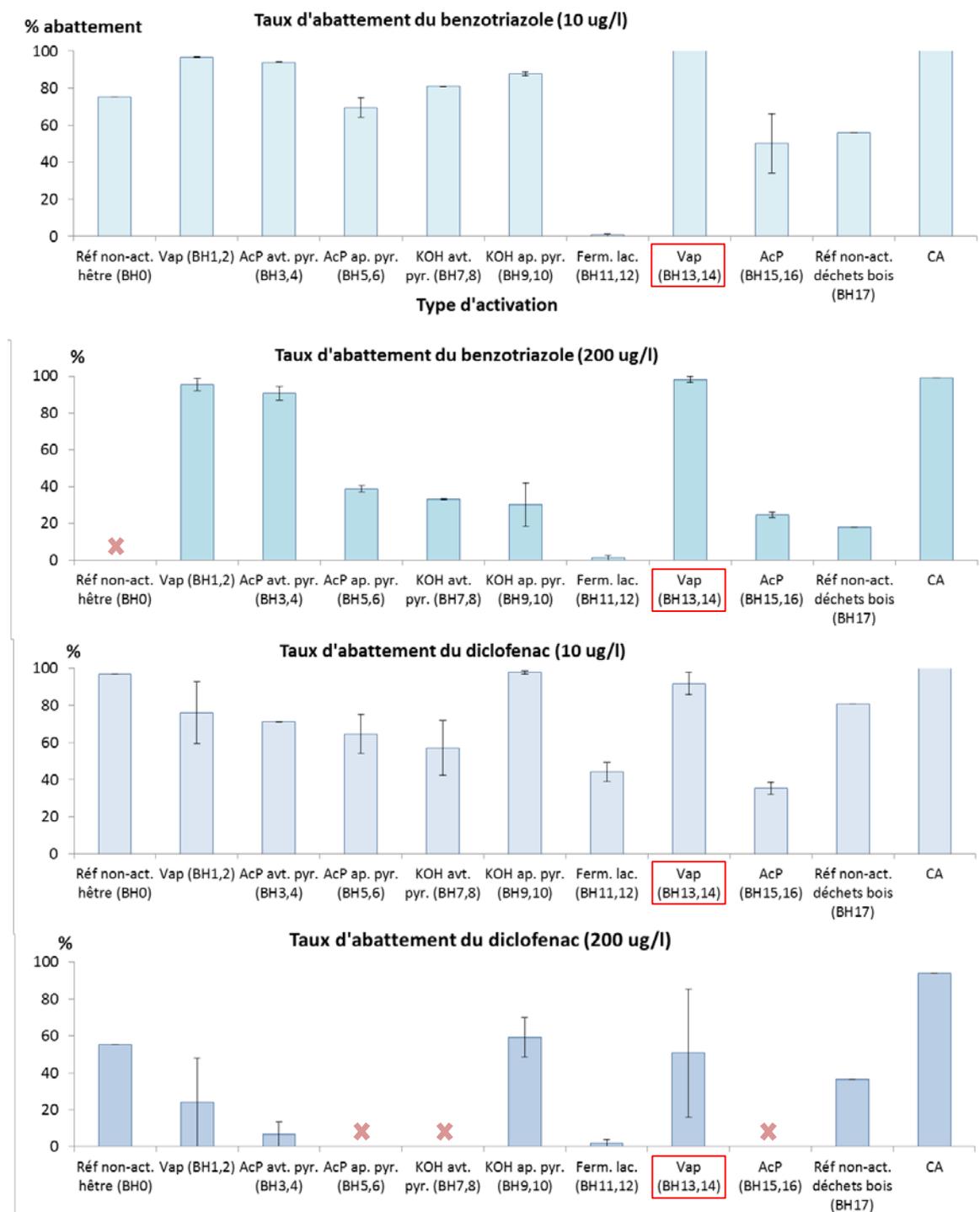


Figure 5-2 : Taux d'abattement de polluants en solution pure pour deux substances cibles: moyenne et écart entre 2 mesures. Encadré en rouge : biochar à base de déchets de bois activé à la vapeur ; croix : l'abattement n'a pu être quantifié. Types de traitement : voir tableau 4.1.

Les essais ont été doublés pour tous les biochars activés (BH1 à BH16) mais pas pour les biochars non-activés BH0 et BH17 ni le charbon activé de référence CA. Chacun des deux répliques représente un batch de production différente par la même technique d'activation.

Les résultats d'abattement du diclofenac à 200 µg/l présentent des écarts d'abattement importants entre les deux répliques. Pour les biochars BH 5, 6, 7, 8, 15, et 16, l'abattement est considéré comme nul. On remarque les résultats suivants :

- De façon générale, on peut observer que les biochars démontrent un taux d'adsorption plus élevé pour des concentrations faibles, ce qui peut s'expliquer par un phénomène de saturation graduelle des sites d'adsorption.
- Le benzotriazole, apolaire, est mieux adsorbé que le diclofenac, partiellement chargé négativement au pH de l'expérience.
- Les résultats de la comparaison entre les différents traitements permettent de confirmer que le biochar à base de déchets de bois activé à la vapeur (BH13, BH14) présente de bonnes capacités d'adsorption pour les quatre tests: c'est en même temps la filière de production la plus intéressante.
- Il y a relativement peu de différences entre ces biochars et les biochars à base de bois de hêtre également activés à la vapeur.
- Les biochars activés à l'acide phosphorique (en particulier avant pyrolyse) et à l'hydroxyde de potassium (après pyrolyse) démontrent également des taux d'adsorption élevés : toutefois, leur production est plus onéreuse, fait appel à des substances dont la manipulation est délicate et peut avoir un impact sur la santé et l'environnement.
- Par contre, le traitement aux lactoferments ne semble pas améliorer les capacités d'adsorption.

Suite à ces résultats, les biochars à base de déchets de bois criblés activés à la vapeur seront conservés pour la suite des essais et testés en eaux usées.

5.3 Première campagne de test d'abattement en eau usée – résultats

5.3.1 Abattement des micropolluants par le biochar à base de déchets de bois criblés

Lors de la première campagne d'essais d'abattement de micropolluants sur l'eau prélevée en station d'épuration, à la sortie du décanteur secondaire, le biochar BC0912 et le charbon actif de référence (CA) ont été testés, dans des échantillons d'eau usée non-modifiée, et dans des échantillons ayant subi des ajouts dosés de substances cibles.

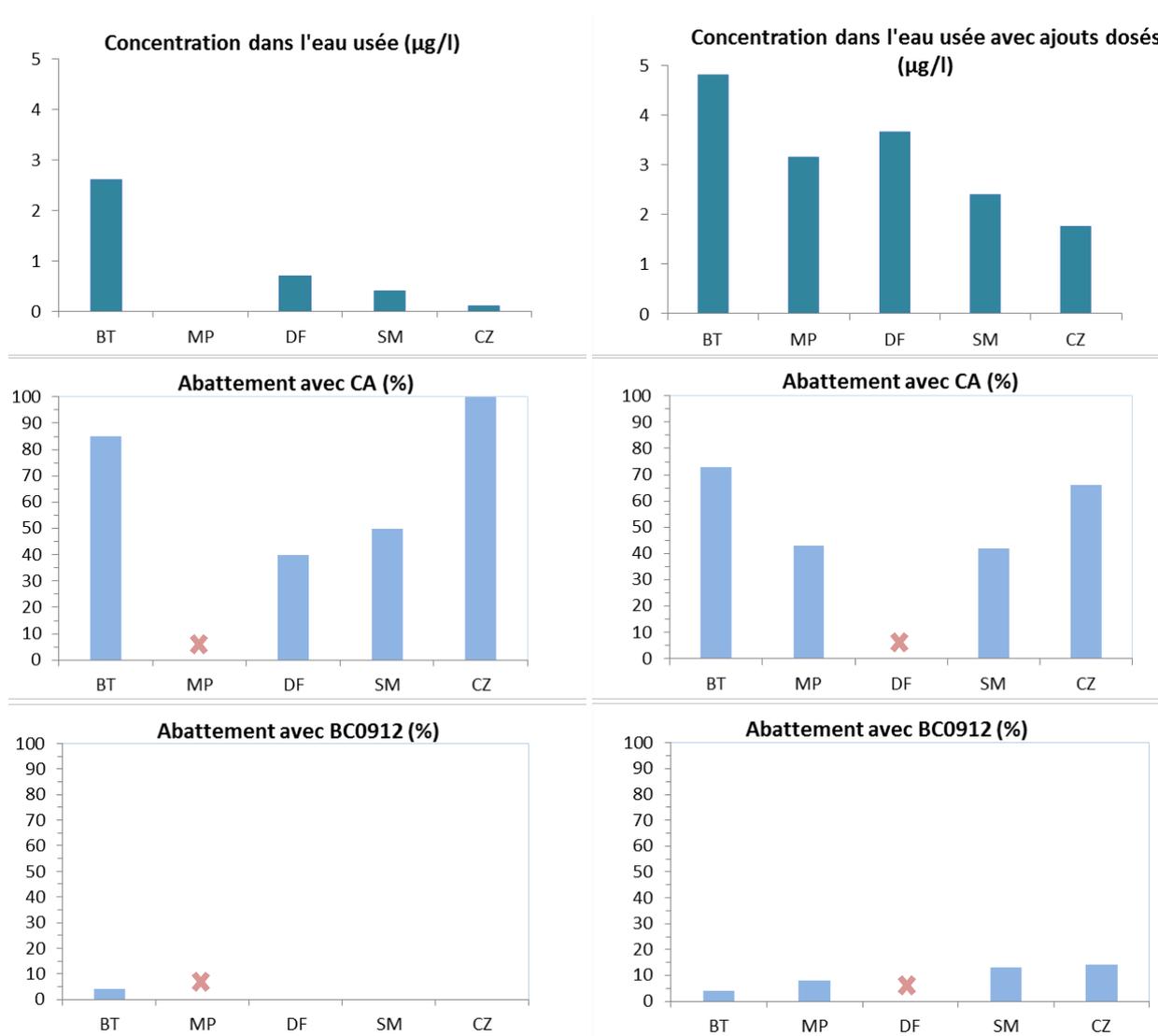


Figure 5-3 : Résultats de la première campagne en STEP (05.06.2013) : comparaison entre le biochar BC0912 non activé et le charbon actif de référence. Colonne de gauche : eau usée non-modifiée; colonne de droite : eau usée avec ajouts dosés de $2 \mu\text{g/l}$ de chaque substance (BT – benzotriazole ; CZ – Carbamazépine ; DF - Diclofenac ; MP – Mecoprop ; SM – Sulfaméthoxazole). Croix : l'abattement n'a pas pu être déterminé.

Le Mecoprop n'était pas détectable dans l'eau usée sans ajouts dosés lors de cette campagne de prélèvements.

Dans le cas des échantillons sans ajout traités avec le biochar BC0912, un faible abattement a été mis en évidence pour le benzotriazole, alors qu'aucune différence n'a été détectée entre les concentrations avant et après la réaction avec le biochar pour les autres substances. Pour les échantillons avec ajout, des taux d'abattements faibles (entre 5 et 15 %) ont pu être mis en évidence pour toutes les substances sauf le diclofenac, à cause de difficultés analytiques (concentration après réaction supérieure à la concentration initiale : cette mesure n'est pas considérée comme valide). Le biochar activé présente des taux d'abattements entre 40 et 100% pour tous les composés dans les deux types d'échantillons (l'abattement du diclofenac dans les échantillons avec ajout n'ayant pas pu être quantifié pour cause de mesures non-valides).

Suite à cette première campagne de tests, il a pu être montré que le biochar BC0912 ne présente pas une efficacité satisfaisante dans l'adsorption des micropolluants cibles dans l'eau usée. Pour la suite des essais, le choix a été fait d'effectuer un test d'adsorption avec des biochars ayant subi une étape d'activation.

Lors des campagnes suivantes, uniquement les résultats obtenus sur les échantillons sans ajouts-dosés sont pris en compte pour les calculs d'abattement, étant donné qu'ils représentent au mieux les conditions réelles d'exploitation attendues dans les eaux usées [Nowotny 2007; Boehler 2012].

5.3.2 Stabilité des échantillons lors de la conservation

La stabilité des micropolluants lors de la conservation des échantillons après traitement et filtration est évaluée après dix jours de stockage. Aucune diminution significative de la concentration des polluants dans l'eau filtrée réfrigérée n'a été détectée. Des échantillons conservés au réfrigérateur (5 °C) durant plus de 40 jours ont démontré conserver plus de 95% de leur concentration initiale en micropolluants.

5.4 Campagnes de test en eau usée comparant biochars non-activés, activés à la vapeur et charbon activé commercial

5.4.1 Résultats par campagnes

Quatre campagnes d'essais supplémentaires ont été réalisées en utilisant les biochars non-activés, les biochars activés à la vapeur et le charbon activé commercial, dans le but de comparer leurs performances.

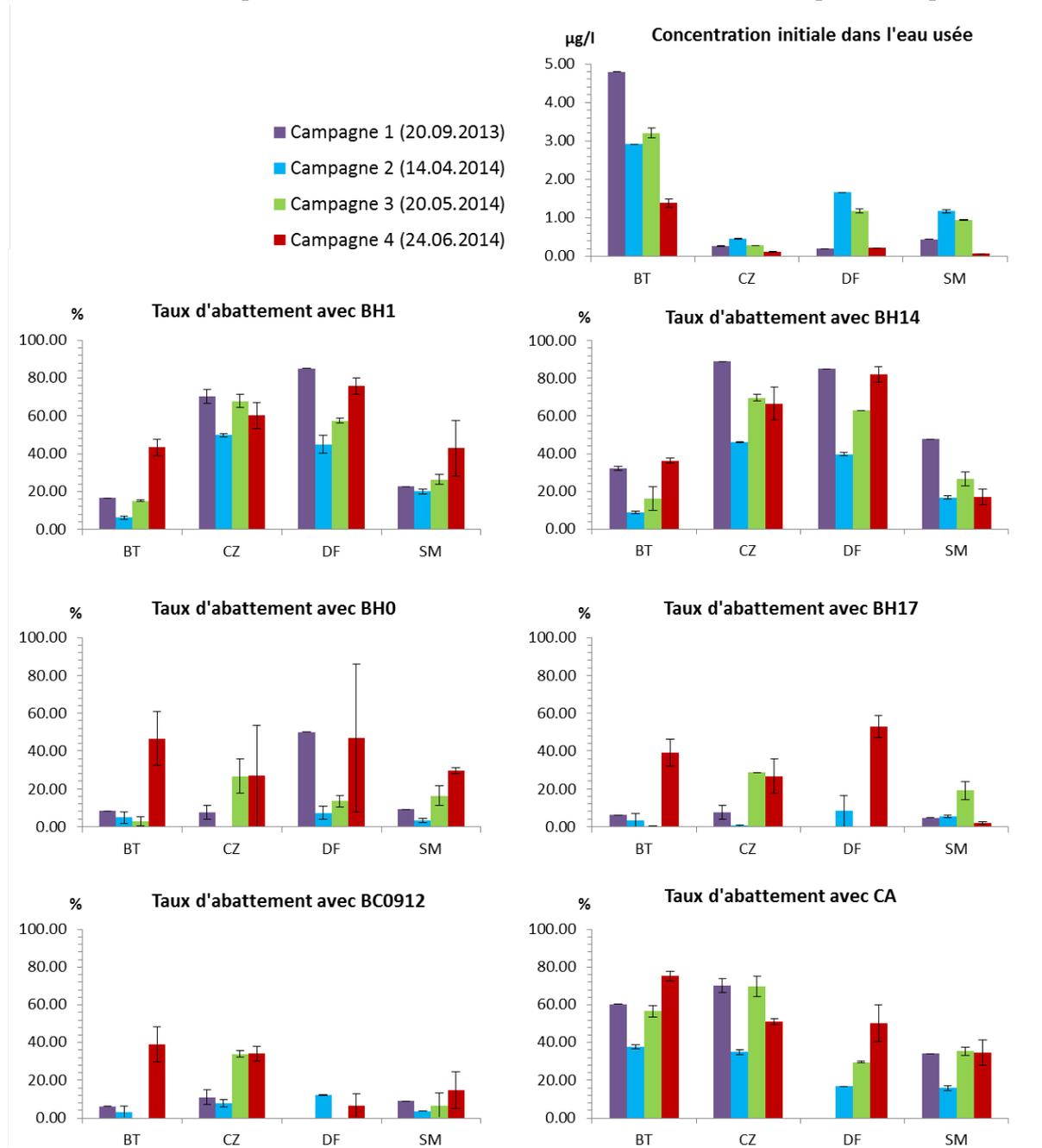


Figure 5-4 : Les abattements de micropolluants mesurés lors des quatre campagnes successives. Deux mesures pour chaque test (sauf pour BH0, BH17, BC0912 et CA lors de la première campagne, avec un seul essai) : la moyenne et l'écart entre les deux essais sont présentés.

Il existe des différences importantes de taux d'abattement entre les différents biochars : globalement, les deux biochars activés à la vapeur et le charbon activé montrent des taux d'abattement plus élevés, avec moins d'écart entre les répétitions et entre les campagnes que les biochars non-activés.

Des différences entre les quatre composés testés sont aussi observables, d'une manière plus claire pour les biochars activés : les biochars activés (BH1 et BH14) abattent mieux la carbamazépine et le diclofenac que le biochar activé commercial, qui lui abat mieux le benzotriazole.

Il existe aussi une variation importante du taux d'abattement selon les campagnes.

5.4.2 Comparaison par biochar et par composé

En groupant les résultats de toutes les campagnes il est possible de faire une comparaison générale de l'abattement des quatre composés par les différents biochars.

Tableau 5-2 : Résultats de toutes les campagnes groupés par biochar et par composé, et le taux d'abattement de toutes les substances considérées ensemble (TOT) : moyenne et écart-type. Nombre d'essais pour chaque couple biochar-substance (pour BH1 et BH14, n=8 ; pour BH0, BH17, BC0912 et CA, n=7).

	BH1		BH14		CA		BH0		BH17		BC0912	
	Mean	Stdv	Mean	Stdv								
BT	20.34	15.03	23.36	12.57	57.02	15.61	16.65	22.18	13.86	17.97	12.92	18.74
CZ	62.05	9.73	67.81	16.90	54.54	16.14	16.40	21.07	16.49	14.93	23.29	13.67
DF	65.75	17.04	67.34	19.49	27.64	19.28	26.49	30.39	21.37	22.89	5.33	6.65
SM	28.04	12.46	27.01	13.77	29.52	10.16	15.38	11.53	7.46	6.99	7.80	8.34
Tot	44.05	24.28	46.38	26.35	42.18	20.27	18.73	21.54	14.79	16.57	12.34	13.93

Une représentation par diagrammes en boîte groupant tous les essais et toutes les campagnes par biochar et par molécule permet de mieux visualiser les tendances importantes.

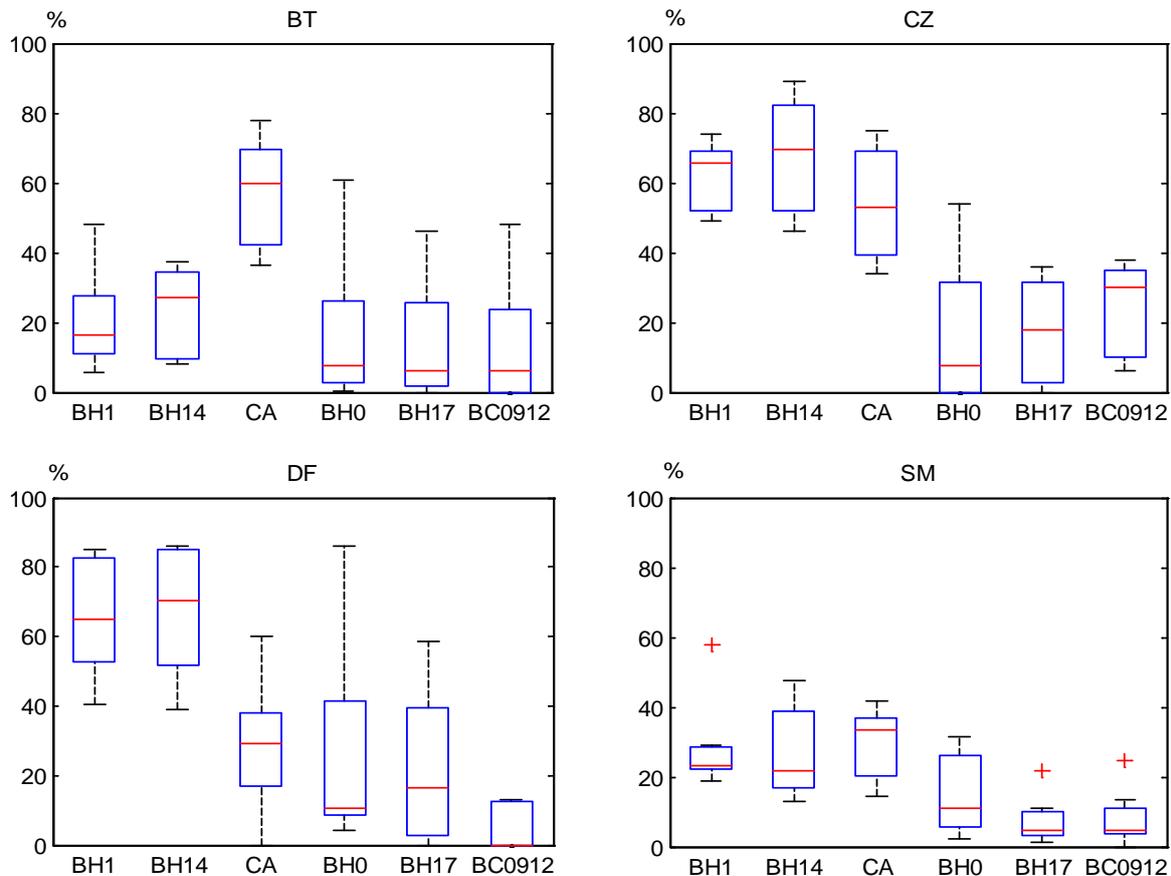


Figure 5-5 : Comparaison des abattements en eau usée des 4 micropolluants par les différents biochars. Distribution sous forme de boîtes à moustache (ligne rouge : médiane) des résultats groupant les essais des quatre campagnes par couple biochar-polluant : BT-benzotriazole, CZ-carbamazépine, DF-diclofenac, SM-sulfaméthoxazole (le Mecoprop n'a été détecté dans l'eau usée dans aucune des campagnes).

Dans tous les cas, les biochars activés et le charbon actif du commerce ont une meilleure performance que les biochars non activés.

Avec la molécule benzotriazole, le charbon activé du commerce montre un meilleur abattement.

Avec les molécules carbamazépine et sulfaméthoxazole, les biochars activés et le charbon actif du commerce montrent des performances équivalentes. Elles se situent entre 60 et 70 % d'abattement et 20 et 30% respectivement.

Dans le cas du diclofenac, les biochars activés montrent une meilleure performance d'abattement que le charbon actif du commerce, proche de 70 %.

Pour tester la significativité de ces différences, un test de médiane (Kruskal-Wallis) est conduit sur plusieurs regroupements des mesures : l'effet des biochars utilisés sur l'abattement des polluants est testé pour chacun des quatre composés. Le test est conduit sur les moyennes des deux mesures effectuées lors des quatre campagnes (n=4).

Tableau 5-3 : Comparaisons de performances des biochars par test de médiane sur différents regroupements (test de Kruskal-Wallis) : l'hypothèse zéro représente ici la supposition que tous les échantillons font partie d'une même distribution statistique (médiane identique), donc qu'il n'y a pas de différences significatives entre les traitements.

Test de Kruskal-Wallis:		$p < 0.05$: différences significatives	$p > 0.05$: pas de différences significatives		
Comparaison du taux d'adsorption par substance					
Echantillons comparés		'BT'	'CZ'	'DF'	'SM'
1) Tous les biochars	p	0.0739	0.0031	0.0142	0.0140
2) Tous les biochars sauf CA	p	0.4908	0.0060	0.0134	0.0195
3) Biochars activés (BH1, BH14 et CA)	p	0.0388	0.8864	0.0583	0.9260
4) Biochars non-activés (BH0, BH17 et BC0912)	p	0.7888	0.3871	0.01419	0.5355
5) BH14 / BH1	p	0.7728	0.7728	0.8845	0.7728
6) BH14 / CA	p	0.0209	0.6631	0.0433	0.7728

Selon le test de Kruskal-Wallis avec un seuil de signification de 0.05, les différents regroupements permettent de tirer les conclusions suivantes :

- 1) Il existe des différences significatives entre les capacités d'abattement des six biochars testés, et ceci pour tous les composés sauf le benzotriazole (pour lequel p reste toutefois inférieur à 0.1).
- 2) Il existe des différences significatives de capacité d'abattement entre les biochars non-activés et les biochars activés à la vapeur pour tous les composés sauf le benzotriazole.
- 3) Entre les trois biochars activés, BH1, BH14 et CA, il existe des différences significatives entre les capacités d'abattement du benzotriazole et du diclofenac, mais pas entre les capacités d'abattement de la carbamazépine et du sulfaméthoxazole.
- 4) Les trois biochars non-activés sont équivalents en ce qui concerne leur capacité d'abattement des quatre composés.
- 5) Les deux biochars activés à la vapeur sont équivalents en ce qui concerne leur capacité d'abattement des quatre composés.
- 6) Le biochar à base de déchets de bois activé à la vapeur (BH14) est équivalent en termes d'abattement au biochar activé commercial pour la carbamazépine et le sulfaméthoxazole, mais en diffère pour le benzotriazole (moins bon que le CA), et le diclofenac (meilleur que le CA).

Ces résultats permettent de conclure que, dans les conditions testées, les biochars activés à la vapeur montrent une capacité d'adsorption nettement meilleure que celle des biochars non-activés. Le taux d'abattement est satisfaisant (atteint 80% lors de certains essais) pour le diclofenac et la carbamazépine, mais en dessous pour le benzotriazole et le sulfaméthoxazole. Le biochar à base de déchets de bois (BH14) montre un abattement proche, voir meilleur que le charbon actif de référence.

5.4.3 Mesures du COD lors des campagnes d'essai

Le carbone organique dissous, en tant que paramètre variable entre les campagnes et influençant l'adsorption de manière importante [Ebie 2001], a été quantifié lors de chaque campagne et l'abattement du COD par les différents biochars a été mesuré. Les analyses du COD de la première campagne n'étant pas exploitables (traces d'acétone dans le récipient d'échantillonnage), uniquement les trois dernières campagnes sont considérées.

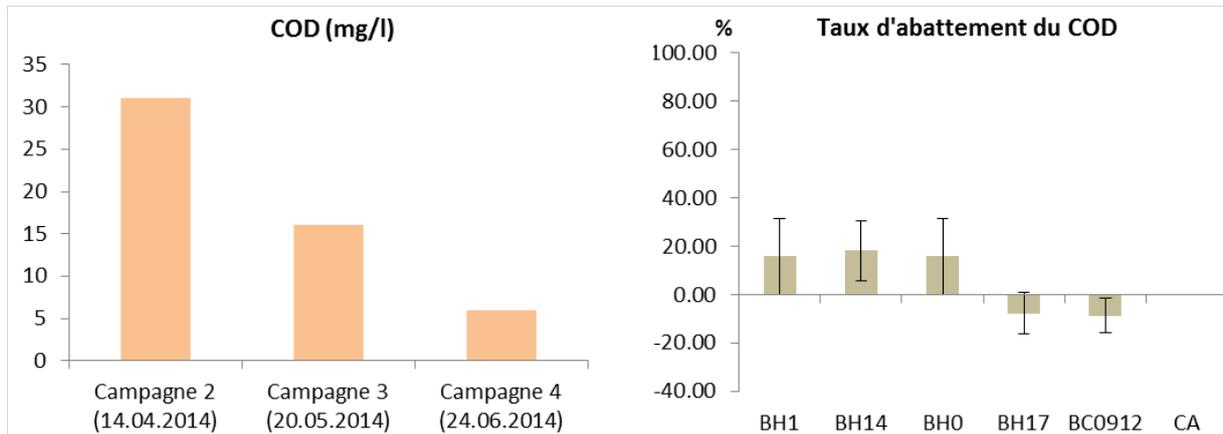


Figure 5-6 : Teneur en carbone organique dissous mesuré lors des trois dernières campagnes dans l'eau usée filtrée et taux d'abattement du COD par les biochars testés (moyenne).

La Figure 5-6 montre un faible abattement du COD par les pour les biochars BH0, BH1 et BH14, mais aucun abattement pour le charbon activé de référence. Les biochars non-activés présentent un faible « abattement négatif » pour une partie des mesures, ce qui peut être expliqué par les limites de la précision de mesure de la méthode (± 2 mg/l), la mise en solution d'une partie de carbone organique non-dissous, voire par un relargage de composés organiques ou très petites particules (non-éliminées par la filtration à $0.45 \mu\text{m}$) par les biochars.

Il existe des différences importantes de concentration du COD dans l'eau lors des trois campagnes, explicables en particulier par la quantité de précipitations tombée 48 h précédant le prélèvement. La variation de la concentration de COD, par son effet de compétition pour les sites d'adsorption [Nowotny 2007; Dickenson 2010], conjointement à la variation de la concentration initiale des micropolluants, sont en grande partie responsables de la variation des taux d'abattement des micropolluants entre les campagnes.

5.5 Isothermes d'adsorption des polluants-cibles

5.5.1 Conditions expérimentales

Le pH est un paramètre qui peut avoir une influence importante sur l'adsorption : étant donné qu'il n'a pas été régulé, il a été mesuré dans le mélange réactionnel avant et après la réaction. Le type de substance et sa concentration n'ont eu que peu d'influence sur le pH. Ce sont les biochars qui avaient la plus grande influence sur ce dernier, les biochars activés s'avérant de nature plus basique. Vu le faible effet des concentrations et des substances, les pH du mélange réactionnel au début et à la fin de la réaction sont présentés par la moyenne tous composés et toutes concentrations testées.

Tableau 5-4 : pH des mélanges réactionnels lors des essais d'adsorption

	<i>pH eau ultrapure + CaCl₂ 0.01 M</i>	<i>pH initial biochar seul en solution (10 mg/l)</i>	<i>pH mélange réactionnel initial</i>	<i>pH final biochar seul en solution (10 mg/l)</i>	<i>pH mélange réactionnel final</i>
BH17	5.8	6.08	6.13±0.06	6.44	6.39±0.14
BHC0912	5.8	6.12	6.15±0.05	6.55	6.41±0.1
BH14	5.8	6.62	6.45±0.12	7.25	7.7±0.29
CA	5.8	6.61	6.5±0.28	7.27	7.46±0.44

5.5.2 Résultats graphiques

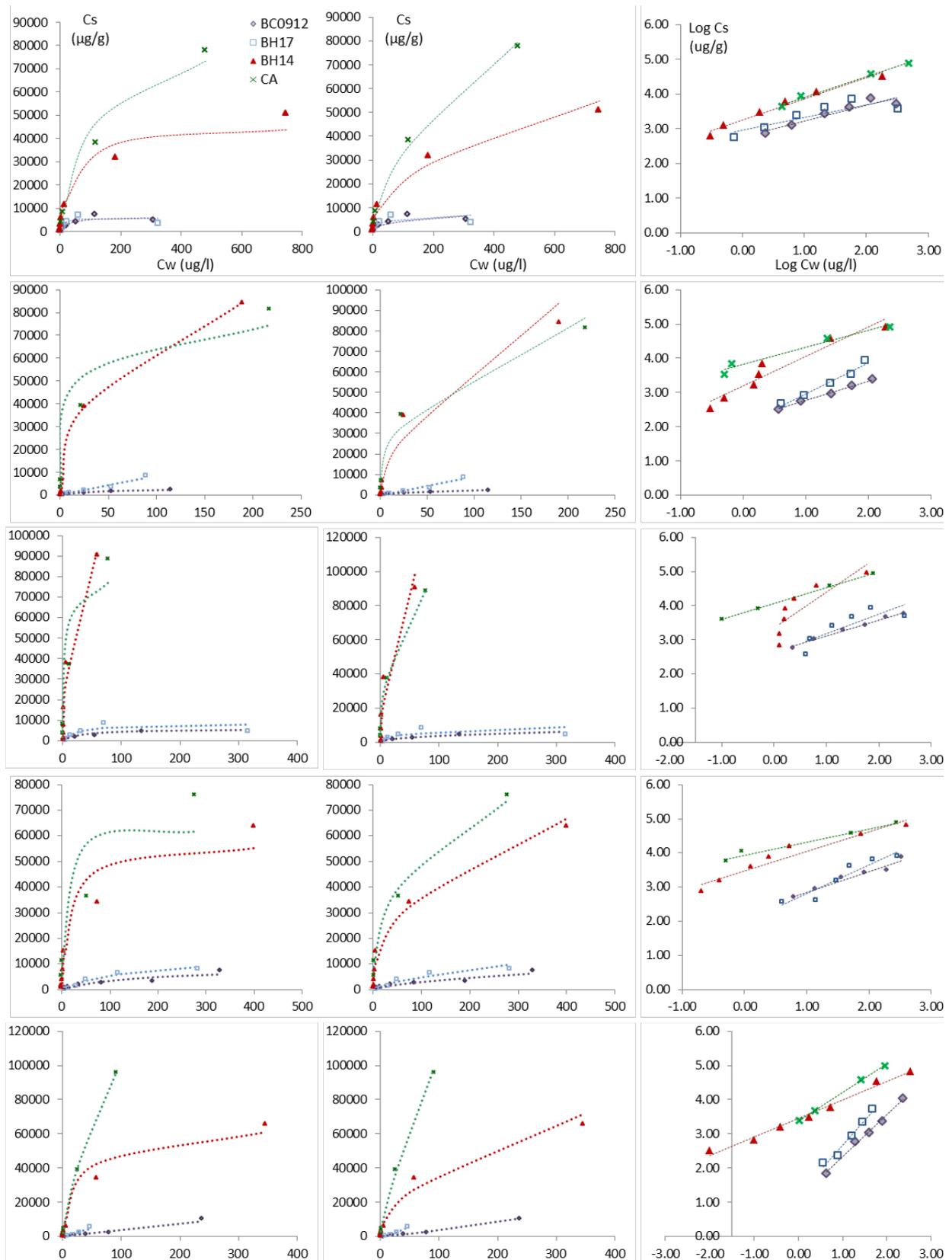


Figure 5-7 : Représentation des isothermes d'adsorption pour les 4 biochars et les 5 molécules-cibles selon deux modèles non-linéaires et le modèle de Freundlich linéarisé

5.5.3 Résultats numériques

Tableau 5-5 : Paramètres des modèles, par couple biochar-substance. Unités C_w [$\mu\text{g/l}$] ; unités C_s [$\mu\text{g/g}$]. L'adéquation aux valeurs mesurées est exprimée par l'erreur standard relative (rSEE). En gris : valeurs incohérentes

		Points	Freundlich			Langmuir			Ads. moy. EU
			K_f	$1/n$	rSEE	$C_s\text{Max}$ (ug/g)	K_L	rSSE	%
Benzotriazole	BC0912	6	749.33	0.38	0.319	6416.84	0.040	0.208	12.92±18.74
	BH17	6	1555.25	0.26	0.439	5945.60	0.117	0.232	13.86±17.97
	BH14	7	2358.59	0.48	0.269	46230.50	0.024	0.622	23.36±12.57
	CA	4	2374.02	0.57	0.115	89997.51	0.009	0.206	57.02±15.61
Carbamazepine	BC0912	5	150.35	0.58	0.045	3060.36	0.023	0.178	23.29±13.67
	BH17	5	71.88	1.04	0.245	48931659.55	0.000	0.191	16.49±14.93
	BH14	7	3957.08	0.60	0.538	103397.71	0.024	0.384	67.81±16.90
	CA	4	8763.36	0.42	0.261	78479.37	0.088	0.337	54.54±16.14
Diclofenac	BC0912	6	477.43	0.45	0.087	5746.84	0.031	0.276	5.33±6.65
	BH17	6	1216.83	0.35	0.504	8325.71	0.039	0.359	21.37±22.89
	BH14	7	7223.75	0.64	0.575	127446.98	0.046	0.519	67.34±19.49
	CA	4	11712.63	0.47	0.026	81752.00	0.212	0.725	27.64±19.28
Mecoprop	BC0912	6	164.14	0.63	0.170	8734.38	0.007	0.256	Non mesuré
	BH17	6	219.73	0.67	0.373	13669.46	0.007	0.307	
	BH14	7	5001.30	0.43	0.396	57706.76	0.057	0.142	
	CA	4	9055.03	0.37	0.174	62852.68	0.196	0.232	
Sulfamethoxazole	BC0912	5	11.46	1.25	0.135	82436089.74	0.000	0.318	7.80±8.34
	BH17	5	8.96	1.66	0.394	75403764.97	0.000	0.465	7.46±6.99
	BH14	7	3080.56	0.54	0.225	66823.81	0.030	5.804	27.01±13.77
	CA	4	2726.94	0.79	0.094	208625.41	0.009	0.118	29.52±10.16

5.5.4 Interprétation des résultats

D'une manière globale, les isothermes indiquent une amélioration de la capacité d'adsorption du BH14 par rapport aux biochars non-activés (augmentation des valeurs K_f et $C_s\text{Max}$) et le rapprochement de ses caractéristiques du charbon activé de référence.

Les paramètres du modèle de Freundlich permettent d'observer l'augmentation globale de l'efficacité de l'adsorption pour les composés testés avec l'activation: le K_f (intercepte de la droite de linéarisation) augmente pour les charbons activés. L'activation à la vapeur de l'équivalent du BC0912, qui produit BH14, permet d'augmenter le K_f d'un facteur 3 pour le benzotriazole, et jusqu'à un facteur 200 pour le sulfamethoxazole. Le K_f du charbon activé de référence est plus élevé, sauf pour le benzotriazole et le sulfamethoxazole.

Le paramètre $1/n$ (inverse de la pente de la droite de linéarisation) évolue de façon variable suivant le composé : il est difficile d'en tirer une conclusion globale. Ce paramètre est une indication de la diversité énergétique des sites de sorption. D'une manière générale, un $1/n$ petit indique une grande hétérogénéité des sites : ceux facilement accessibles et à grande affinité sont rapidement saturés déjà à des

concentrations faibles, et les sites restants sont de moins en moins accessibles : il en résulte une courbe fortement concave. Un $1/n$ élevé (proche de 1), indique une homogénéité énergétique des sites mais aussi une absence d'interactions entre eux (qui devient théoriquement totale pour $1/n = 1$, avec une évolution linéaire de l'isotherme) : l'isotherme s'approche de ce cas de figure pour des concentrations très faibles de molécules adsorbées : en effet, l'adéquation d'une courbe à un modèle peut changer en fonction des domaines de concentration du composé et du biochar. Si $1/n > 1$, alors la courbe change de concavité, ce qui indique que la part adsorbée augmente avec la concentration initiale, caractérisant une adsorption sur des solides macroporeux en multicouches (adsorption coopérative), une nature monofonctionnelle de l'adsorption, ainsi qu'une forte affinité de l'adsorbat avec le solvant [Delle Site 2001].

Les biochars non activés montrent pour le sulfaméthoxazole et la carbamazépine des valeurs de $1/n$ dépassant 1 : ceci peut être lié à une faible affinité pour le composé, mais aussi à une part élevée de macroporosité, ce qui devrait être vérifiée par une caractérisation de la porosité. Par contre, le biochar activé BH14, comme le charbon activé de référence, ont un $1/n$ inférieur à 1 pour tous les composés.

Dans le cas du modèle de Langmuir, la capacité maximale d'adsorption $CsMax$, estimation de la quantité de sites d'adsorption disponibles et indication de la quantité maximale de substance pouvant être adsorbée par gramme de biochar, devrait augmenter avec l'activation, ce qui est le cas, si l'on exclue l'adsorption de la carbamazépine et du sulfaméthoxazole par les biochars non-activés, où l'on observe des valeurs de la $CsMax$ extrêmement élevées et incohérentes (masse d'adsorbat dépassant celle de l'adsorbant). Ce résultat est dû aux valeurs de Kf proches de 0 pour ces composés, indiquant des courbes pratiquement linéaires, voire convexes (pour les mêmes courbes, les valeurs du $1/n$ de Freundlich sont supérieures à 1). Le modèle de Langmuir ne permet pas dans ce cas de retirer des informations sur la capacité d'adsorption du biochar pour les substances données.

Pour des concentrations basses et/ou des conditions cinétiques, Kf peut jouer un rôle plus important (facteur d'affinité), mais pour des concentrations élevées et/ou des conditions d'équilibre, c'est le $CsMax$ qui joue le rôle le plus important dans l'efficacité de l'abattement (facteur de capacité). Dans la comparaison entre l'adsorption sur le biochar activé (BH14) et le charbon activé de référence (CA), trois cas de figure peuvent être distingués :

- 1) L'adsorption de la carbamazépine et du diclofénac : $CsMax$ plus élevé mais Kf plus bas pour BH14 par rapport à l'interaction du CA avec ces mêmes molécules, indiquant pour le BH14 une meilleure adsorption dans les domaines de concentration testés élevés, mais toutefois une adsorption plus élevée pour le CA dans les domaines de concentration faibles (les courbes se croisent) ;
- 2) L'adsorption du benzotriazole et du sulfaméthoxazole : $CsMax$ plus bas mais Kf plus élevé pour BH14 par rapport à l'interaction du CA avec cette substance, indiquant cette fois pour CA une meilleure adsorption dans les domaines de concentration élevés, mais une adsorption plus élevée pour le BH14 dans les domaines de concentration faibles ;
- 3) L'adsorption du mecoprop sur BH14 : $CsMax$ proches mais Kf plus élevé pour CA, indiquant une performance légèrement meilleure par rapport à BH14 dans tout le domaine de concentration.

L'adéquation aux modèles varie selon les couples biochar/molécule: le biochar à base de déchets de bois criblés non-activé BC0912 montre une meilleure adéquation avec le modèle de Freundlich, pour tous les composés sauf le benzotriazole. Le BH17, produit de la même façon, montre une adéquation légèrement meilleure au modèle de Langmuir pour tous les composés sauf le sulfaméthoxazole.

Le charbon activé commercial présente une meilleure adéquation au modèle de Freundlich pour toutes les substances, alors que le biochar à base de déchets de bois activé à la vapeur, le BH14, montre une

meilleure adéquation au modèle de Langmuir pour le benzotriazole et le sulfaméthoxazole, et au modèle de Freundlich pour les trois autres substances.

Une meilleure adéquation au modèle de Langmuir indique une homogénéité énergétique des sites d'adsorption, caractérisant plutôt des interactions fortement spécifiques (par exemple liés à groupes fonctionnels), alors qu'une isotherme mieux décrite par le modèle de Freundlich indique une plus grande variété d'interactions.

Dans le cas du biochar non-activé BH17 et du biochar activé BH14, pour certains composés, l'adéquation à aucun des deux modèles testés n'est réellement satisfaisante : pour BH17, l'erreur relative moyenne dépasse un facteur 0.3 (30%) pour le diclofenac, le mecoprop et le sulfaméthoxazole dans les deux modèles, et pour BH14, c'est le cas pour la carbamazépine et le diclofenac. S'agissant de composés polaires, une correspondance à un modèle de type BET (3 paramètres), prenant en compte une adsorption coopérative, a été testée, mais n'a pas démontré une amélioration de la correspondance aux valeurs mesurés par rapport aux modèles de Freundlich et de Langmuir.

5.6 Corrélations entre les caractéristiques des charbons et les paramètres d'adsorption

5.6.1 Relations entre paramètres physico-chimiques des biochars

Tableau 5-6 : Corrélations (Pearson) entre caractéristiques mesurées sur les biochars (8 biochars testés) : composition élémentaire, taux de cendres, surface spécifique, capacité d'échange cationique, rapports atomiques hydrogène/carbone et oxygène/carbone

Paramètre	C %	H %	N %	O %	Cendres %	BET_N ₂ (m ² /g)	CEC (cmol/kg)	H/C	O/C
C %	1	.599	.928**	.235	-.984**	-.574	-.329	.532	.087
H %	.599	1	.609	.758*	-.681	-.960**	-.830*	.995**	.649
N %	.928**	.609	1	.292	-.898**	-.607	-.398	.551	.136
O %	.235	.758*	.292	1	-.318	-.630	-.232	.813*	.979**
Cendres %	-.984**	-.681	-.898**	-.318	1	.637	.390	-.621	-.186
BET_N ₂ (m ² /g)	-.574	-.960**	-.607	-.630	.637	1	.926**	-.941**	-.497
CEC (cmol/kg)	-.329	-.830*	-.398	-.232	.390	.926**	1	-.814*	-.069
H/C	.532	.995**	.551	.813*	-.621	-.941**	-.814*	1	.719*
O/C	.087	.649	.136	.979**	-.186	-.497	-.069	.719*	1

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

* . La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).

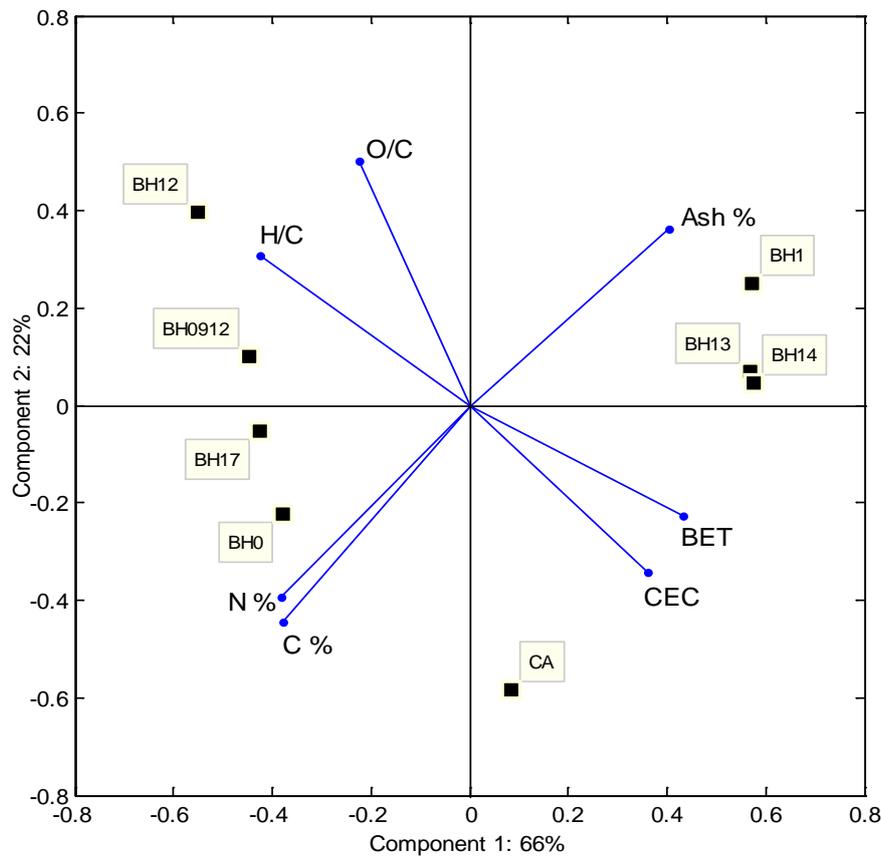


Figure 5-8 : Représentation graphique des deux premiers composants de l'analyse en composantes principales des caractéristiques des biochars: permet de visualiser les corrélations entre paramètres.

Il est possible d'observer des axes définis par les groupes de paramètres corrélés :

- rapport H/C, surface spécifique, CEC ;
- taux de carbone, taux d'azote, taux de cendres ;
- rapport O/C

Le premier axe distingue les biochars activés à la vapeur (BH1, 13, 14) et le CA des biochars non-activés (BH0, 17, BC0912) et du BH12 (traité aux lactoferments).

Le deuxième axe distingue les biochars au faible taux de cendres, comprenant les biochars non-activés et le CA des biochars activés à la vapeur, présentant un taux de cendres particulièrement élevé.

Le troisième axe distingue les biochars activés à la vapeur et le CA des biochars non-activés, ainsi que le biochar traité aux lactoferments, présentant une teneur en oxygène relativement élevée.

Il existe une forte corrélation entre la capacité d'échange cationique et la surface spécifique du biochar, qui est la caractéristique la plus importante dans l'efficacité de l'adsorption.

5.6.2 Influence des caractéristiques des biochars sur le taux d'abattement des molécules testées en eau usée

Tableau 5-7 : Corrélations (Pearson) entre le taux d'abattement en eau usée (moyenne sur 4 campagnes) et les caractéristiques des biochars mesurées: abattement par composé (BT : benzotriazole ; CZ : carbamazépine ; DF : diclofénac ; SM : sulfaméthoxazole) et abattement moyen total (TOT) ; 6 biochars testés.

Taux d'abattement en eau usée	BT	CZ	DF	SM	TOT
C %	.272	-.692	-.842*	-.458	-.593
N %	.158	-.746	-.961**	-.587	-.709
Cendres %	-.154	.782	.855*	.535	.674
BET_N ₂	.640	.944**	.775	.967**	.978**
CEC	.808	.833*	.497	.896*	.860*
H/C	-.630	-.936**	-.789	-.975**	-.979**
O/C	-.341	-.110	-.228	-.300	-.268

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

* . La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).

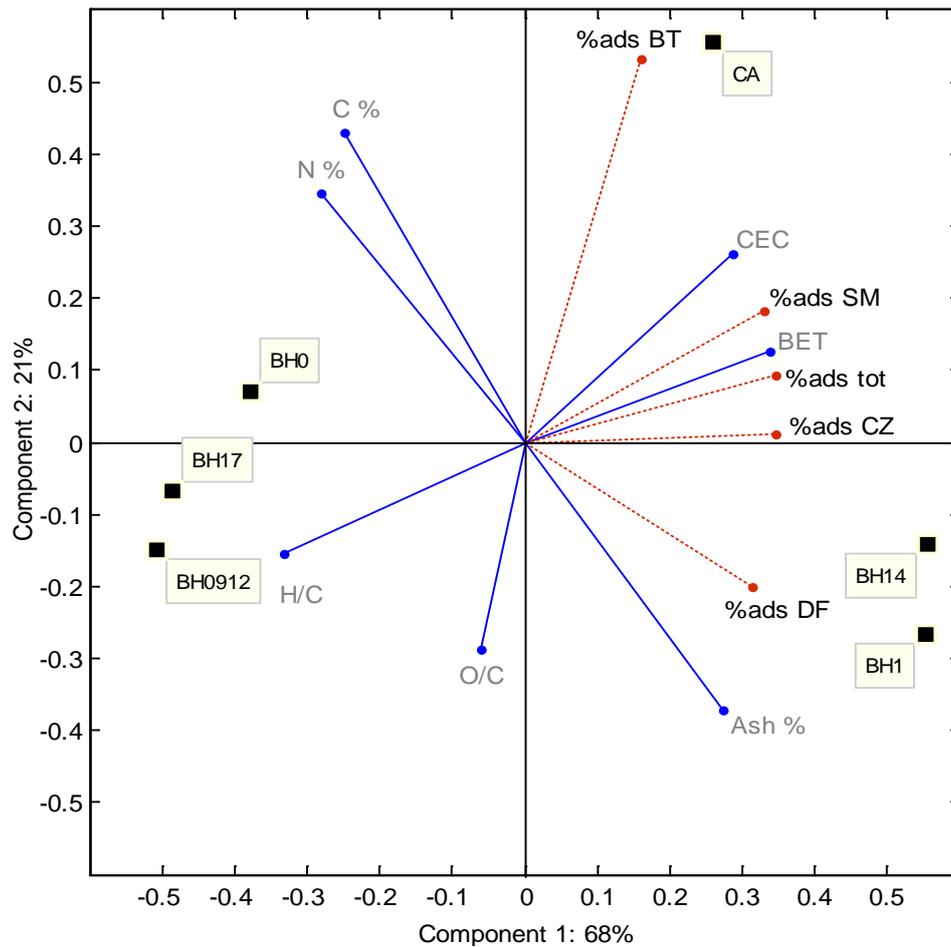


Figure 5-9 : Représentation graphique des deux premiers composants de l'analyse en composantes principales des caractéristiques des biochars et des taux d'abattement en eau usée pour les 6 biochars testés.

Pour tous les composés, le taux d'abattement est corrélé positivement à la surface spécifique et à la CEC, et négativement au rapport H/C. Cette corrélation est significative pour la carbamazépine et le sulfaméthoxazole, mais pas pour le diclofénac ni pour le benzotriazole. La particularité de l'abattement du benzotriazole est la corrélation plus forte avec la CEC qu'avec la SSA, et celle du diclofénac est une corrélation positive significative avec le taux de cendres.

6 Discussion

6.1 Abatement des micropolluants par les biochars testés

6.1.1 Comparaison entre les résultats obtenus en solution pure et en eau usée

Lors des essais avec des micropolluants en solution pure, à des concentrations faibles (10-100 µg/l), le biochar produit à base de déchets de bois criblés non-activé présente des taux d'abattement légèrement plus faibles que le charbon activé commercial (de 20 à 80%).

Lors des essais en solution pure avec des concentrations plus élevées (isothermes d'adsorption, jusqu'à 1000 µg/l), ainsi qu'en condition d'application, en eau usée et avec un temps de réaction court, les biochars non-activés montrent des capacités d'abattement bien plus faibles et insuffisantes par rapport aux exigences.

L'activation physique à la vapeur d'eau des biochars à base de déchets de bois est choisie comme procédé permettant d'optimiser la capacité d'abattement, le coût et la facilité de la réalisation, ainsi que l'impact environnemental. Les biochars produits par d'autres techniques n'ont pas été systématiquement testés.

Les résultats des tests d'abattements en eau usée permettent d'observer que, dans les conditions des essais effectués, les biochars activés à la vapeur montrent une capacité d'adsorption nettement meilleure que celle des biochars non-activés. Le taux d'abattement des composés cibles est satisfaisant (en moyenne 70%, atteint 80%) pour le diclofenac et la carbamazépine, mais en dessous (en moyenne 30%, atteint 50%) pour le benzotriazole et le sulfaméthoxazole. Le biochar à base de déchets de bois (BH14) activé à la vapeur montre un abattement proche, voir meilleur que le charbon actif de référence.

6.1.2 Comparaison des résultats en eau usée avec les abattements exigés par la future législation et les résultats obtenus dans les installations pilotes

Les exigences prévues par le projet de révision de la législation visent un taux d'épuration moyen de 80% par rapport aux eaux polluées brutes pour les micropolluants-cibles. Ce taux d'abattement prend en compte toute la chaîne de traitement, y compris le traitement biologique, ainsi que l'étape d'ultrafiltration suite au traitement au charbon activé.

Tableau 6-1 : Comparaison des taux d'abattements mesurés aux données obtenues lors des essais pilotes à la station de Vidy

Substances	Installation pilote Vidy: CA 15 mg/l		Expériences en batch : CA 10 mg/l	Expériences en batch : BH14 10 mg/l
	<i>Abattement entrée STEP - sortie LF (%)</i>	<i>Abattement entrée STEP - sortie CAP-UF (%)</i>	<i>Abattement sortie LF – traitement CAP (%)</i>	<i>Abattement sortie LF – traitement CAP (%)</i>
Benzotriazole	21 (±16)	97 (±1)	57.02±15.61	23.36±12.57
Carbamazépine	2 (±3)	92 (±2)	54.54±16.14	67.81±16.90
Diclofénac	0 (±0)	84 (±4)	27.64±19.28	67.34±19.49
Sulfaméthoxazole	13 (±22)	68 (±48)	29.52±10.16	27.01±13.77

Le BH14, mais aussi le charbon activé de référence (CA), montrent des taux d'abattement plus faibles lors des essais en laboratoire que ce qui a été démontré lors du suivi des exploitations pilotes. Cela s'explique en premier par le fait qu'une étape de traitement supplémentaire a lieu dans les exploitations ilotes, une ultrafiltration à l'aval du traitement au charbon activé. Des essais menés à la STEP de Vidy ont montré entre 15 et 30% d'abattement par les membranes d'ultrafiltration [Margot 2011]. Par contre, aucun effet sur l'abattement des micropolluants n'a été constaté pour la filtration sur cellulose régénérée avec pores de 450 nm utilisés lors des tests en batch.

D'autre part, la concentration de biochar est plus faible et la teneur en carbone organique dissous de l'eau plus élevée par rapport aux conditions standard de la STEP de Vidy. Les variations du COD dans l'eau usée sont dues principalement à la pluviométrie et au fonctionnement des traitements biologiques précédant le traitement au biochar. Le suivi des installations à la STEP de Vidy sur l'année 2010 indique des valeurs moyennes de 7.5 (± 1.5) mg/l DOC à la sortie du lit fluidisé. Les cas de dépassement des 10 mg/l est rare. Les dates et périodes journalières des campagnes de prélèvement ont visé des moments où les concentrations élevées de polluants étaient attendues (été, période sèche, mi-journée), dans le but d'assurer des concentrations détectables et quantifiables avant et après le traitement au biochar. Les valeurs d'abattement moyennes observées dans ce travail, avec une concentration en COD deux à quatre fois plus élevée que la moyenne lors de deux campagnes de prélèvement sur quatre, représentent donc une forme de « worst case ».

Même dans ces conditions de DOC défavorable, les résultats montrent qu'en sommant les abattements obtenus dans les prétraitements en amont, l'abattement obtenu dans nos expériences en batch et l'abattement obtenu lors de la dernière étape d'ultrafiltration, **le taux d'abattement de 80% exigé par la loi peut être obtenu par le biochar à base de déchet de bois activé pour deux des molécules (82 à 97 % pour la carbamazépine, 82 à 97 % pour le diclofénac) et presque atteint pour les deux autres (55 à 70% pour le sulfaméthoxazole et 60-75% pour le benzotriazole).**

7 Conclusions et perspectives

Selon ces résultats, **l'utilisation des biochars à base de déchets de bois criblés activés à la vapeur pour l'abattement des micropolluants en eau usée est envisageable**. Cette première étude ouvre la voie aux essais de plus grande envergure, en conditions d'exploitation, au sein de la totalité de la chaîne de traitement, dans le but de tester les effets sur une plus large gamme de micropolluants, ainsi que le comportement par rapport aux membranes d'ultrafiltration.

Une caractérisation plus poussée des biochars est envisageable, en particulier pour décrire la taille et la répartition de la porosité. Ceci permettrait de préciser les caractéristiques nécessaires à une bonne capacité de traitement en conditions réelles.

Il a pu être montré que les deux lots de production par procédé identique de pyrolyse (BH17 et BC0912) et d'activation (BH13 et BH14) présentent des caractéristiques très semblables. L'étape importante dans le projet d'une future exploitation industrielle de cette filière de production est l'évaluation de la stabilité des propriétés de plusieurs lots de production (pyrolyse et activation) sur une période de temps plus longue (une année). En effet, la filière étant basée sur des déchets de bois, la ressource peut varier en qualité, en particulier en proportion de feuillu/résineux et de matière ligneuse/matière verte, mais aussi en dimension. **Le processus de pyrolyse et d'activation est contrôlé et peut être considéré comme stable.**

Le suivi de la qualité des biochars produits engendre un coût : les biochars ne pourront pas systématiquement être caractérisés en détail. Cette étude a montré que **la CEC était fortement corrélée à la fois avec la surface spécifique et le taux d'abattement des polluants testés**. Il s'agit d'une technique peu onéreuse et facilement mise en œuvre. C'est aussi une technique analytique effectuée en routine dans nos laboratoires partenaires. **L'analyse de la CEC est donc une technique de mesure intéressante pour des analyses de suivi systématique de qualité sur de nombreux échantillons.**

8 Références

- Abegglen, C. (2009). "Eliminer des micropolluants - techniques d'épuration." Eawag News **67**.
- Abegglen, C. and H. Siegrist (2012). "Micropolluants dans les eaux usées urbaines. Etape de traitement supplémentaire dans les stations d'épuration." Office fédéral de l'environnement, Berne, Connaissance de l'environnement n° 1214.
- Ahmad, M., S. S. Lee, et al. (2013). "Trichloroethylene adsorption by pine needle biochars produced at various pyrolysis temperatures." Bioresource Technology **143**: 615-622.
- Antal, M. J. J. and M. Groenli (2003). "The Art, Science, and Technology of Charcoal Production." Industrial & Engineering Chemistry Research **42**: 1619-1640.
- Atkins, P. W. (1998). Elements de chimie physique, De Boeck.
- Avdeef, A., K. J. Box, et al. (1998). "pH-Metric logP 10. Determination of Liposomal Membrane-Water Partition Coefficients of Ionizable Drugs." Pharmaceutical Research **15**(2).
- Azargohar, R. and A. K. Dalai (2008). "Steam and KOH activation of biochar: Experimental and modeling studies." Microporous and Mesoporous Materials **110**(2-3): 413-421.
- Baudu, M. (2001). "Prediction of Adsorption from Aqueous Phase of Organic Molecules as a Function of Some Physicochemical Characteristics of Activated Carbons." Water quality and research Journal Canada **36**.
- Beesley, L., E. Moreno-Jiménez, et al. (2010). "Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil." Environmental Pollution **158**(6): 2282-2287.
- Boehler, M. (2012). "Removal of micropollutants in municipal wastewater treatment plants by powder-activated carbon." Water science and technology **66**: 2115-2121.
- Boreen, A. L., W. A. Arnold, et al. (2004). "Photochemical fate of sulfa drugs in the aquatic environment: Sulfa drugs containing five-membered heterocyclic groups." Environmental Science & Technology **38**(14): 3933-3940.
- Boulinguez, P., P. Le Cloirec, et al. (2008). "Revisiting the Determination of Langmuir Parameters - Application to Tetrahydrothiophene Adsorption onto Activated Carbon." Langmuir **24**: 6420-6424.
- Chamberlain, K., A. A. Evans, et al. (1996). "1-octanol/water partition coefficient (K_{ow}) and pK(a) for ionisable pesticides measured by a pH-metric method." Pesticide Science **47**(3): 265-271.

Chen, B. (2008). "Transitional Adsorption and Partition of Nonpolar and Polar Aromatic Contaminants by Bio-chars of Pine Needles with Different Pyrolytic Temperatures." Environmental Science & Technology **42**.

Chen, B. and Z. Chen (2009). "Sorption of naphthalene and 1-naphthol by biochars of orange peels with different pyrolytic temperatures." Chemosphere **76**(1): 127-133.

Dallos, A., G. Wienke, et al. (1993). "PREDICTION OF THE OCTANOL WATER PARTITION-COEFFICIENT WITH THE AID OF THE UNIFAC METHOD." Chemie Ingenieur Technik **65**(2): 201-203.

Dalpozzo, A., G. Donzelli, et al. (1989). "INVITRO MODEL FOR THE EVALUATION OF DRUG DISTRIBUTION AND PLASMA PROTEIN-BINDING RELATIONSHIPS." International Journal of Pharmaceutics **50**(2): 97-101.

Delle Site, A. (2001). "Factors Affecting Sorption of Organic Compounds in Natural Sorbent/Water Systems and Sorption Coefficients for Selected Pollutants. A Review." Journal of Physical Chemistry **30**: 187-439.

Dickenson (2010). "Quantitative structure property relationships for the adsorption of pharmaceuticals onto activated carbon." Water science and technology **62.10**.

EAWAG (2010). "Micropolluants - Système d'évaluation de la qualité des eaux au vu des composés traces organiques issus de l'assainissement communal."

EBC (2012). European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar.'. Arbaz, Switzerland, European Biochar Foundation.

Ebie, K. (2001). "Pore distribution effect of activated carbon in adsorbing micropollutants from natural water." Water Research **35**: 167-179.

Farrel, J. (1994). "Desorption of Halogenated Organics from Model Solids, Sediments, and Soil under Unsaturated Conditions." Environmental Science & Technology(28): 53-72.

Foo, K. Y. and B. H. Hameed (2010). "Insights into the modeling of adsorption isotherm systems." Chemical Engineering Journal **156**(1): 2-10.

Freundlich, H. (1906). "Concerning adsorption in solutions." Zeitschrift Fur Physikalische Chemie--Stoichiometrie Und Verwandtschaftslehre **57**(4): 385-470.

Glaser, B., J. Lehmann, et al. (2002). "Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review." Biology and Fertility of Soils **35**(4): 219-230.

Götz, C., S. Mettler, et al. (2013). Modélisation du flux de micropolluants provenant des rejets de l'épuration des eaux usées Bassins du Léman et du Rhône aval. ENVILAB - Sur mandat de la Commission internationale pour la protection des eaux du Léman - CIPEL.

Hansch, C., A. Leo, et al. (1995). Exploring QSAR - Hydrophobic, Electronic, and Steric Constants. Washington, DC, American Chemical Society.

Jones, O. A. H., N. Voulvoulis, et al. (2002). "Aquatic environmental assessment of the top 25 English prescription pharmaceuticals." Water Research **36**(20): 5013-5022.

Langmuir, I. (1916). "The constitution and fundamental properties of solids and liquids Part I Solids." Journal of the American Chemical Society **38**: 2221-2295.

Mani, S. V., D. W. Connell, et al. (1991). "STRUCTURE-ACTIVITY-RELATIONSHIPS FOR THE PREDICTION OF BIODEGRADABILITY OF ENVIRONMENTAL-POLLUTANTS." Critical Reviews in Environmental Control **21**(3-4): 217-236.

Margot, J., Magnet, A., Thonney, D., Chèvre, N., de Alencastro, F., Rossi, L. (2011). "Traitement des micropolluants dans les eaux usées – Rapport final sur les essais pilotes à la STEP de Vidy (Lausanne).".

Marković, D. D., B. M. Lekić, et al. (2014). "A New Approach in Regression Analysis for Modeling Adsorption Isotherms." The Scientific World Journal **2014**: 1-17.

Marsh, H. and F. Rodriguez-Reinoso (2006). Activated Carbon, Elsevier.

McFarland, J. W., C. M. Berger, et al. (1997). "Quantitative structure-activity relationships among macrolide antibacterial agents: In vitro and in vivo potency against *Pasteurella multocida*." Journal of Medicinal Chemistry **40**(9): 1340-1346.

Morasch, B., F. Bonvin, et al. (2010). "Occurrence and fate of micropollutants in the Vidy Bay of Lake Geneva, Switzerland. Part II: Micropollutant removal between wastewater and raw drinking water." Environmental Toxicology and Chemistry **29**(8): 1658–1668.

Moreno-Castilla, C. (2004). "Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials." Carbon **42**(1): 83-94.

Nowotny, N. (2007). "Quantification and Modelling of the Elimination Behavior of Ecologically Problematic Wastewater Micropollutants by Adsorption on Powdered and Granulated Activated Carbon." Environmental Science & Technology **41**.

OEaux (1998). Ordonnance sur la protection des eaux. Etat le 1er janvier 2014 (RS 814.201). <http://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19983281/index.html>, Confédération helvétique.

OFEV (2009). "Déversement de substances organiques en traces dans les eaux. Rapport explicatif relatif à la modification de l'ordonnance sur la protection des eaux. Projet du 18 novembre 2009." Publication OFEV.

Perazzolo, C., B. Morasch, et al. (2010). "Occurrence and fate of micropollutants in the Vidy Bay of Lake Geneva, Switzerland. Part I: Priority list for environmental risk assessment of pharmaceuticals." Environmental Toxicology and Chemistry **Vol. 29, No. 8**: 1649–1657.

PYREG (2011). "Pyreg 500 technical data."

Qiu, M., K. Sun, et al. (2014). "Properties of the plant- and manure-derived biochars and their sorption of dibutyl phthalate and phenanthrene." Scientific Reports **4**.

Serjeant, E. P. and B. Dempsey (1979). Ionisation Constants of Organic Acids in Aqueous Solution. New York, Pergamon Press, Inc.

Smernik, R. J. (2009). "Biochar and Sorption of Organic Compounds." Biochar for environmental management.

Snyder, S. A., S. Adham, et al. (2007). "Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals." Desalination **202**(1-3): 156-181.

Sun, L.-M. and F. Meunier (2003). "Adsorption - aspects théoriques." Dossiers Techniques de l'Ingénieur **j2730**.

Vieno, N. (2007). "Occurrence of Pharmaceuticals in River Water and Their Elimination in a Pilot-Scale Drinking Water Treatment Plant." Environmental Science & Technology **41**: 5077-5084.

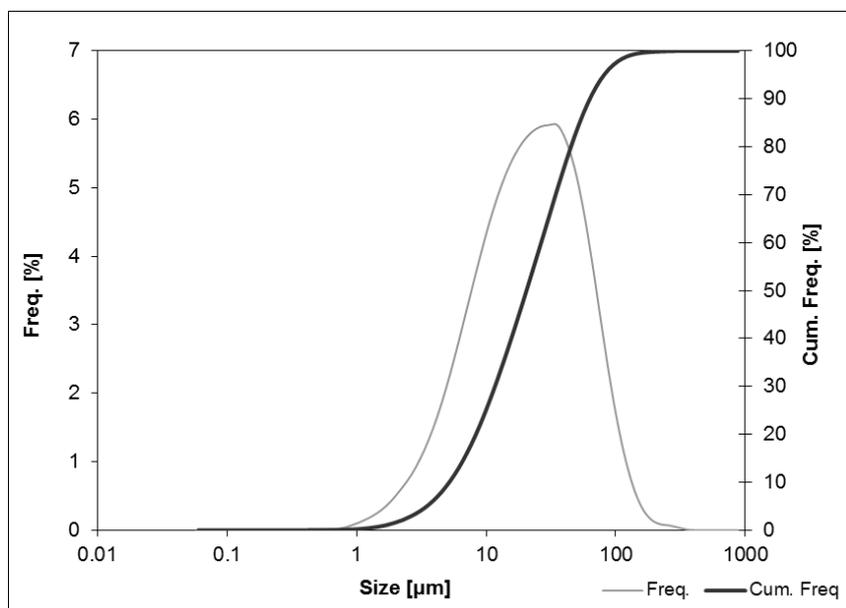
Villacañas, F. (2006). "Adsorption of simple aromatic compounds on activated carbons." Journal of Colloid and Interface Science **293**: 128–136.

Wells, M. J. M. (2006). "Log D(OW): Key to understanding and regulating wastewater-derived contaminants." Environmental Chemistry **3**(6): 439-449.

9 Annexes

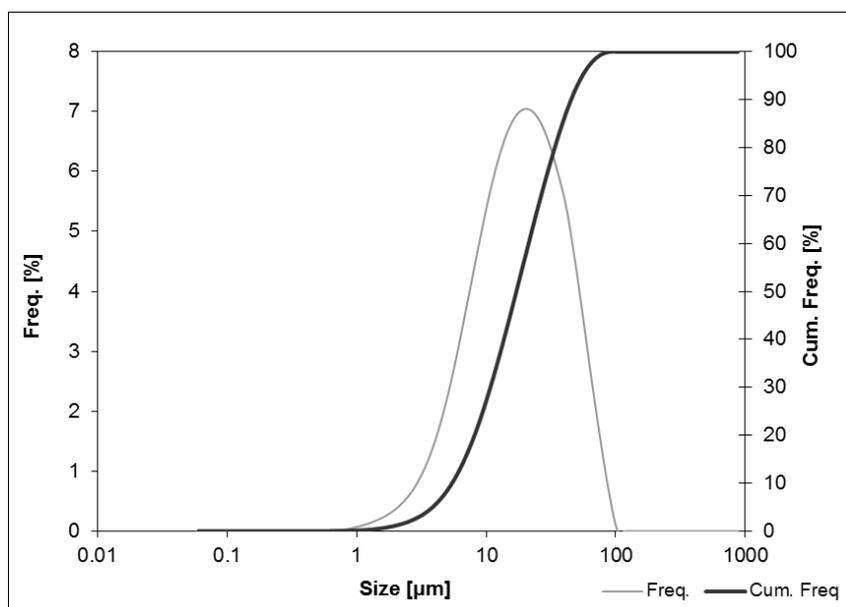
9.1 Comparaison de la granulométrie du charbon activé du commerce et des biochars broyés et tamisés à 80 μm (Malvern Mastersizer 2000)

9.1.1 BC21



bc21_a_r1_(res)

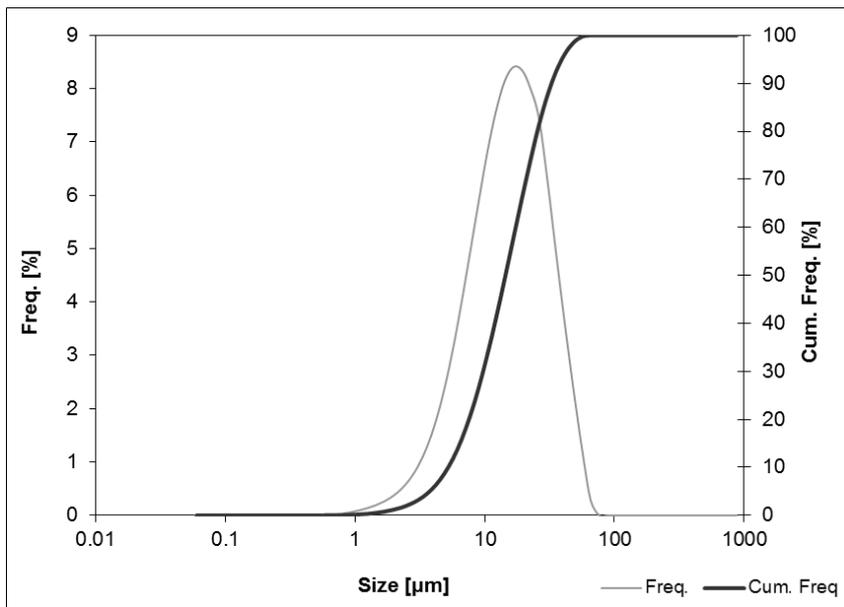
Volume Distributions			
Dv10	5.31 μm	Span	2.74 -
Dv50	21.03 μm		
Dv90	62.99 μm		



bc21_b_r1_(res)

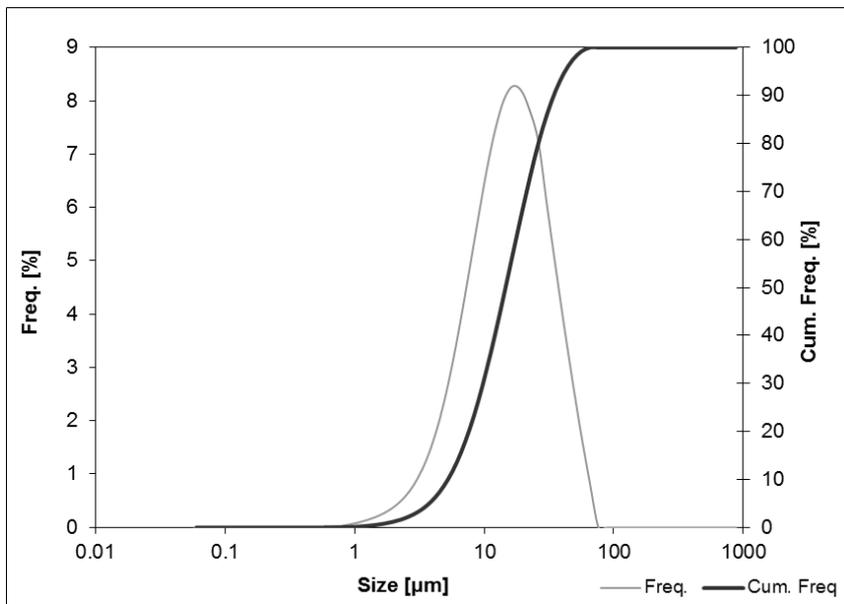
Volume Distributions			
Dv10	5.46 μm	Span	2.34 -
Dv50	17.14 μm		
Dv90	45.50 μm		

9.1.2 BC34



bc34_a_r1_(res)

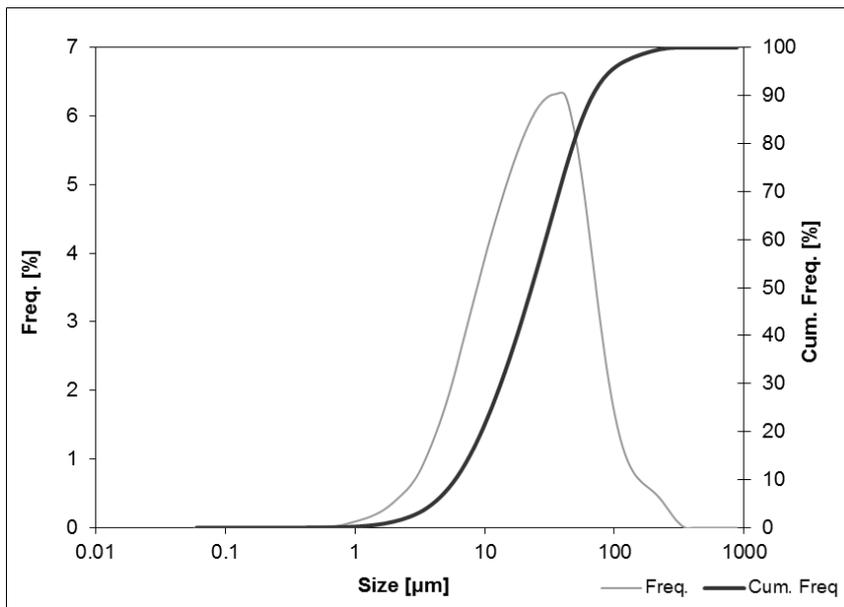
Volume Distributions			
Dv10	5.22 µm	Span	1.92 -
Dv50	14.45 µm		
Dv90	32.98 µm		



bc34_b_r1_(res)

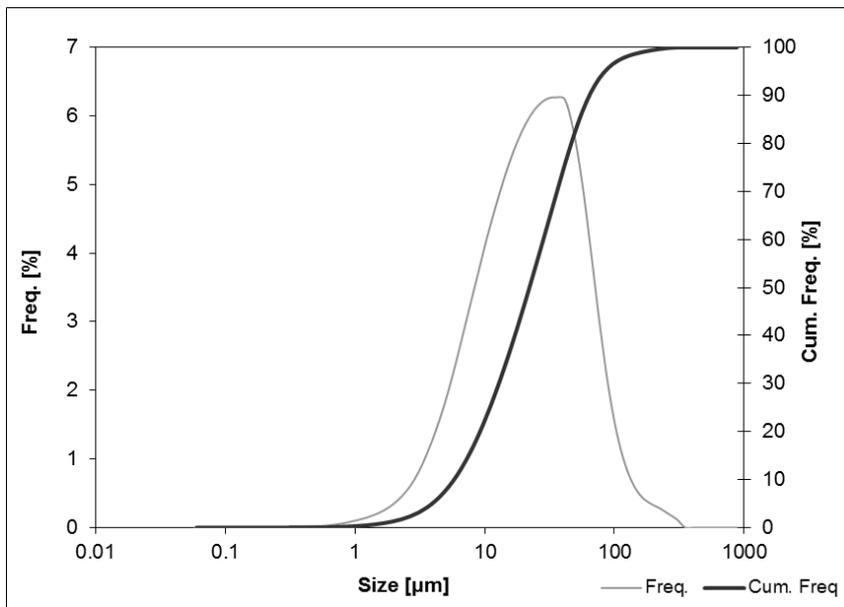
Volume Distributions			
Dv10	5.24 µm	Span	2.00 -
Dv50	14.64 µm		
Dv90	34.58 µm		

9.1.3 BC0912



Bcco0912_a_r1_(res)

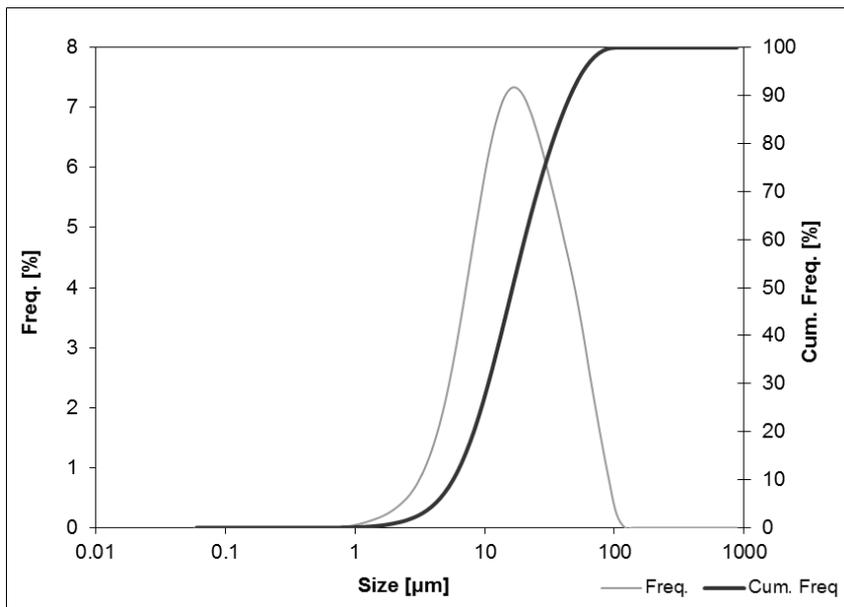
Volume Distributions			
Dv10	5.91 µm	Span	2.70 -
Dv50	23.04 µm		
Dv90	68.14 µm		



Bcco0912_b_r1_(res)

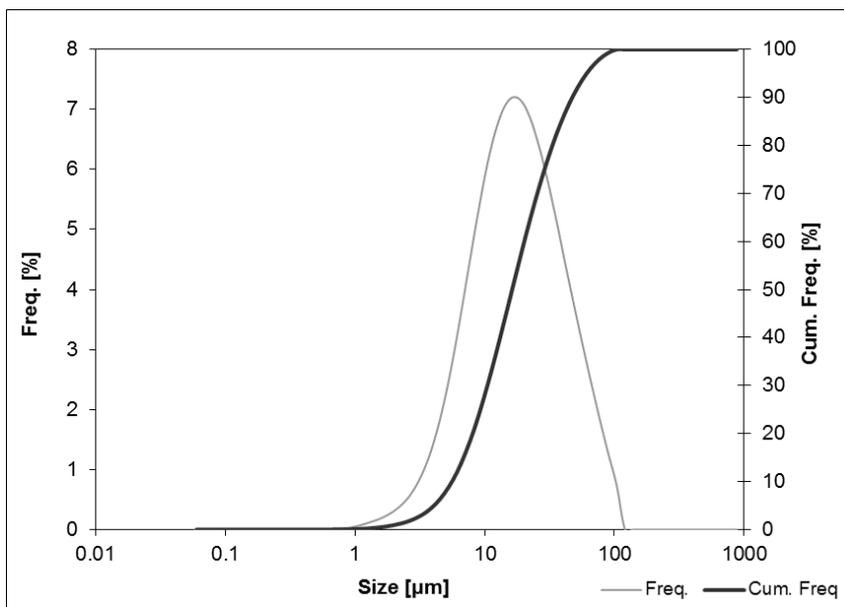
Volume Distributions			
Dv10	5.81 µm	Span	2.64 -
Dv50	22.12 µm		
Dv90	64.28 µm		

9.1.4 CA



ca_a_r1_(res)

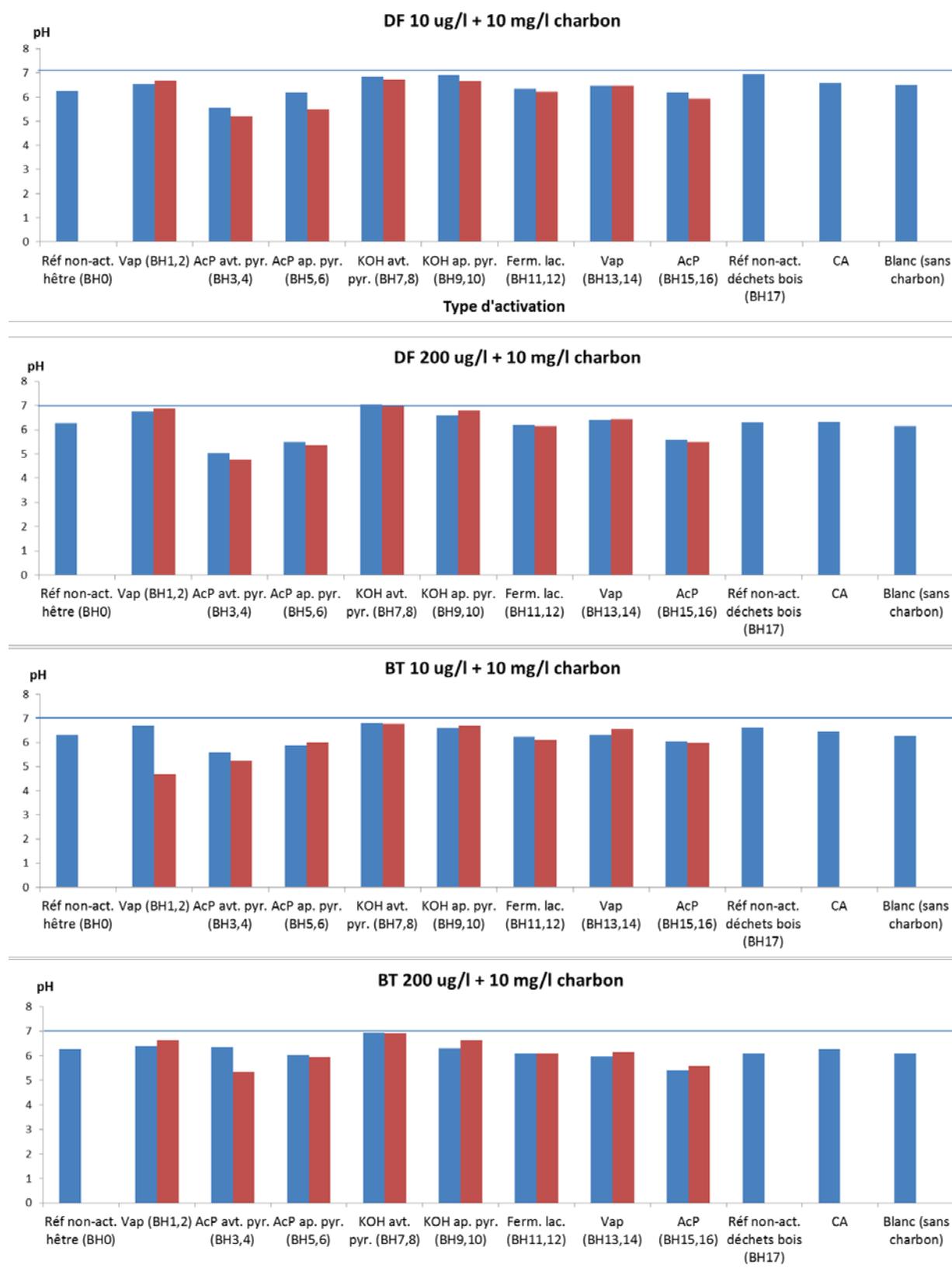
Volume Distributions			
Dv10	5.71 µm	Span	2.45 -
Dv50	16.39 µm		
Dv90	45.91 µm		



ca_b_r1_(res)

Volume Distributions			
Dv10	5.59 µm	Span	2.57 -
Dv50	16.28 µm		
Dv90	47.41 µm		

9.2 pH des mélanges réactionnels avant le test d'abattement du diclofenac et benzotriazole en solution pure avec les biochars activés par différentes techniques



Annexe 2

WP 1 :

Production de biochars et caractérisation des différents biochars (propriété de structure et de surface).

WP 3 :

Technosols épurateurs pour les eaux de ruissellement.

Pascal Boivin, professeur Hepia

Véronique Guiné, professeure Hepia

—SageX n° 33368 (hepia)—

SMArt Clean-City (SMACC)

RAPPORT FINAL HES-SO

WP1 – WP3 : DÉVELOPPEMENT ET MISE EN OEUVRE DE TECHNOSOLS EPURATEURS POUR LES EAUX DE CHAUSSÉES

Chefs de projet hepia : Pr Pascal Boivin
Dr Véronique Guiné

Requérant principal : Pr Fabienne Favre-Boivin, heia
Co-Requérants : Pr Umberto Piantini, HESSO-Valais
Pr Laurent Soldini, ECAL
Pr Alain Beuret, IAI Emotec

Projet CALL - 2011

Lullier / 31.05.2016

A. Contexte et cadre général de la recherche

Le projet SMACC a pour but entre autres de proposer de nouveaux filtres d'épuration végétalisés pour le traitement des eaux de chaussées. Les matériaux constituant ces filtres sont des déchets valorisés : compost et biochars (déchets pyrolysés). La mise au point de cette nouvelle technologie environnementale repose sur le développement et le test de substrats performants, économiques et participants au verdissement et à l'amélioration qualitative et quantitative de l'ambiance urbaine.

La Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (filière Génie Civil – groupe Sol Eau), la Haute école du paysage d'ingénierie et d'architecture de Genève (filière Agronomie – groupe Sols et Substrats), la Haute école du Valais (Institut Technologie du Vivant), l'Ecole Cantonale d'Art de Lausanne et la Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (Institut d'Automatisation Industrielle) se sont associées pour réaliser et développer un substrat épurateur, pour le tester et évaluer sa capacité d'épuration et de végétalisation et pour traiter ces questions *in situ* grâce à la construction d'un banc de traitement des eaux sur le site de Péroles.

Le présent rapport ne concerne que le développement et la mise en œuvre de différents technosols épurateurs en colonnes de laboratoire et structures de démonstration.

B. Objectifs annoncés pour WP1 et WP3

WP1: Production de biochars et caractérisation des différents biochars (propriétés de structure et de surface)

- Préparation des biomasses végétales
- Pyrolyse
- Caractérisation des propriétés de surface
- Choix des biochars les plus performants
- Développement de méthodes analytiques
- Développement de substrats végétalisables
 - o Choix de mélanges de matériaux constitutifs
 - o Construction de microcosmes
 - o Test de végétalisation des microcosmes en fonction du mélange de matériaux constitutifs.

WP3 : Technosols épurateurs pour les eaux de ruissellement

- Poursuite du développement de substrats végétalisables autoporteurs à forte perméabilité, forte réactivité, grande stabilité temporelle, et recyclables.
 - o Suivi de la croissance végétale, du vieillissement des substrats des microcosmes développés au WP1
 - o Test de la durabilité des substrats par incubation de microcosmes
 - o Test d'épuration des eaux de ruissellement sur les microcosmes
- Caractérisation de l'épuration des eaux de ruissellement
 - o Construction de mini-colonnes en laboratoire
 - o Test de mobilité / rétention de polluants sur mini colonnes
 - o Test des performances hydrodynamiques sur mini colonnes

Les résultats obtenus à partir de ces objectifs sont repris sous trois aspects différents : l'évaluation et le choix des matériaux constitutifs du substrat, la caractérisation de ses performances hydrodynamiques et épuratives et enfin les différentes couvertures végétales pouvant être envisagées en fonction de la situation et de la capacité d'entretien des systèmes épurateurs.

B.1 Résultats obtenus pour WP1 et WP3

B.1.1 Choix des matériaux

Travaux réalisés

- Les substrats développés ont été élaborés (en collaboration avec Swiss-biochar, Institut Ithaka et Bionika) uniquement à partir de déchets : biochars (déchets de bois pyrolysés), fumiers, composts, déchets verts, déchets de gravière (cf. Tableau 1). Les différents constituants ont été assemblés et compostés pendant au minimum 8 semaines. Pour évaluer la maturité du substrat des tests bandelettes (NH₄, NO₃, sulfures et pH) sont effectués à chaque brassage (hebdomadaire).

Tableau 1 : Composition des différents substrats élaborés

Constituants des substrats	Terra Preta 30	Terra Preta 50
	Composition (%)	Composition (%)
Biochars (déchets de bois pyrolysés)	30	50
Déchets verts variés et pré-compostés	30.8	22
Déchets verts frais	7.7	5.5
Compost immature d'un andain précédent (inoculum bactérien)	7.7	5.5
Fumier de vache	15.4	11
Déchets fins de gravière (structure minérale)	8.4	6

- Les propriétés chimiques suivantes ont été mesurées sur les biochars purs avant et/ou après compostage par le laboratoire Sols et substrats de hepia :
 - o Capacité d'échange cationique CEC (au pH des matériaux par cobaltihexamine) mesurées sur les matériaux bruts et/ou broyés, sur différents échantillons de biochars (variation saisonnière et au cours d'une pyrolyse) ;
 - o Fertilité chimique : azote organique (selon méthode Kejdhal), Ca, K, Mg et P (extraits à l'eau et à l'EDTA)
 - o Teneurs en éléments traces métalliques ETM : Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn (extraction à l'HNO₃, 2M)
 - o pH à l'eau
 - o Des protocoles pour mesurer l'hydrophobie (Water Drop Penetration) et la capacité d'échange anionique (selon Navia et al., 2005) ont été adaptés aux biochars dans le cadre du projet. Aucun échantillon brut ne présentait de caractère hydrophobe.
- Un test de germination avec orge et cresson était systématiquement réalisé pour les substrats testés *in situ* et en laboratoire. Tous les tests réalisés se sont avérés positifs et ont permis de valider l'objectif de végétalisation de ces substrats.
- Les propriétés physiques des substrats ont également été évaluées selon la norme NF EN 13041 et par une analyse des courbes de rétention en eau et de retrait des substrats (selon Boivin et al., 2004) :
 - o Granulométrie des matériaux par tamisage de 2 mm à 20 µm
 - o Densité apparente et densité réelle
 - o Porosité (déterminé en % volumique).

Résultats obtenus

Les principaux résultats concernant à la fois l'évaluation de la qualité des biochars et de la stabilité de leur production ainsi que les propriétés physico-chimiques des substrats créés ont été résumés ci-dessous.

- La stabilité de la qualité de la production des biochars a été évaluée par des mesures de CEC et des éléments nutritifs (Ca, K et Mg) sur des lots de biochars produits à différentes saisons et sur différents échantillons prélevés au cours de la session de pyrolyse (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

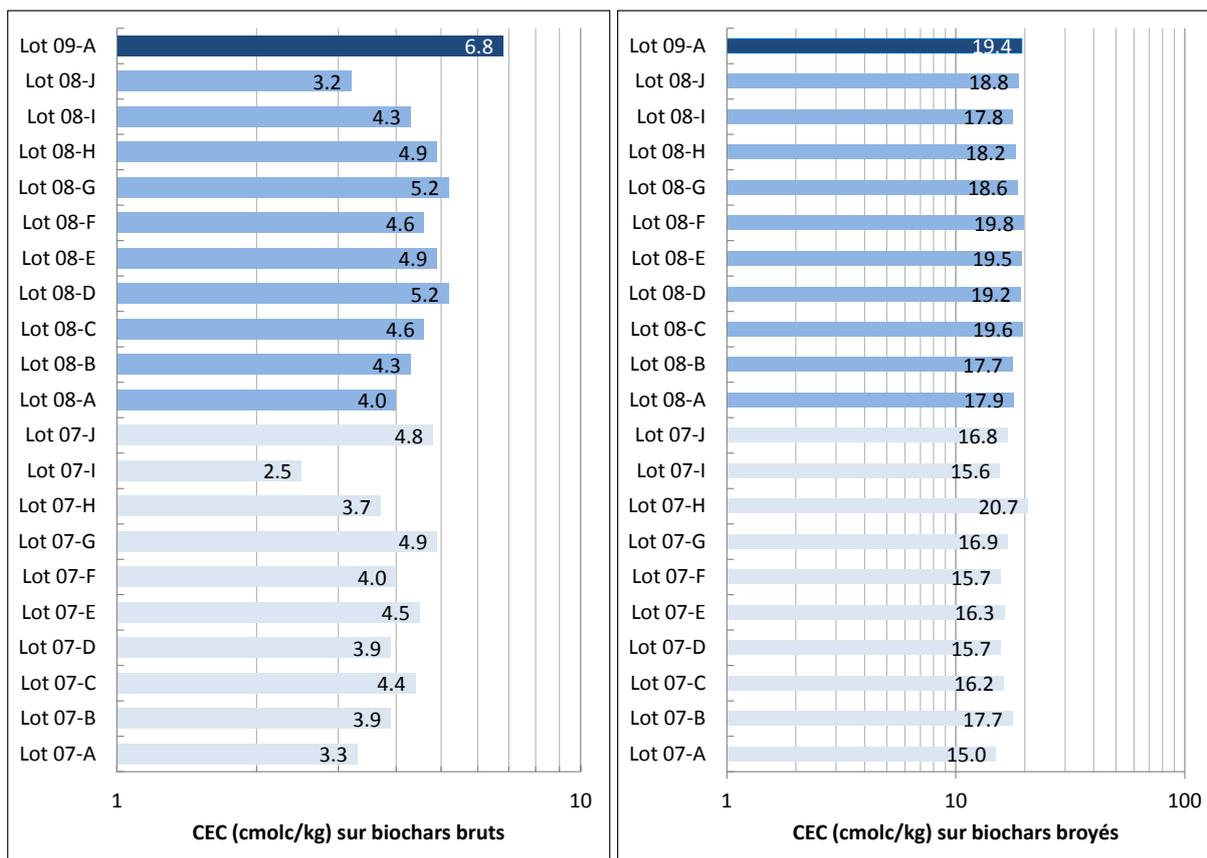


Figure 1 : Mesures de CEC sur différents lots de biochars broyés et non broyés prélevés à différents pas de temps au cours de la session de pyrolyse.

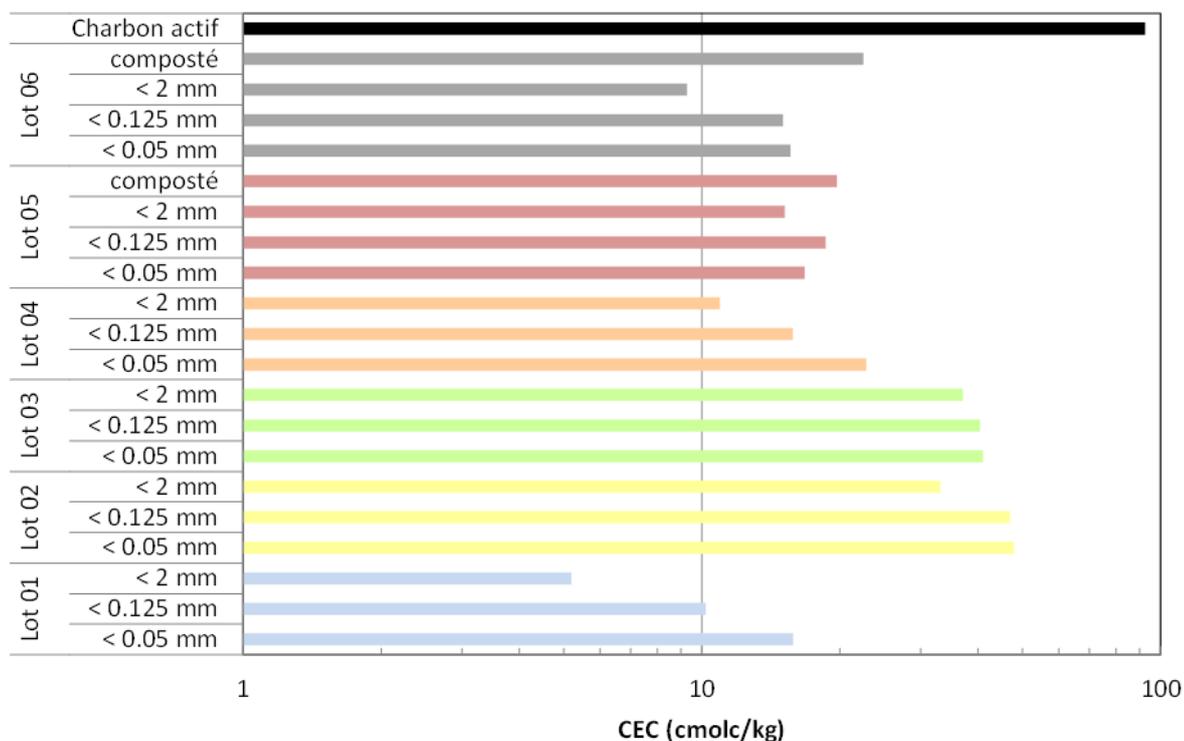


Figure 2 : Mesures de CEC sur différents lots de biochars

- Au cours d'une année, il n'y a pas eu de différences significatives sur la production de biochars. Les CEC mesurées sont relativement faibles, mais dès que les éléments sont compostés et/ou broyés la CEC augmente significativement (cf. Figure 1 et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) ce qui est bénéfique à l'action d'épuration envisagée et valide le choix d'une production de substrats épurateurs à base de matériaux compostés : les Terra Preta (nom donné par les producteurs). Deux Terra Preta ont été testées dans le cadre du projet (cf. Tableau 1).
- Le compostage des biochars pendant 8 semaines minimum permet de garantir une meilleure réactivité chimique des biochars (cf. Figure 2 et augmentation significative de la CEC) et une bonne fertilité (cf. teneurs en azote, Ca, K, P, Mg - Tableau 2) comparable à celle d'un sol amendé régulièrement en compost.

Tableau 2 : Rappels des principaux résultats de la caractérisation chimique des biochars et substrats

	pH	CEC ^a (cmolc/kg)	AEC ^a (cmolc/kg)	ETM (mg/kg _{MS})						Azote organique (%)	Éléments nutritifs (mg/kg _{MS})			
				Cd ^b	Cr ^b	Cu ^b	Ni ^b	Pb ^b	Zn ^b		Ca ^c	K ^c	Mg ^c	P ^c
Biochars														
Min	7.25	15.0	0.024	0.02	2.1	3.5	2.4	0.3	12.2	1.00	25	1266	10.0	1.6
Max	8.06	47.9	0.077	0.21	2.6	19.1	9.2	6.6	50.3	1.03	69	4084	84.9	2.9
Med.^d		20.7		0.04	2.3	6.6	6.0	1.1	23.7	1.01	58.9	2618	30.3	2.3
Terra Preta														
Min	7.25	30.87		0.179	11.67	26.48	17.49	12.86	82.44	0.998	101	962	43.7	51.9
Max	7.55	42.89		0.232	12.91	32.65	19.66	22.21	98.16	1.029	628	2007	178.6	134
Med.^d	7.42	39.67		0.187	12.06	31.44	18.98	15.01	95.63	1.018	462	1656	145.52	74.1

^a Échantillons broyés - ^b Valeurs indicatives de l'OSol (en mg/kg) : Cd < 0.8 ; Cr < 50 ; Cu < 40 ; Ni < 50 ; Pb < 50 ; Zn < 150 - ^c Extrait à l'eau (données extraits à l'EDTA disponibles mais non présentées) - ^d Calculée uniquement si plus de 3 mesures différentes

- L'innocuité des Terra Preta a également été vérifiée par la mesure de la teneur en ETM des différentes Terra Preta produites (cf. Tableau 2), les valeurs indicatives de l'OSol ne sont jamais atteintes.
- Les mesures granulométriques (cf. Tableau 3) par tamisage entre 2mm et 20 µm montrent à la fois une production de biochars et de Terra Preta relativement homogène dans le temps. La très faible proportion d'éléments inférieurs à 50 µm met en évidence une texture sableuse pour ces substrats ce qui permet d'envisager une capacité de drainage importante : propriété recherchée dans le cas d'une épuration en ligne des eaux de ruissellement de chaussées.

Tableau 3 : Rappels des principaux résultats de la caractérisation physiques des substrats

	Granulométrie (% - taille de la maille des tamis en mm)						Densité apparente (g/cm ³)	Densité réelle (g/cm ³)	Porosité (% vol.)	
	> 2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.125	0.125-0.05				0.05-0.02
Biochars										
Min	29.3	18.0	5.5	2.6	0.1	0.1	0	0.18	1.67	78.3
Max	66.9	34.2	14.0	14.5	6.9	7.6	5.3	0.36	1.79	89.7
Med.^d	45.9	27.8	7.7	10.8	2.6	2.1	1.3			
Terra Preta										
Min	44.2	14.1	8.2	2.5	1.0	0.6	0.3	0.41	2.10	71.7
Max	68.8	25.5	17.1	11.2	5.2	2.6	0.9	0.60	2.22	81.4
Med.^d	50.2	18.5	15.7	5.9	2.8	1.0	0.4	0.52	2.18	74.8

- Les courbes de retrait (cf. Figure 3 et Tableau 4) montrent le faible changement de volume des Terra Preta en fonction de la teneur en eau, cela illustre la stabilité structurale des Terra Preta dans le temps. Le volume spécifique et la teneur en eau sont relativement importants : physiquement et chimiquement ces substrats peuvent favoriser la rétention des polluants et participer au maintien d'une végétation vigoureuse même en période de sécheresse du fait de la réserve en eau de ces Terra Preta, qui sont de nouveau deux propriétés indispensables pour l'épuration des eaux (Guiné and Boivin, 2016).

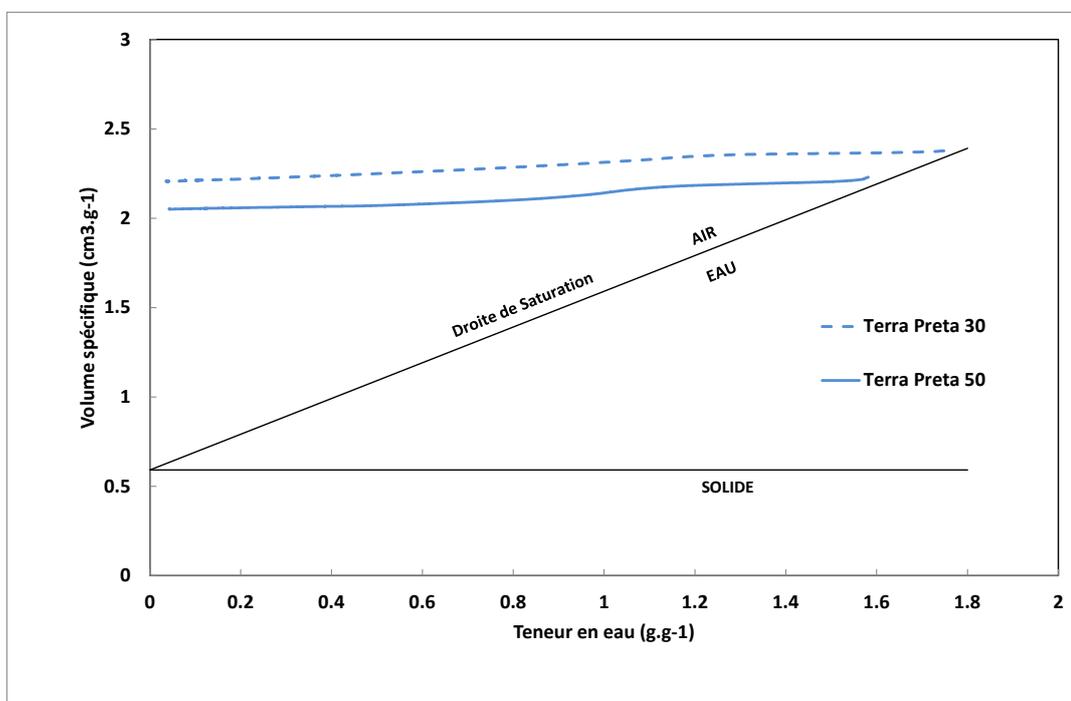


Figure 3 : D'après Guiné and Boivin, 2016 : Courbes de retrait des Terra Preta après une année en place. La droite de saturation a été calculée par des mesures au pycnomètre des densités réelles de chaque échantillon.

Tableau 4 : Analyse des courbes de retrait (d'après Guiné and Boivin, 2016)

	Porosité totale (%)	Teneur en air ^a (%)	Rétention maximale en eau ^b (%)	Eau Facilement Disponible ^c (%)	Capacité Tampon ^d (%)	Eau non disponible ^e (%)
BC50 (frais)	70	5	18	15	3	47
BC50 (1 année)	62	<19	>9	>6	3	34
BC30 (frais)	73	6	19	16	3	48
BC30 (1 année)	68	10	15	10	5	43

^a Mesuré à pF1. ^b Teneur en eau volumétrique mesurée entre pF1 et pF2. ^c Teneur en eau volumétrique mesurée entre pF1 et pF1.7. ^d Teneur en eau volumétrique mesurée entre pF1.7 et pF2. ^e Teneur en eau volumétrique mesurée au-delà de pF2.

B.1.2 Evaluation de la capacité d'épuration des substrats

Travaux réalisés

La structure physique et la réactivité chimique des Terra Preta et des biochars est tout à fait propice aux fonctions d'épuration des eaux de chaussées souhaitées. Afin de valider cela, il est nécessaire d'une part de caractériser les propriétés hydrodynamiques des substrats et d'autre part de tester leur efficacité en terme de filtre épurateur.

- Pour cela la perméabilité des substrats à saturation a été mesurée sur des colonnes de laboratoire et *in situ* sur Banceau (résultats présentés dans le rapport concernant cet équipement) par la méthode des doubles anneaux.
- Des expériences de traçage de l'écoulement de l'eau et de transfert des polluants de chaussée à travers les Terra Preta ont été réalisées sur des microcosmes (diamètre 16 cm et hauteur 30 cm – cf. Figure 4A). En sortie de colonne les eaux filtrées ont été analysées de façon à détecter la présence de polluants (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn et HAP).



Figure 4 : A : Dispositif expérimental de traçage et de transfert des polluants de chaussée – B : Colmatage en surface à l'issue des expériences de transfert des polluants de chaussée.

Résultats obtenus

- La perméabilité à saturation des Terra Preta est très rapide de 1900 à 3600 mm/h en colonnes de laboratoire (cf. Tableau 5).

- L'évolution de la perméabilité (cf. Tableau 5) dans le temps fait apparaître un colmatage en surface uniquement (cf. Figure 4B). Les expériences de transfert sont arrêtées lorsque l'un des critères suivant est atteint : perméabilité inférieure à 36 mm/h ou transfert de 700 L de solution de contamination.

Tableau 5 : Perméabilité à saturation des Terra Preta en laboratoire et in situ.

Substrat	Perméabilité à saturation (mm/h)	Evolution au fil du temps
Terra Preta 30 en colonne	1900	Arrêt des expériences de transfert des polluants routiers à 36 mm/h après 500 L d'une solution artificielle enrichie en boues de chaussées à 500 mg/L
Terra Preta 50 en colonne	3600	Arrêt des expériences de transfert des polluants routiers à 36 mm/h après 500 L d'une solution artificielle enrichie en boues de chaussées à 500 mg/L

- Bien que la perte de perméabilité soit conséquente, celle-ci n'arrive qu'après avoir fait transiter 500 L de solution de contamination (250 g de boues chargées en polluant et correspondant à l'équivalent d'une année de pollution sur le site de Perolles) et de plus le système n'est pas pour autant « imperméable », il correspond à celui d'un sol avec une perméabilité moyenne ne présentant pas de difficultés d'infiltration.
- *In situ*, cette perte de perméabilité peut être facilement corrigée par des opérations de manutention sur les structures : végétalisation de la surface ; mélange du substrat sur les 5 premiers centimètres des structures ; permutation des structures entre elles.
- La capacité de traitement des eaux de chaussée a été évaluée par des expériences de transfert des polluants dans des colonnes de laboratoire. Une solution à base de boues collectées dans les sacs de route a été utilisée. Pour être représentatif de la qualité des eaux de chaussée (colmatage et concentration importante en polluants) cette solution a consisté en un assemblage de boues tamisées : 40 % de boues de diamètre inférieur à 40 µm ; 40% de boues dont le diamètre est compris entre 40 et 63 µm et enfin 20 % de boues dont le diamètre est compris entre 125 et 63 µm. En effet, la majorité des polluants sont associés aux particules en suspension dont le diamètre est inférieur à 100 µm (Brown et al., 2012 ; Chebbo, 1992). Selon la VSA (2002), avec une surface d'interception de 300 m² et un nombre de véhicules par jour de 18'000, tel que prévu à Pérolles, on peut atteindre une charge en MES de 500 mg/L, ce qui a été préparé pour les différentes expériences de transfert en colonne.
- Au total plus de 500 L de solution ont été injectés (soit plus de 250 g de boues) dans les colonnes. A la sortie aucun échantillon d'eau ne contenait de métaux et les profils réalisés à la fin des expériences montrent que la contamination des substrats n'a pas dépassé les 10 cm exception du Cd et du Zn considérés comme des polluants plus mobiles qui ont révélé des anomalies jusqu'à 25 cm pour le Cd et 15 cm pour le Zn (cf. Figure 5). Par ailleurs les bilans de masse déterminés en fonction des profils de contamination et de la teneur en ETM sur les boues font apparaître une efficacité supérieure à 70% en termes de fixation des polluants dans le substrat épurateur.

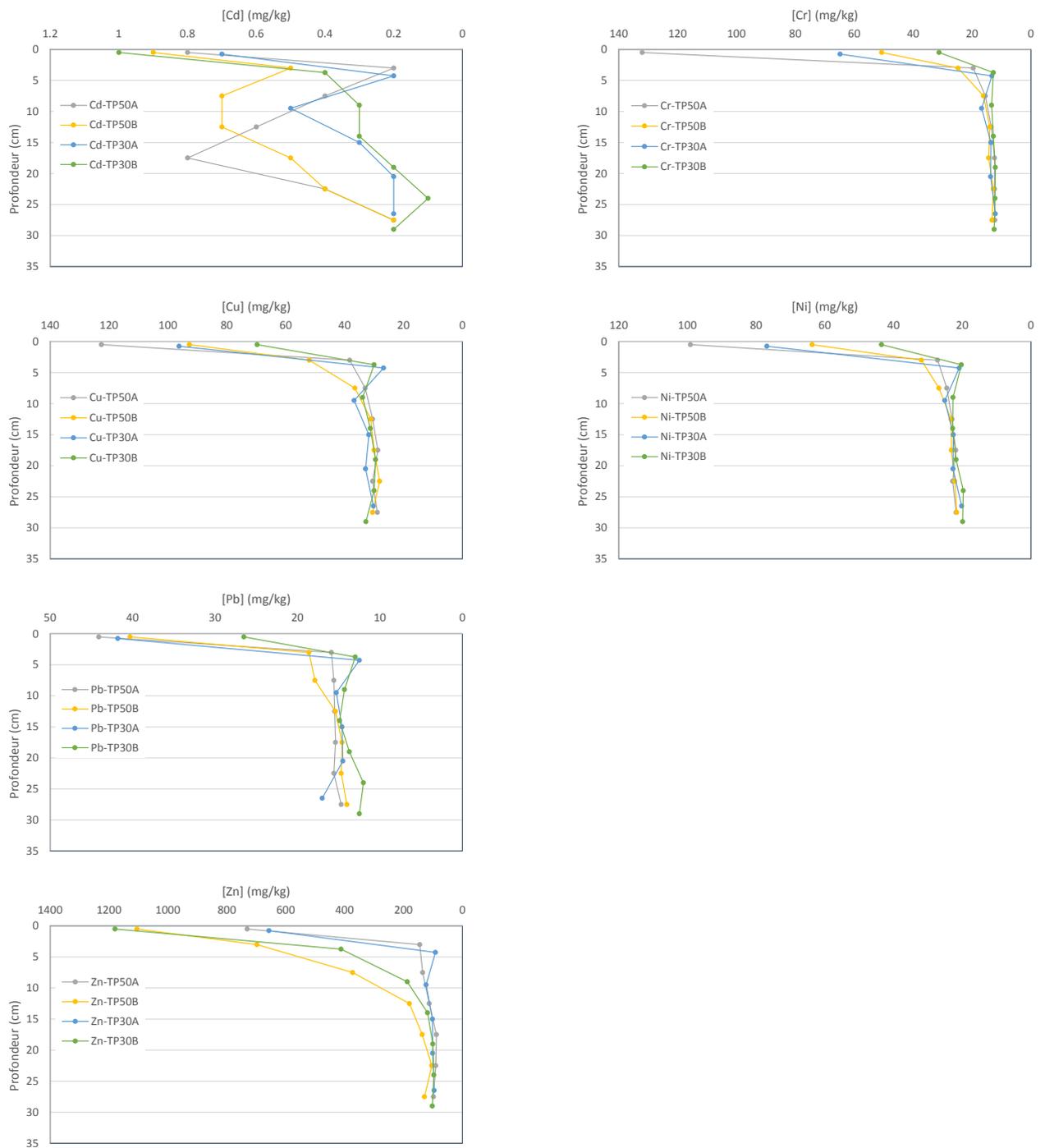


Figure 5 : Profils de contamination des Terra Preta après le transfert de la charge en polluants équivalent à une année de trafic sur le Pont de Pérolles.

B.1.3 Choix de la végétation

Travaux réalisés

- Les critères appliqués à la sélection d'espèces végétales capables de colonisées et de maintenir les Terra Preta dans le temps fonctionnelles d'un point de vue hydrodynamique et épuratif sont les suivants :

- Un fort enracinement de façon à : i) stabiliser mécaniquement le substrat, ii) favoriser une perméabilité optimale et iii) permettre à la matière organique de se « régénérer » au fil du temps de façon à garantir la passivité et l'efficacité du système sur le long terme.
- Une robustesse et une résistance à la sécheresse, les substrats souhaités étant avant tout très drainant (texture sableuse) ceux-ci vont connaître des périodes de sécheresse importantes tant en été qu'en hiver mais aussi sur les structures situées en bout de ligne dans une organisation en série des systèmes épurateurs.
- Un entretien réduit : pas de taille ou de débroussaillage à prévoir.
- Un aspect esthétique et ornemental dans la mesure du possible en toute saison.
- Il est important de noter que la sélection des plantes ne favorise pas en soit l'élimination des polluants, il ne s'agit pas de plantes phyto-accumulatrices ou phyto-stabilisatrices. Elles ont le rôle de maintenir et d'entretenir le substrat épurateur au cours du temps.
- Dans le cadre d'une démonstration et d'une enquête d'opinion auprès de citoyens genevois (quartier de Plainpalais), une tour a été développée par l'ECAL sur laquelle des espèces ornementales ont été implantées : *Rubus tricolor*, *Ceratostigma*, *Aceana microphyllum*, *Waldstenia ternata* et *Sedum katchaticum*. Les objectifs de cette enquête (réalisée par la HEIG-VD) étaient : de sonder l'état des connaissances des passants sur la qualité et l'épuration des eaux de chaussée et le degré d'appréciation des structures développées par l'ECAL en acier inoxydable et en bois et végétalisées par l'hepia.

Résultats obtenus

- 15 espèces végétales ont été testées sur les structures implantées à Perolles : *Aster alpinus*, *Briza media*, *Bromus sterilis*, *Carex morowii*, *Carex sylvatica*, *Deschampia cespitosa*, *Dianthus gratianopolitanus*, *Geranium sanguineum*, *Koaleria glauca*, *Liriope muscarii*, *Luzula silvatica*, *Luzula pilosa*, *Millium effusum*, *Sedum kamtchaticum*, *Tradescantia sp.*
- Les résultats sont variables d'une espèce à l'autre et présentés dans le rapport concernant Banceau. Les résultats sont évalués selon la qualité de la végétation (couverture, développement et floraison) après 2 années *in situ*. L'aspect esthétique des structures est très variable en particulier la présence de fleurs est un plus non négligeable dans l'appréciation du système par les passants. Sur les 15 espèces implantées : 2 ont totalement disparu, 3 ne se développent pratiquement pas, 2 se développent difficilement compte tenu des conditions de sécheresse à leur niveau et enfin 8 sont des succès du point de vue de la colonisation et/ou de leur aspect esthétique. D'autres espèces ont été ré-implantées en 2015 mais les résultats concernant leur reprise et leur résistance aux conditions de terrain ne sont pas encore disponibles.
- L'enquête d'opinion a révélé que : 1- la population est très peu informée sur la qualité des eaux de ruissellement des chaussées, 2- la structure (bois ou acier inoxydable – cf. Figure 6) et la végétation ont été très appréciées. Par ailleurs, durant la période pendant laquelle la structure était en démonstration (Place de Plainpalais à Genève), aucune dégradation n'a été commise sur la structure.



Figure 6 : Structure de démonstration sur la Place de Plainpalais (Genève – novembre 2014)

B.2 Délivrables

Délivrables	Réalisations
Critères d'acceptation des biochars pour le développement de substrats végétalisés épurateurs	Sélection de biochars issus de déchets de bois Préparation par compostage avec fumiers, déchets verts frais et pré-compostés
Compositions optimales des substrats pour une performance maximale (débit, hauteur de colonne pour l'épuration).	Substrats optimaux : Terra Preta à base de biochars compostés, teneur en biochars variant de 30 à 70 %. Sélection des substrats en fonction du régime de pluviométrie (réserve en eau et capacité de traitement des eaux importante). Test de durabilité toujours en cours (tassement très faible après 2 ans de fonctionnement)
Choix de végétalisation et contraintes d'irrigation et de volume de substrat associés.	Identification des espèces sensibles à la sécheresse par rapport au dispositif de Pérolles (WP5) Sélection d'une végétation robuste et/ou ornementale en fonction de la situation du dispositif de traitement (en ville avec option paysagère forte ou inaccessible) Dimensionnement en fonction du volume d'eau à épurer (WP5) plus qu'en fonction des besoins en eau des végétaux
Publication scientifique sur les performances et la durabilité du substrat.	Communication congrès international (Boivin et al., 2013) Publications en cours de préparation sur la capacité d'épuration des substrats à base de biochars (Guiné and Boivin, 2016)

C. Conclusions

C.1 Conclusions scientifiques

Les résultats obtenus dans le cadre de ces différents WP ont permis d'évaluer et de mettre au point de nouveaux substrats épurateurs et durables préservant à la fois les ressources en eau de par leur fonction épuratrice et les ressources en sol de par leur constitution. Ces substrats épurateurs ont également été testés dans le cadre du traitement de pollutions organiques issues des exploitations agricoles et des eaux de ruissellement de parcelles agricoles traitées. La capacité d'épuration des biochars est très intéressante et le développement de la filière est attendu.

L'évaluation *in situ* des performances des différents substrats est présentée dans le rapport concernant les résultats du système expérimental Banceau.

Deux publications seront écrites à l'issu de ces travaux, la première concernant la caractérisation physique des substrats Guiné and Boivin, 2016 sera soumise au courant du mois de mai 2016 à la revue *Agronomy for Sustainable Development*.

C.2 Conclusions administratives

Hepia a fourni les infrastructures pour la mise en place des essais en laboratoire et a mis à disposition le matériel pour la réalisation des substrats et leurs caractérisations physique et hydrodynamique.

La haute école du paysage de l'ingénierie et de l'architecture a engagé sur le projet les compétences de Véronique Guiné (adjointe scientifique) pour gérer et conduire le projet sur le site de Lullier ; Pascal Boivin, (professeur) pour guider les choix stratégiques et participer aux séances de pilotage du projet ; Antoine Sauty et Saskia Leopizzi (assistants HES) pour assister et réaliser de nombreuses expérimentations tant sur le site de Lullier qu'à Péroilles.

C.3 Conclusions pédagogiques

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet ont été présentés dans différents cours destinés aux étudiants hepia-Agronomie (Micropolluants Agricoles), hepia-Génie Civil (Environnement construit) et aux étudiants en formation continue suivant le CAS Nature en Ville (hepia) ainsi que la formation VSA Spécialiste de l'évacuation des eaux de bien-fonds.

D. Références bibliographiques

AFNOR – 2012 - Amendements du sol et supports de culture - Détermination des propriétés physiques - Masse volumique apparente sèche, volume d'air, volume d'eau, valeur de rétraction et porosité totale – 22p. - *NF EN 13041*

Boivin, P. Garnier, P. and Tessier, D. – 2004 - Relationship between Clay Content, Clay Type, and Shrinkage Properties of Soil Samples - *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1145–1153 - DOI: 10.2136/sssaj2004.1145

Boivin, P. Guiné, V. and Sauty, A. – 2013 – Biochar based technosols: evaluation of their potential for different depuration applications - International Conference Biochars, Composts, and Digestates – October 17 to 20 - Bari (Italy)

Brown, J., Ackerman, D., and Stein, E. (2012). "Continuous In Situ Characterization of Particulate Sizes in Urban Stormwater: Method Testing and Refinement." *J. Environ. Eng.*, 138(6), 673–679.

Chebbo, G. (1992). Solides des rejets pluviaux urbains Caractérisation et traitabilité, Ecole des ponts et chaussées. PhD, 488p.

Guiné, V. and Boivin, P. – 2016 - Biochar based substrates for pesticides contaminated effluent treatment in new biobeds – *J. Agro. Sust. Dev.* – *In preparation*

Navia, R. Hafner, G. Raber, G. Lorber, K.E. Schöffmann, E. and Vortisch W. – 2005 - The use of volcanic soil as mineral landfill liner - I. Physicochemical characterization and comparison with zeolites - *Waste Manag Res* 23: 249 - DOI: 10.1177/0734242X05055476

VSA (Association suisse des professionnels de la protection des eaux) – 2002 - Evacuation des eaux pluviales. Directive sur l'infiltration, la rétention et l'évacuation des eaux pluviales dans les agglomérations. – 106 p.

Annexe 3

WP 4 :

Design et dimensionnement des structures verticales végétalisées.

Luc bergeron, professeur écal

Laurent Soldini, professeur écal

3.1 Cahier d'idées

Projet SMACC
Cahier d'idées
30 septembre 2013

é c a l

Table des matières

1. Avant-propos et cahier des charges pour l'ECAL
2. Les matériaux
3. La cassette
 - prototype actuel
 - principe de fonctionnement
 - typologies formelles
 - parallélépipédique
 - cintrée
 - cylindrique
 - sphérique
 - avec fonctions annexes
4. Propositions schématiques d'implantation
5. Propositions détaillées
 - A - Cassette autoporteuse parallélépipédique en béton
 - B - Cassette autoporteuse cintrée en béton
 - C - Cassette parallélépipédique en métal sur structure métallique
 - D - Cassette parallélépipédique en bois sur structure en bois
 - E - Cassette cylindrique verticale en métal, bois et béton
 - F - Cassette cylindrique horizontale en métal
 - G - Cassette sphérique en treillis métallique

1. Avant-propos et cahier des charges pour l'ECAL

Avant-propos

Smart Clean City (Smacc) est un projet Call 2011 de la HES-SO dirigé par Fabienne Favre-Boivin de l'EIA-Fr. Les partenaires sont l'Hepia, la HES-SO Vs, la Heig-VD et l'ECAL. Le projet a pour objectif de proposer un traitement révolutionnaire des eaux urbaines de ruissellement par des bio-charbons issus de déchets végétaux.

L'ECAL a pour rôle de participer à la conception des structures qui abriteront le substrat filtrant. Celles-ci seront agrémentées de plantes et devront répondre à des critères esthétiques, fonctionnels et ergonomiques. Le cahier des charges ci-dessous a été établi par l'ensemble des partenaires.

L'ECAL participera également au suivi de la fabrication des prototypes et à la valorisation de l'ensemble du projet.

Cahier des charges pour l'ECAL

Sites d'implantation

- Contexte urbain géré par la Commune.
- Entre la route et le trottoir, sous un viaduc, autour d'une pile de pont, sur une place publique, dans un jardin public, lié à un bâtiment,...
- Le dispositif pourra avoir une fonction anti-bruit mais ce n'est pas un impératif (nice to have).

Concept / structure

- Le dispositif sera conçu sous forme de cassettes contenant le substrat et le végétal. Ces éléments pourront être indépendants voire autoportants. Selon d'autres configurations, ces cassettes pourront être disposées dans une structure portante.
- Le système est intéressant s'il est simple et s'il demande peu d'entretien.
- La modularité du système permet un maximum de configurations.
- Durée de vie sans limite.
- Accès le plus aisé possible pour le changement du substrat ou du végétal et pour le nettoyage et l'entretien du système d'arrosage.
- Tenir compte de la possible déprédation par la population.
- Typologie :
 - Discrétion ou exubérance selon les sites
 - Recouvrement de façade ou élément indépendant > mur, tour, sculpture,...
- Matériaux à utiliser :
 - Plastique : à priori pas retenu car fragile aux conditions atmosphériques extérieures (par exemple rayons UV).
 - Métal : attention au zingage qui risque de laisser des traces dans l'eau.
 - Bois : attention au fongicides et autres produits utilisés.
 - Béton ou céramique : possibilité de mouler, intéressant pour production en grandes séries.

Dimensions des cassettes

- Hauteur 30cm
- Profondeur 30cm si contre un mur et végétalisé que d'un côté, 50cm si végétalisé des deux côtés.
- Longueur 150cm (cote actuelle maximale qui fonctionne avec les transpalettes).

Le substrat

- Durée de vie sans limite, c'est en tous cas l'objectif.
- Le volume de substrat nécessaire va dépendre des quantités d'eau à traiter. Données à fournir pour une route communale d'une largeur d'env. 9m.

Le substrat (suite)

- Le substrat peut filtrer env. 50 à 100 l/h par m² en quelque 20 minutes.
- Poids : imbibé = env. 1,6kg/dm³ (à valider).
- Le substrat est actuellement maintenu par un caillebotis et de la jute. Celle-ci se détériore et les racines du végétal prennent le relais pour maintenir le substrat dans la structure.

Le végétal

- 2 possibilités:
 - Ornemental demandant un peu d'entretien et un arrosage en cas de sécheresse. Plantes semées ou plantées (mottes standards d'environ 3 ou 5cm de côté).
 - Non ornemental, sans entretien.
- Dans les deux cas, plantes vivaces et pérennes de préférence. Exposition normale (soleil et ombre).

Eau

- Eaux de ruissellement des routes (beaucoup plus intéressantes que celles des toits)
- Arrosage privilégié sans pompe, de manière gravitaire. Dans certains cas, une petite pompe pourrait permettre un arrosage de petit débit (alimenté par exemple par un panneau solaire). Evaluer les coûts (installation + énergie) en fonction des situations.
- Générer un système qui demande le moins d'entretien possible. Cela dépend aussi du lieu et qui en a la responsabilité. La voirie ne fera aucun entretien ou, éventuellement, 1x/an alors que les parcs et jardins seront disposés à faire plusieurs entretiens, peut-être jusqu'à 1x/semaine.
- Amenée d'eau équipée en amont d'une grille filtrante et d'un Bypass pour gérer le trop plein.
- Amenée d'eau sous forme de canal ou tuyau percé déversant tout le long de la cassette.
- Chaque cassette est alimentée indépendamment en eau.
- L'eau filtrée doit être collectée pour l'amener dans les égouts d'eaux claires mais surtout pour pouvoir la prélever (tests de qualité).

Période hivernale

- Le gel pourra occasionner une période de non fonctionnement mais ce n'est pas grave.
- Le sel, fortement dilué, ne pose normalement pas de soucis ni pour le substrat, ni pour le végétal.

2. Les matériaux

Matériaux envisagés



Bois



Béton



Métal



Plastique



Verre



Céramique

Bois

Uniquement Accoya, voir page suivante



+	-
recyclable	fragilité à la déprédation (gravure, feu,...)
essences (couleurs) à choix?	
états de surface à choix	
durabilité dans le temps	
anti-mousse, anti-fongicide, anti-insecte	

Coûts

Les coûts ne sont pas connus et sans doute très fluctuants selon les volumes.



Suite à une visite à la Haute école spécialisée bernoise (architecture, bois et génie civil) sise à Bienne, il s'avère qu'il n'existe qu'un seul procédé qui soit validé tant technologiquement qu'industriellement.

Créé à base de bois issu de sources durables, le bois Accoya® offre de meilleures performances que les bois massifs en termes de durabilité, d'esthétique et de stabilité.

C'est une société allemande qui a développé ce procédé qui fait subir au bois un traitement thermique et d'acétylation. Ce n'est pas un adjuvant chimique mais un traitement qui influence la structure même du bois, celui-ci contenant naturellement de l'acide acétique. Il a pour effet de stabiliser le bois d'une manière durable (25 ans).

www.accoya.com/francais

Béton



+	-
moulabilité, détails	poids
faibles coûts (production en série)	fragilité (gel?)
états de surface à choix	apparition de mousses
durabilité dans le temps	cycle de production lent (28 jours)
insert, tubes, trous	teintes vives peu évidentes

Finition

Les pièces en béton moulé devront probablement être vernies, permettant ainsi d'être moins accueillantes pour les mousses qui pourraient rapidement s'installer. Attention à utiliser un vernis eco-compatible avec le projet.

Béton > finitions



Quelques images permettant d'apprécier le mode de fabrication par moulage, les couleurs teintées dans la masse, la qualité des détails de surface et la finesse qu'il est possible d'obtenir.

Adresses de références :

form|c à Genève > www.formc.ch

Béton Manufactur by Creabéton Matériaux SA à Einigen > www.betonmanufactur.ch

Métal
Acier ou aluminium

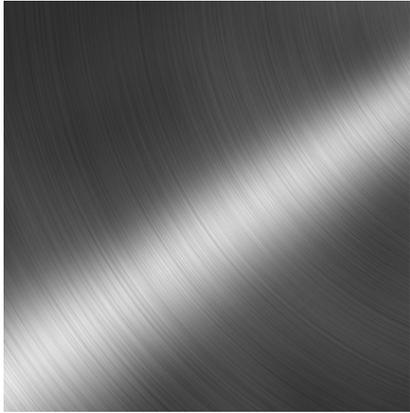
Métal

Acier ou aluminium



+	-
recyclable	poids
faibles coûts	connotation industrielle
états de surface à choix	
durabilité dans le temps	

Métal > finitions



Inox



Zinguage



Corten



Peinture



Eloxage

Métal > remarques

L'acier inoxydable est d'un coût un peu plus élevé qu'un acier normal mais il permet une utilisation durable sans traitement de surface supplémentaire. Il a une connotation industrielle.

Le zinguage est un traitement de surface efficace et bon marché pour l'acier utilisé en extérieur. Aspect marbré.
Attention: il est possible que les eaux de ruissellement enlèvent des particules de zinc, à vérifier.

Le corten est un acier chez lequel on a volontairement provoqué une oxydation de surface. Le procédé est peu onéreux et durable dans le temps. La couleur rouille qui en résulte est évolutive et en fort contraste avec le végétal.
Attention: le corten nécessite une bonne aération et pas d'humidité stagnante. Par ailleurs les eaux de ruissellement entraînent inévitablement la rouille, des particules d'oxyde de fer.

L'acier peut facilement être peint soit de manière standard (séchage à l'air ambiant), soit par thermolaquage, c'est-à-dire avec un passage au four qui stabilise mieux la peinture. Nombre d'ouvrages en plein air sont peints (balustrades, boîtes aux lettres, sculptures,...). Toutes les couleurs sont envisageables.
Attention: La durée de vie n'est pas garantie et sitôt qu'un éclat apparaît, la rouille prend rapidement le relais.

L'éloxage est un procédé de finition possible uniquement sur l'aluminium. C'est un procédé qui permet de stabiliser la surface du métal. La couleur peut être transparente ou colorée, même de couleur vive. Le coût de l'aluminium est légèrement inférieur à celui de l'acier inoxydable mais revient à peu près au même s'il est éloxé.

Plastique



+	-
recyclable	fragilité aux conditions atmosphériques
couleurs à choix	> les UV décolorent et rendent cassant
coûts	

Nous préconisons de ne pas retenir ce matériau.

Verre



+	-
moulabilité, détails	poids
opaque ou transparent	fragilité
recyclable	coûts
durabilité dans le temps	

Nous préconisons de ne pas retenir ce matériau.

Céramique



+	-
moulabilité, détails	poids
recyclable	fragilité
durabilité dans le temps	coûts

Nous préconisons de ne pas retenir ce matériau.

Matériaux retenus



Bois



Béton



Métal

3. La cassette

Prototype actuel



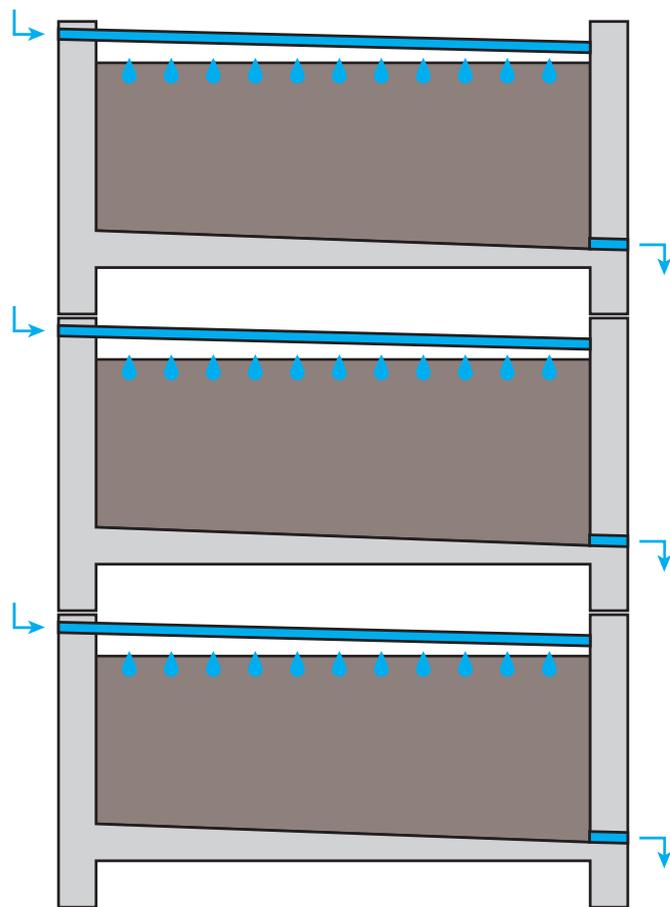
Un prototype fonctionnel est en place à l'hepia à Lully.

Le matériau utilisé est l'acier zingué tant pour les cassettes (avec des caillebotis pour laisser passer le végétal) que pour la structure portante (voir images ci-dessus).

Ce prototype n'a pas d'autre intention que de valider le principe sur un plan fonctionnel. Mais d'un point de vue du design, nous pouvons relever les points suivants:

- Le métal prend visuellement passablement d'importance. L'ensemble se perçoit comme massif, quelque peu sur-dimensionné > Donner la priorité maximale au végétal.
- La hauteur totale est relativement basse, une personne peut aisément intervenir sur le dessus > à réhausser pour éviter les déprédations mais en tenant compte des dispositifs nécessaires pour la mise en place des cassettes (élévateurs, petites grues, ...).
- De larges espaces ont été laissés entre chaque cassette pour la manutention > à réduire au maximum.
- Le système d'amenée d'eau est apparent > à mieux intégrer pour éviter les déprédations.

Principe de fonctionnement



La cassette contient le substrat et un système de distribution et de récupération de l'eau.

L'eau filtrée doit pouvoir être récoltée.

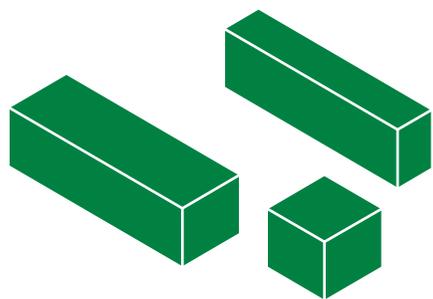
La cassette peut être indépendante ou montée en série.

Si elles sont autoportantes, les cassettes peuvent s'empiler (comme illustré ci-contre).

Sinon, elles sont insérées dans une structure.

Typologies formelles de la cassette

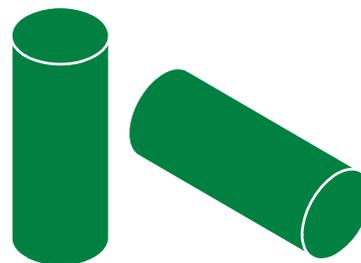
Typologies formelles de la cassette



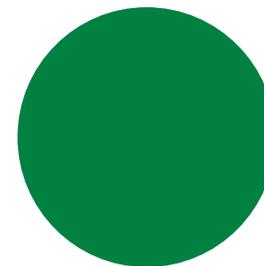
parallélépipédique



cintrée



cylindrique



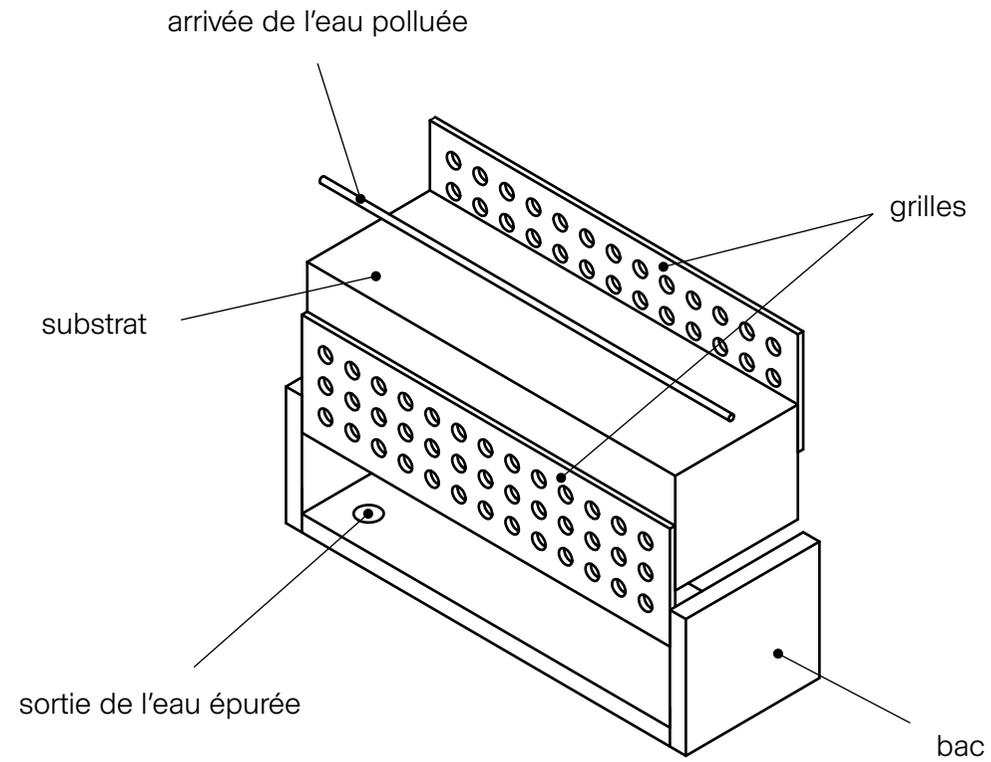
sphérique

Cassette parallélépipédique

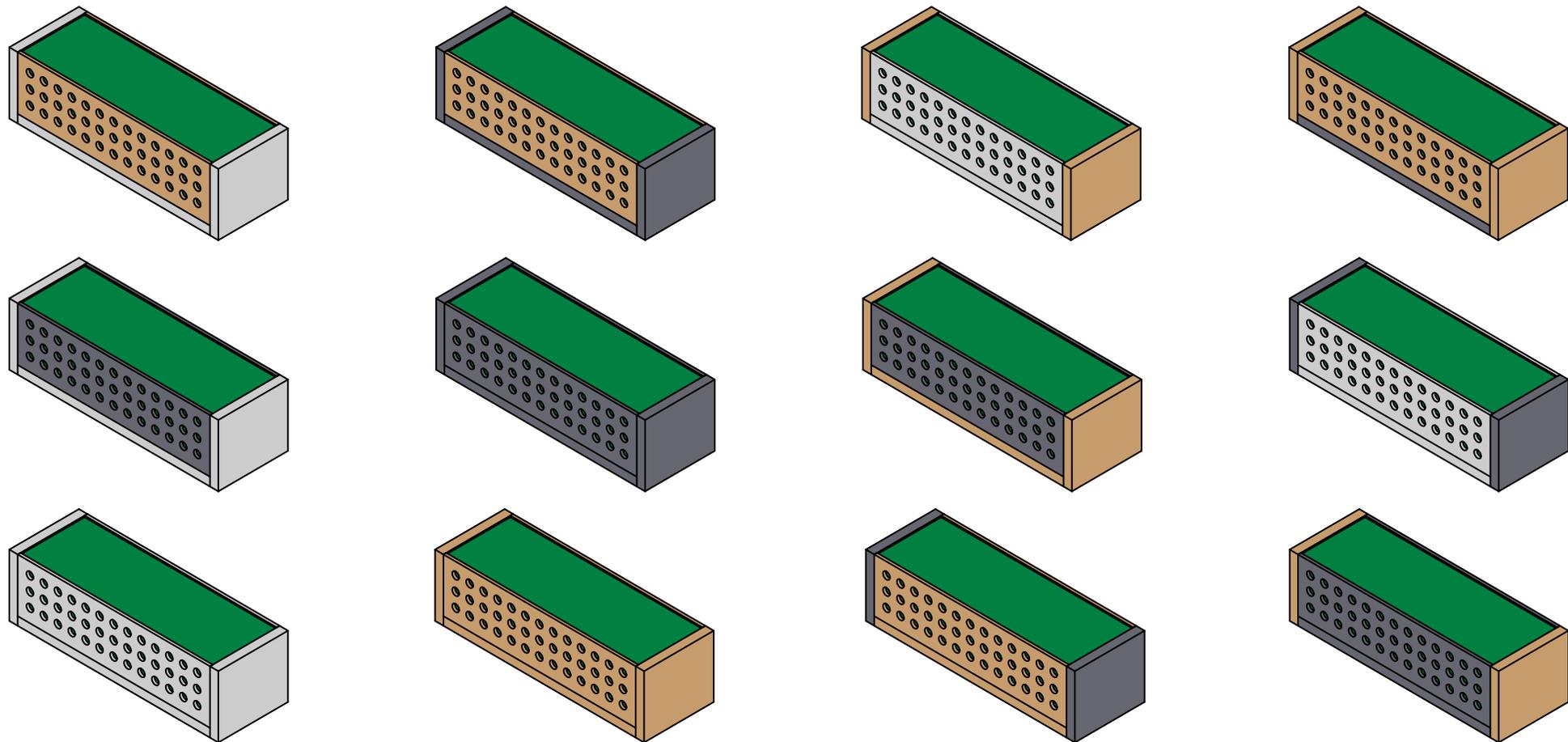
Cassette parallélépipédique



Cassette parallélépipédique

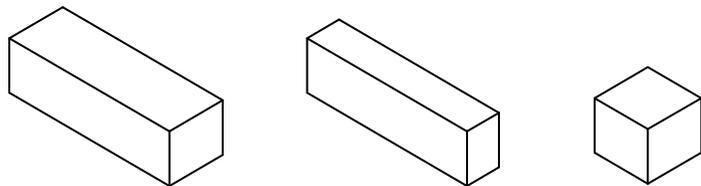


Cassette parallélépipédique

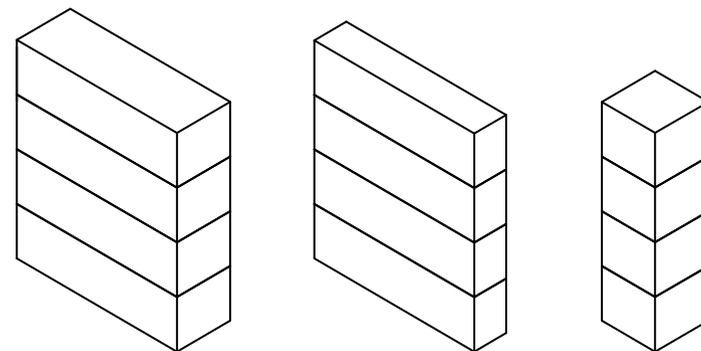


■ béton ■ métal ■ bois ■ substrat / végétal

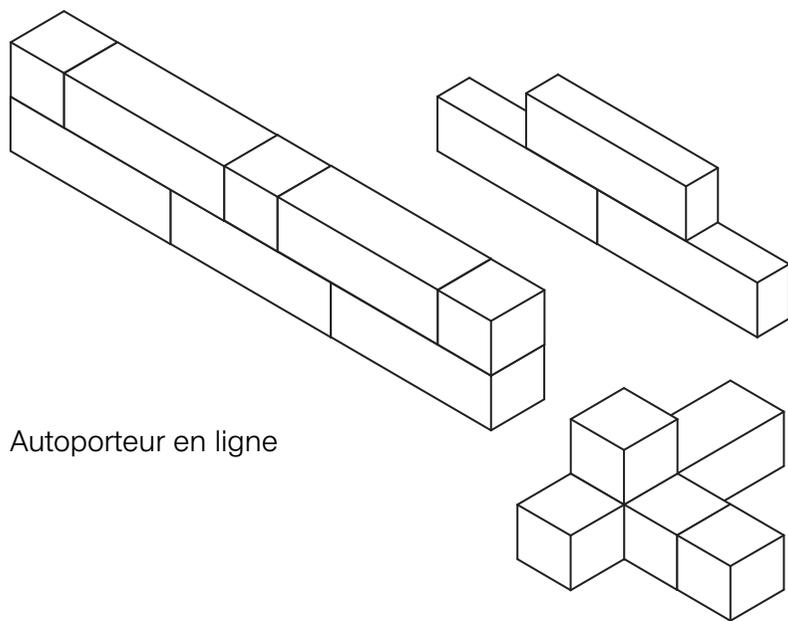
Cassette parallélépipédique



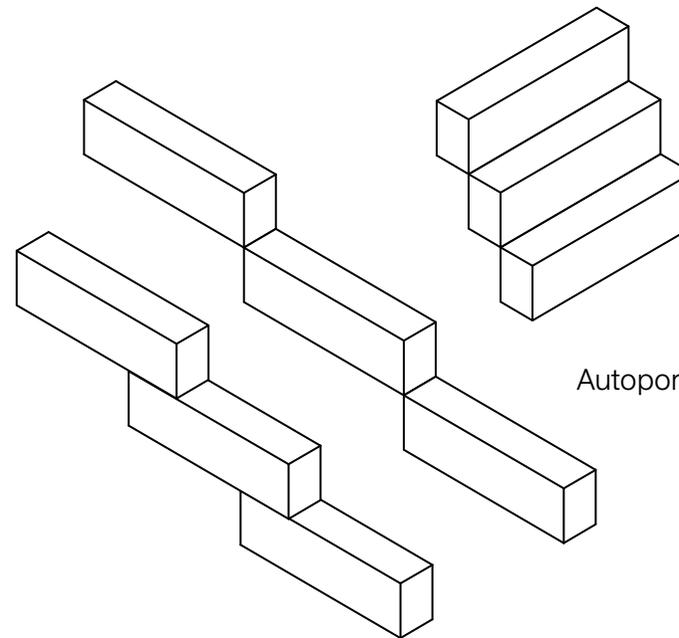
Autoporteur élément unique



Autoporteur superposé

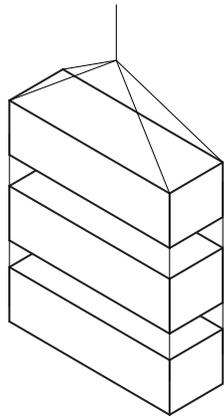
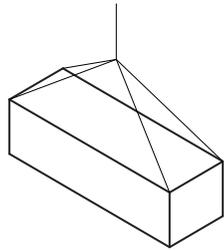


Autoporteur en ligne

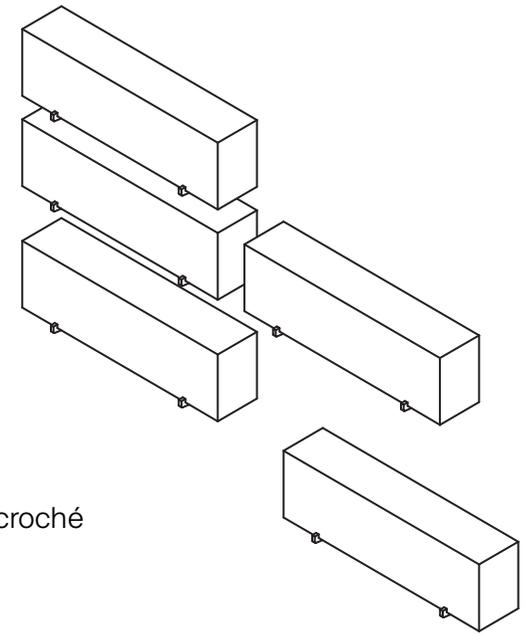
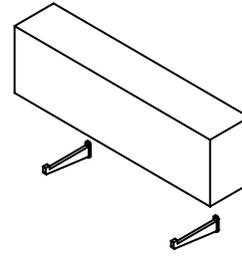


Autoporteur en cascade

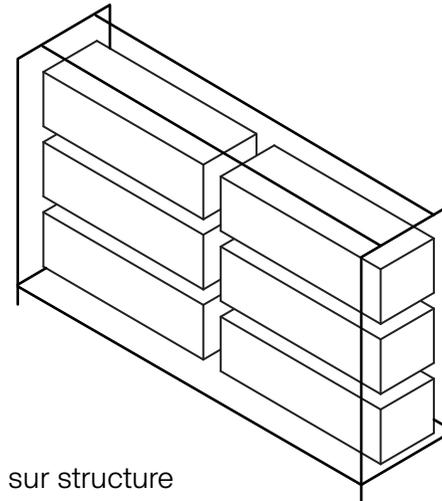
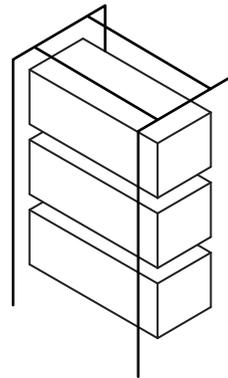
Cassette parallélépipédique



Suspendu



Accroché



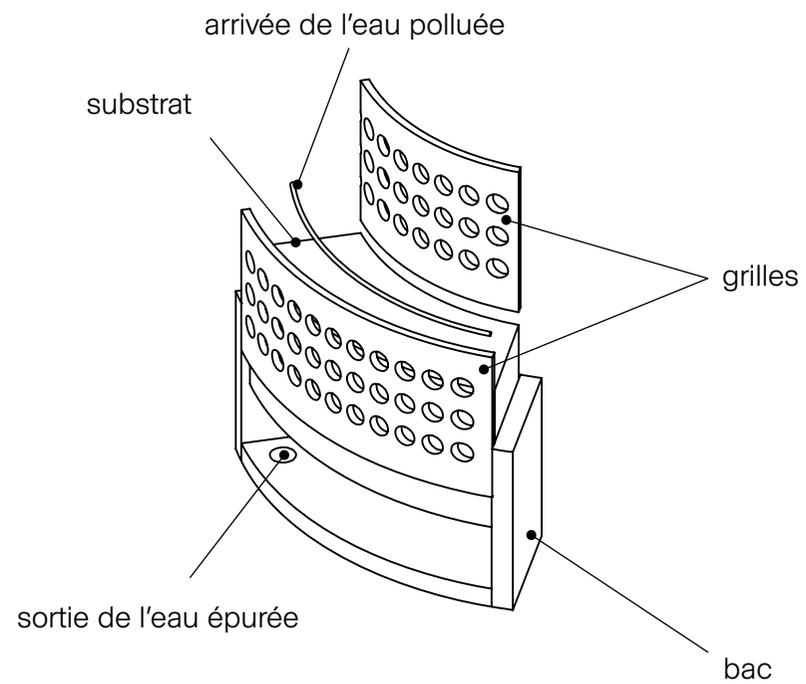
Superposé sur structure

Cassette cintrée

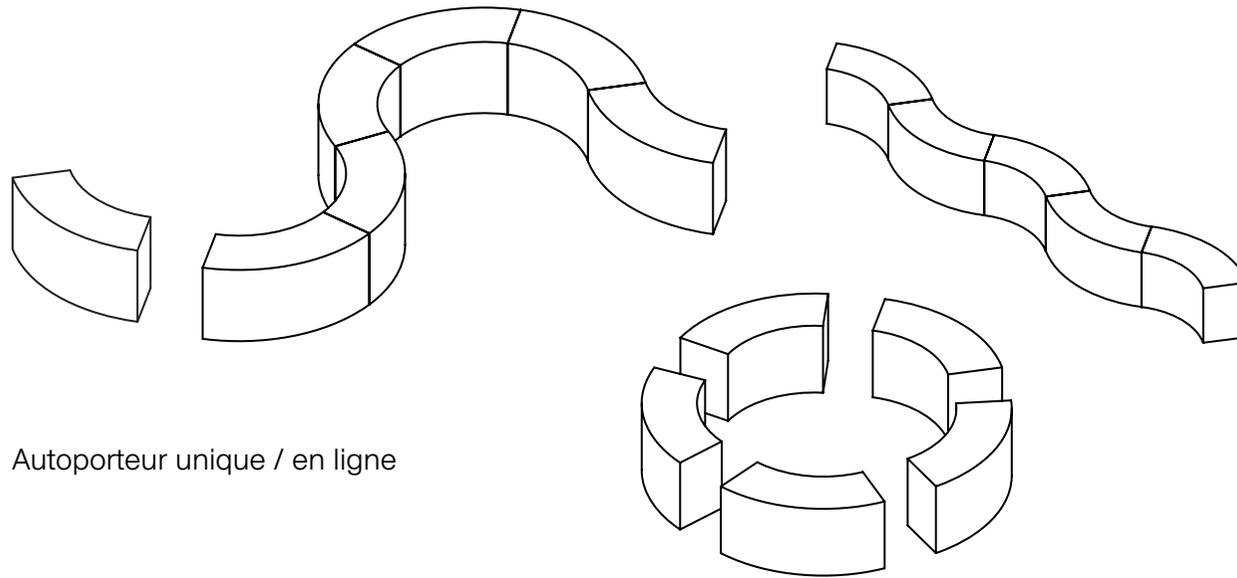
Cassette cintrée



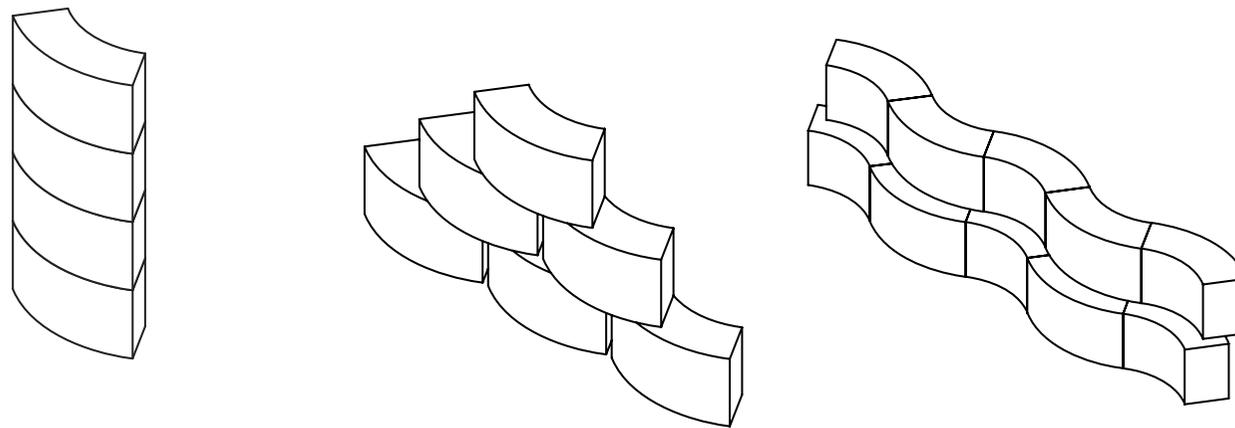
Cassette cintrée



Cassette cintrée

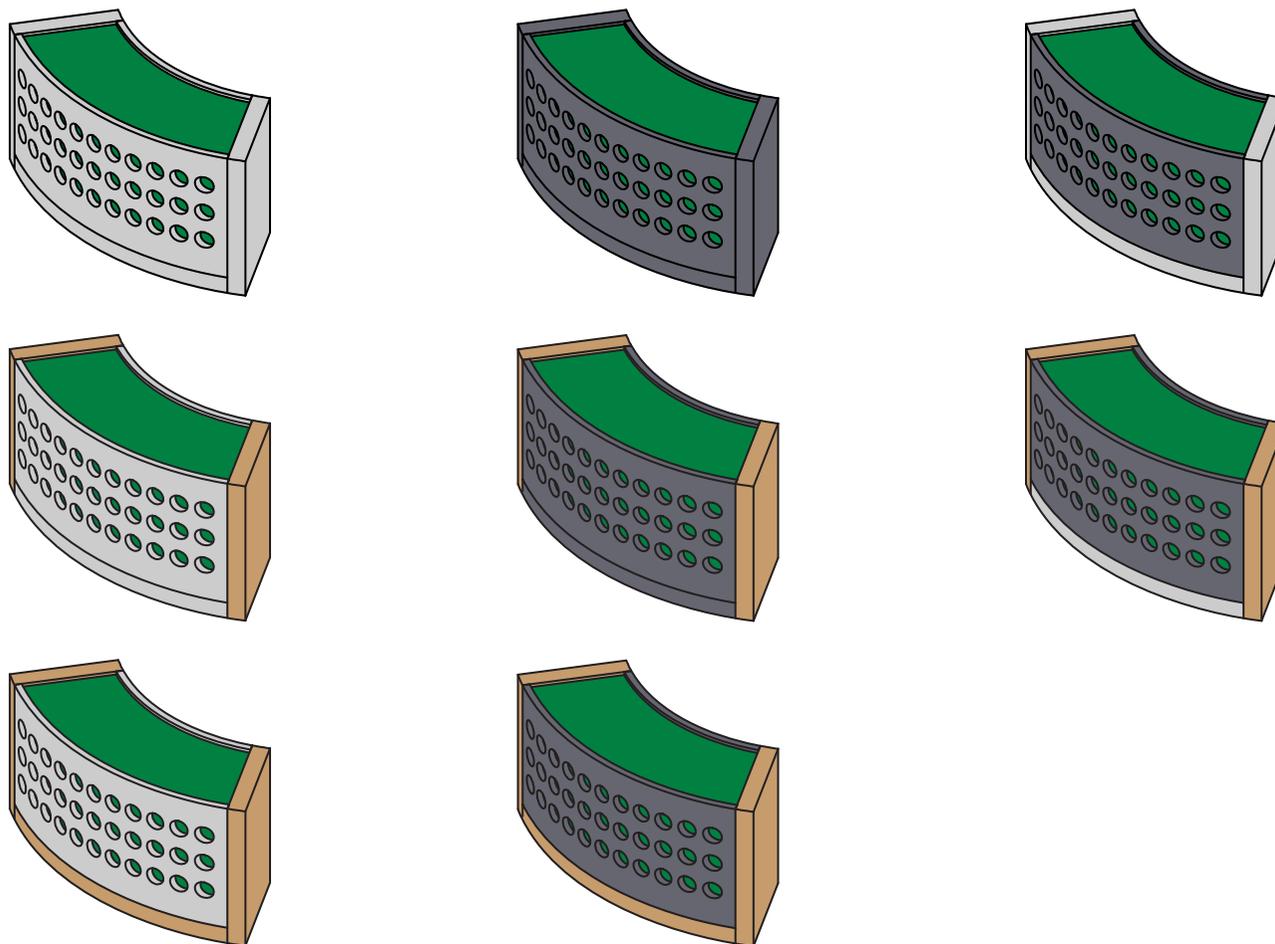


Autoporteur unique / en ligne



Autoporteur superposé

Cassette cintrée



■ béton ■ métal ■ bois ■ substrat / végétal

Cassette cylindrique

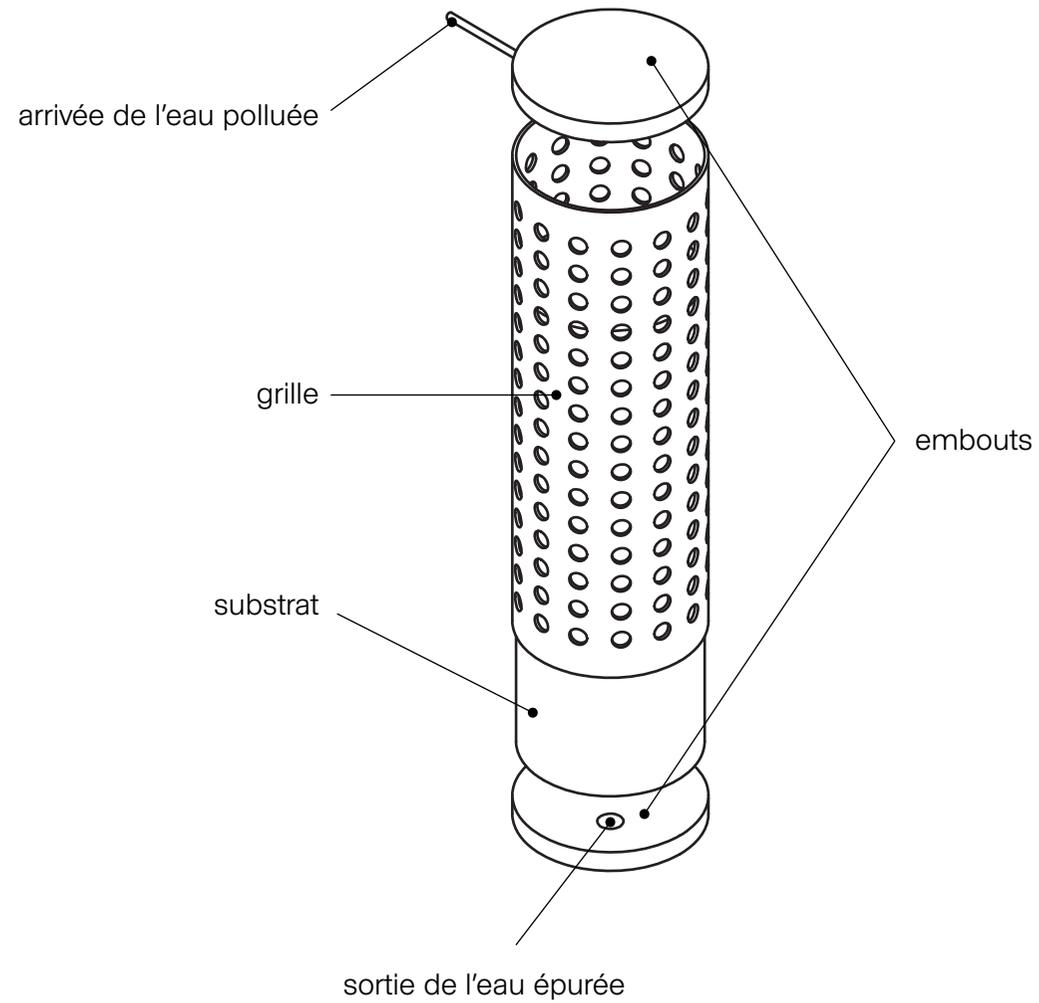
Cassette cylindrique



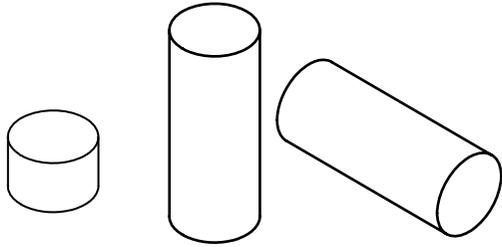
Travail artistique d'Edina Tokodi qui s'adonne à un art éco-urbain dans le seul but de rapprocher les citoyens à la nature. Mousses et gazons sont ses outils pour réaliser des motifs sur les façades urbaines.



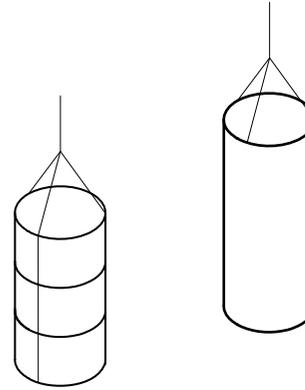
Cassette cylindrique



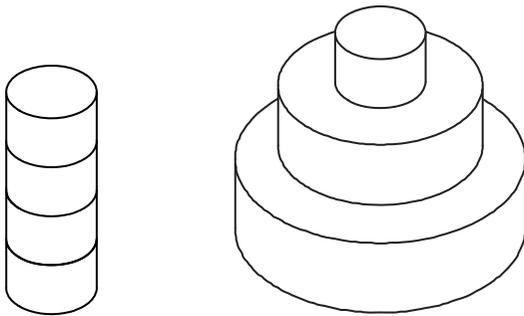
Cassette cylindrique



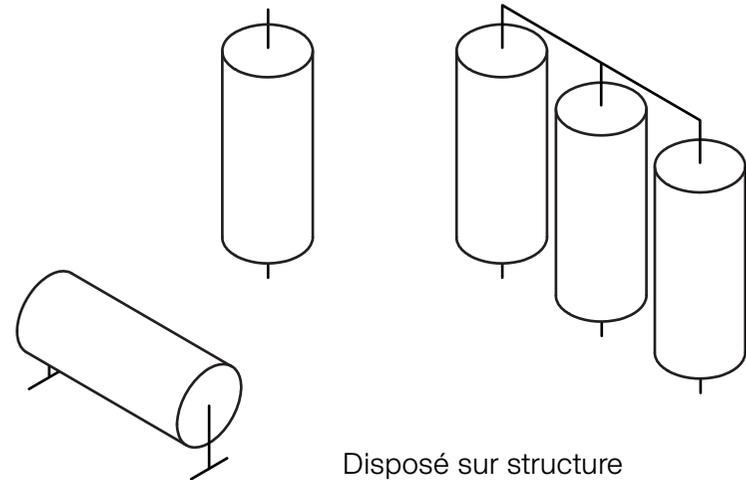
Autoporteur élément unique



Suspendu

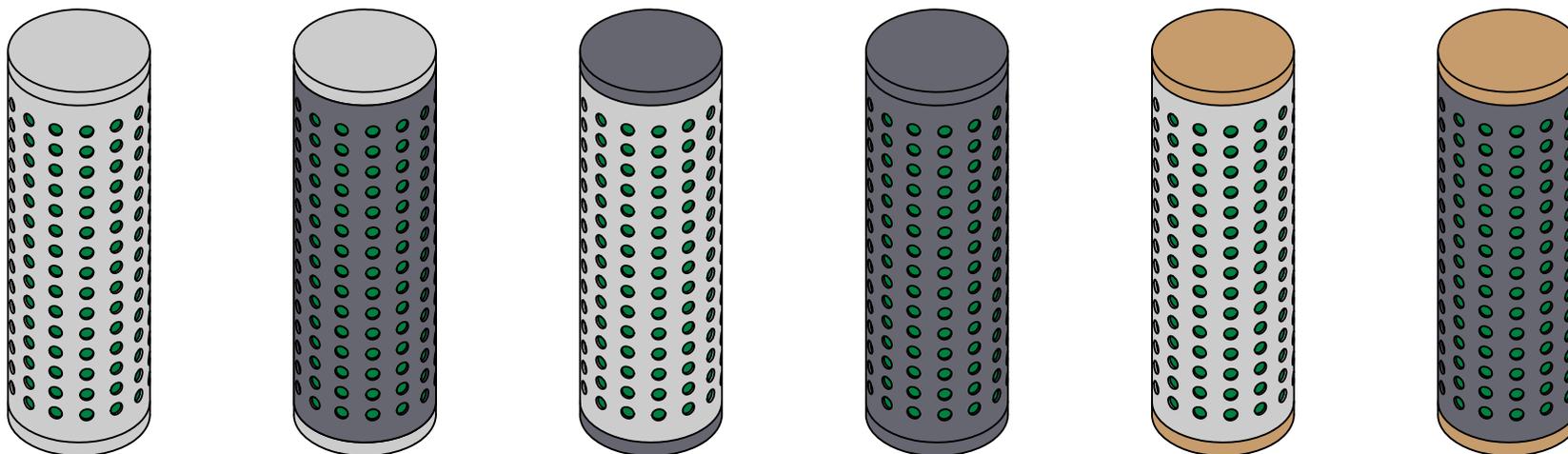


Autoporteur superposé



Disposé sur structure

Cassette cylindrique

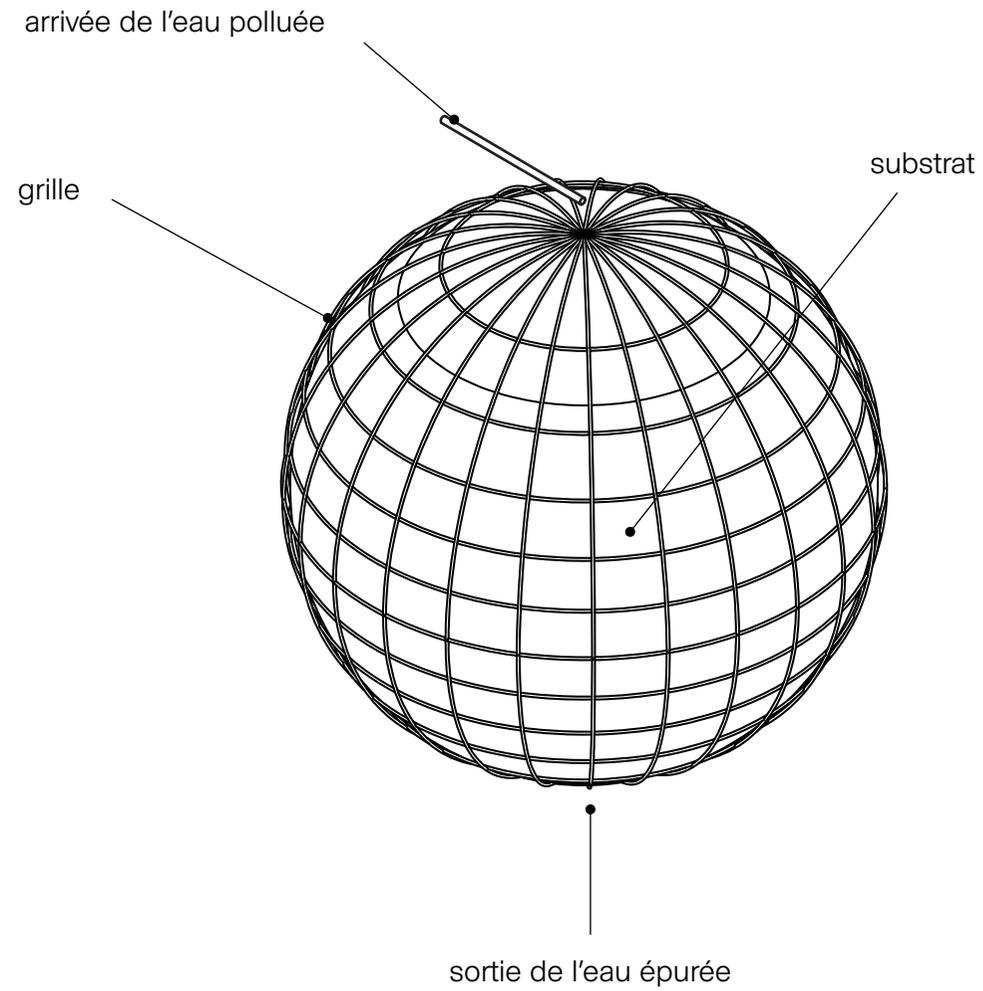


Cassette sphérique

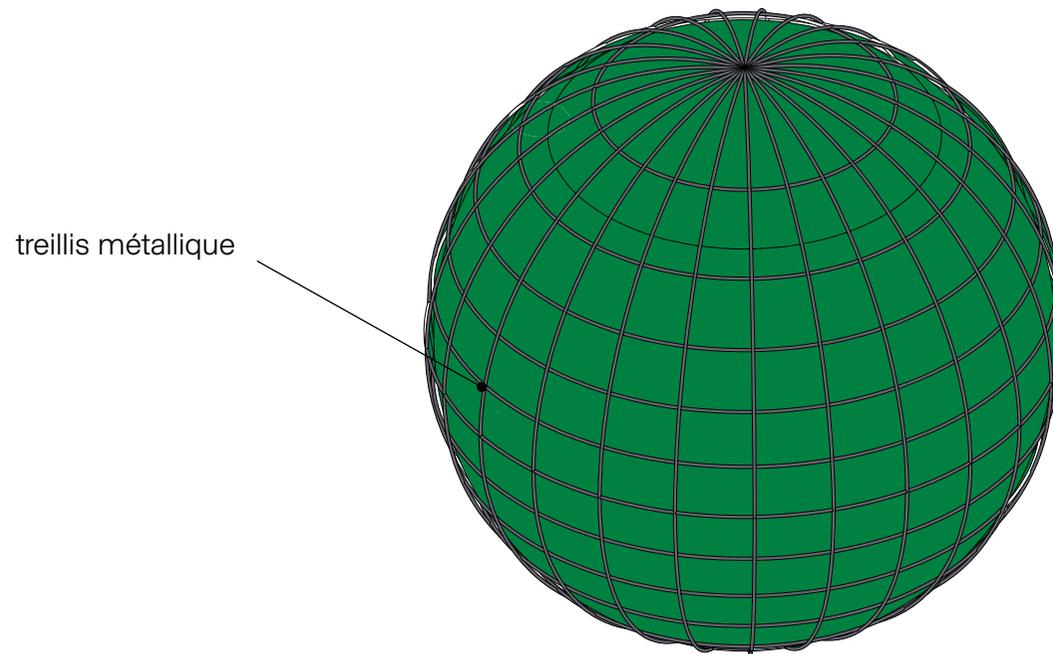
Cassette sphérique



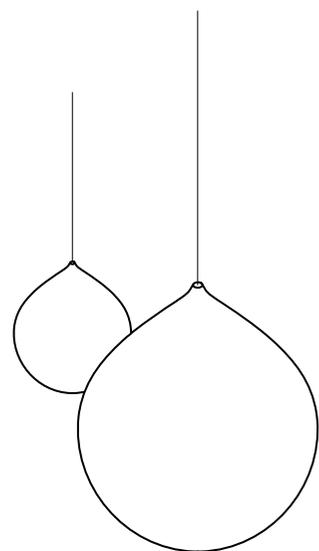
Cassette sphérique



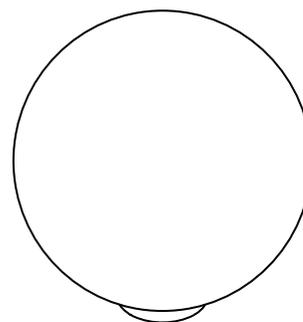
Cassette sphérique



Cassette sphérique



Suspendu



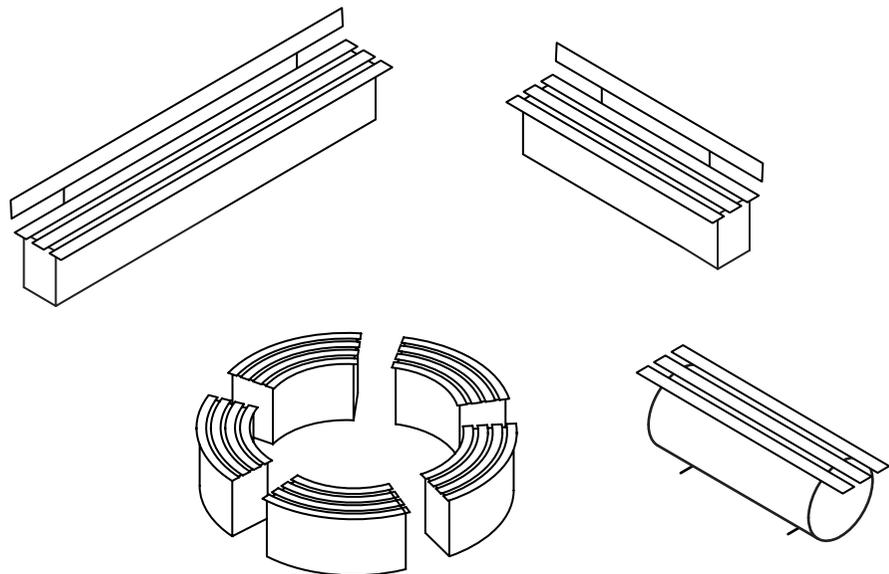
Autoporteur

Cassette avec fonctions annexes

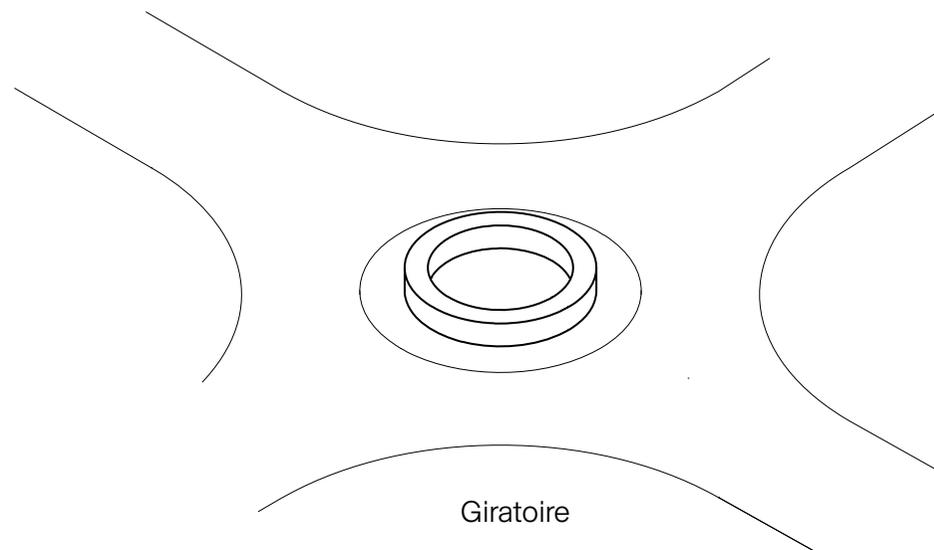
Cassette avec fonctions annexes



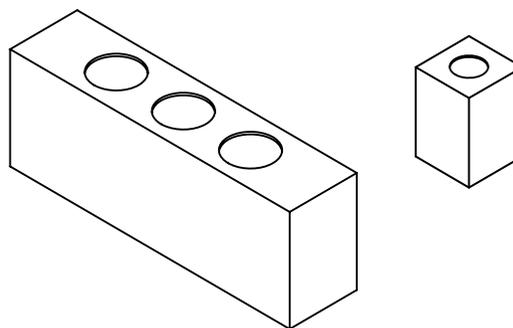
Cassette avec fonctions annexes



Banc public

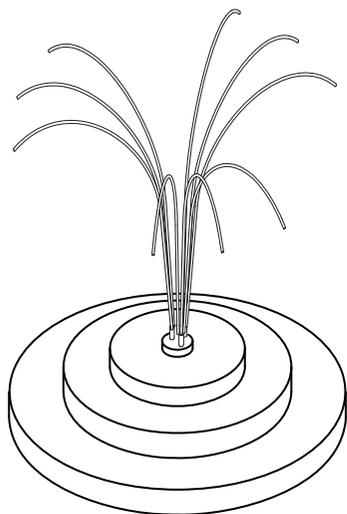


Giratoire

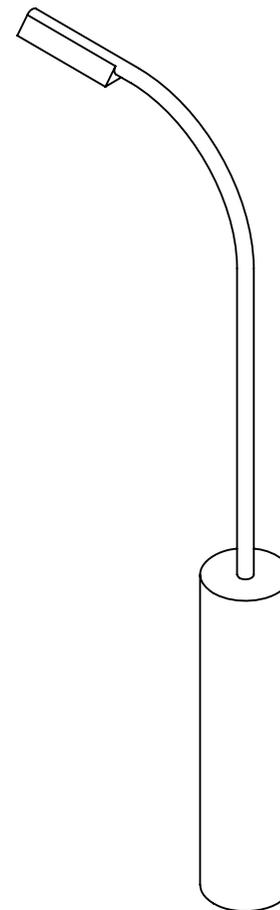
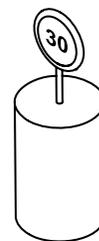


Poubelle / containers

Cassette avec fonctions annexes



Fontaine



Élément de signalisation / lampadaire

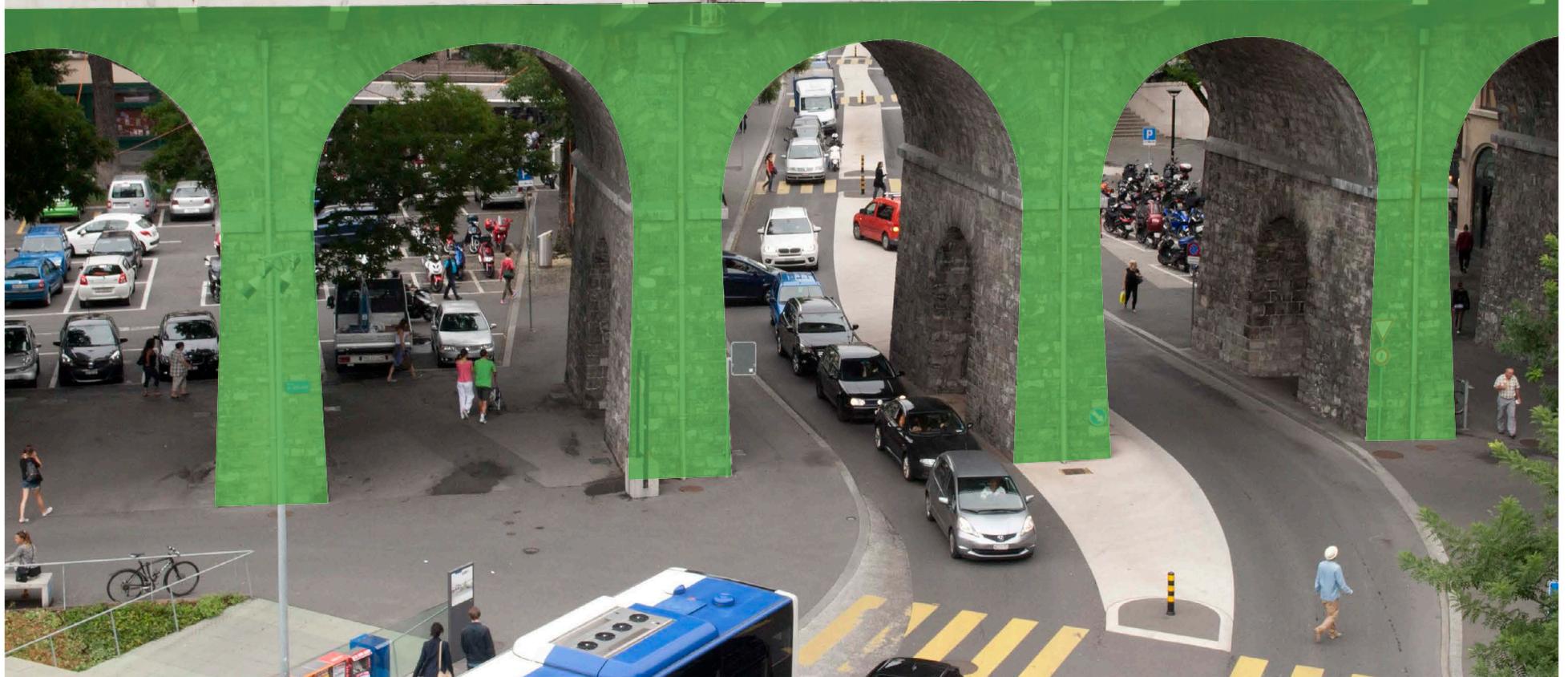
4. Propositions d'implantation













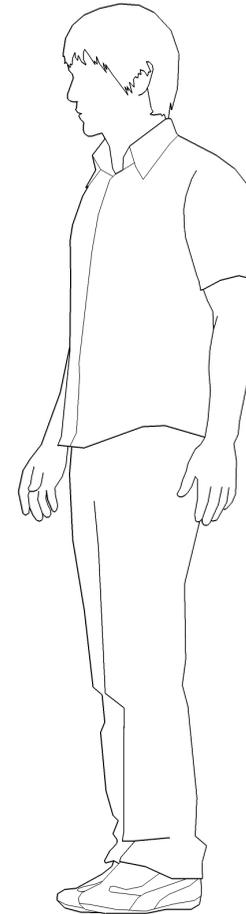
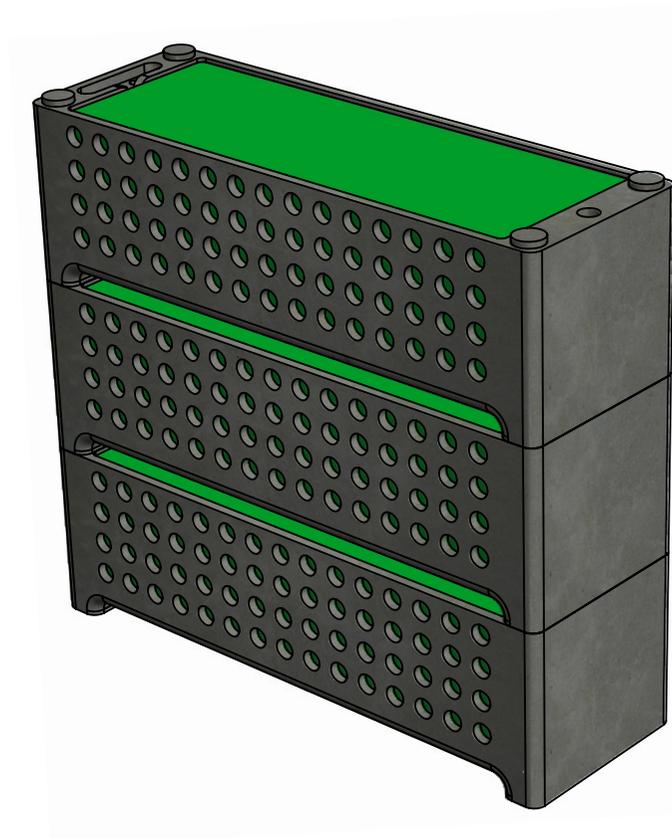


5. Propositions détaillées

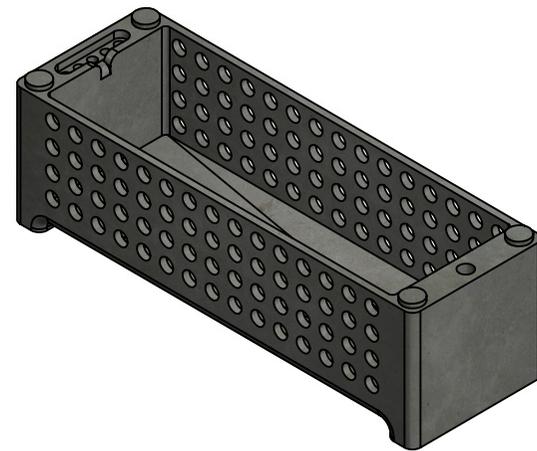
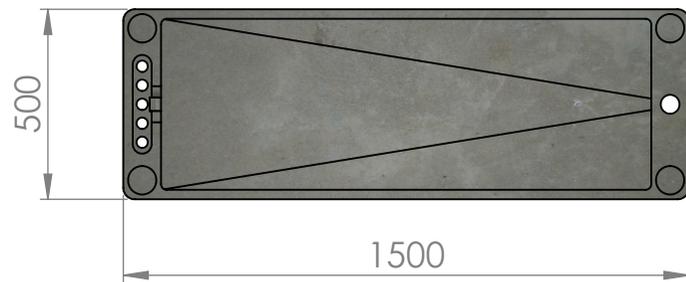
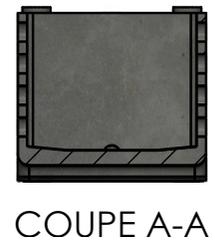
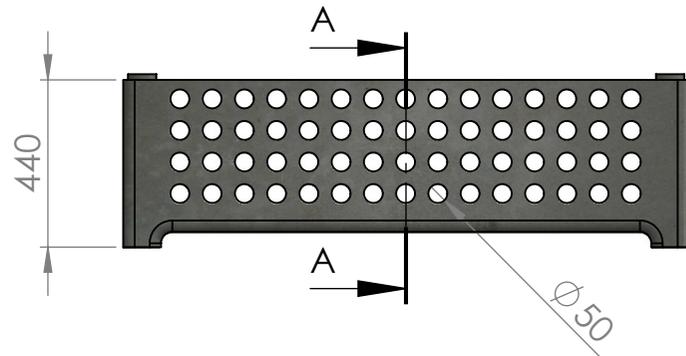
5. Propositions détaillées

- A - Cassette autoporteuse parallélépipédique en béton
- B - Cassette autoporteuse cintrée en béton
- C - Cassette parallélépipédique en métal sur structure métallique
- D - Cassette parallélépipédique en bois sur structure en bois
- E - Cassette cylindrique verticale en métal, bois et béton
- F - Cassette cylindrique horizontale en métal
- G - Cassette sphérique en treillis métallique

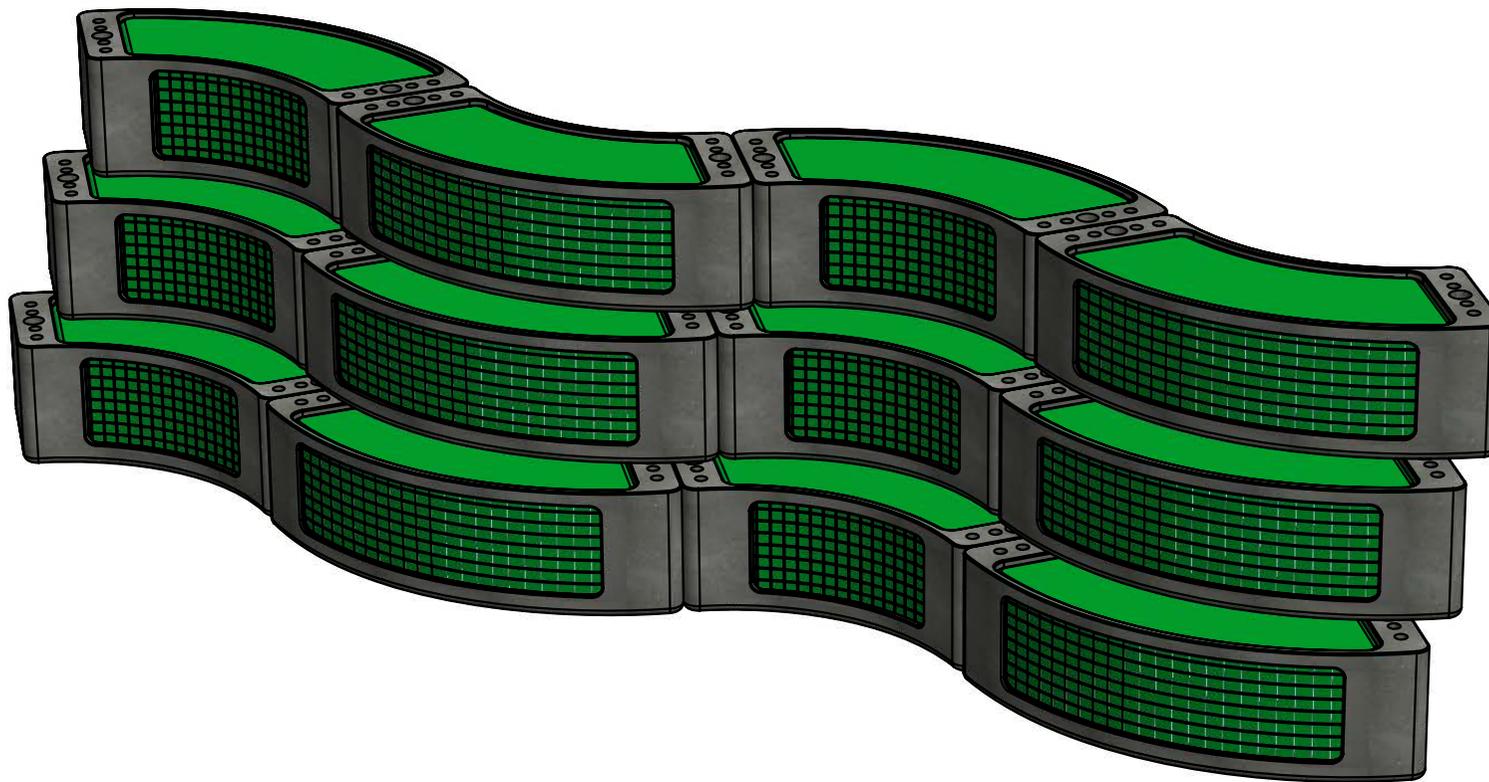
A - Casette autoporteuse parallélépipédique en béton



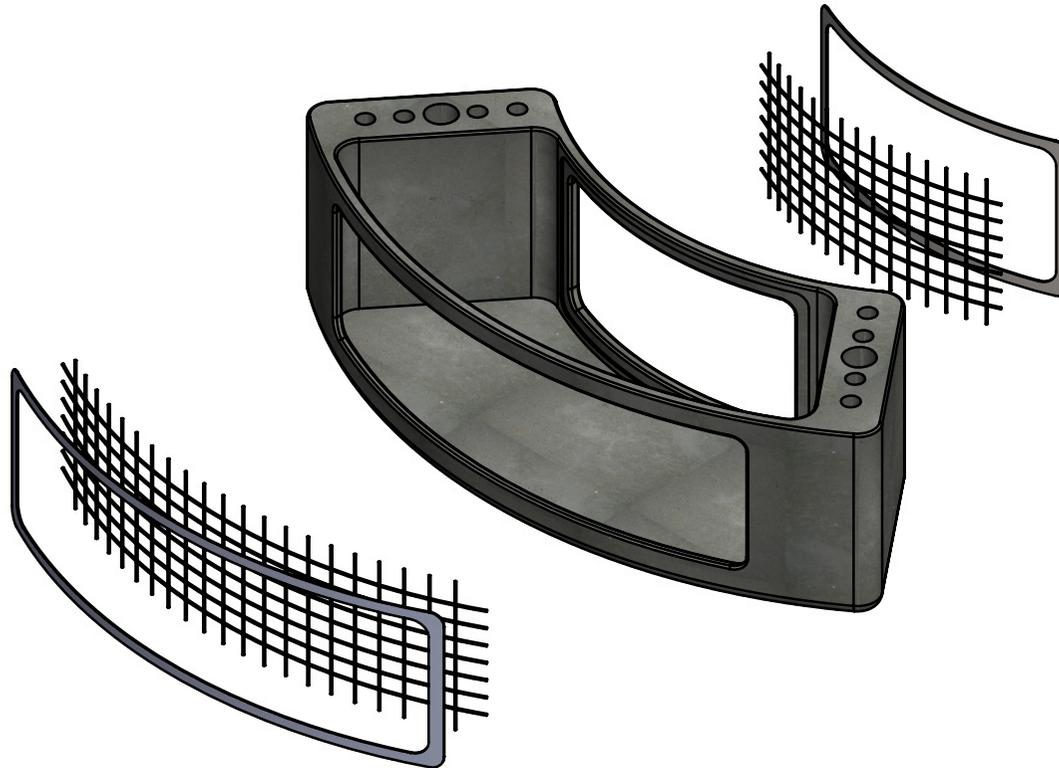
A - Casette autoporteuse parallélépipédique en béton



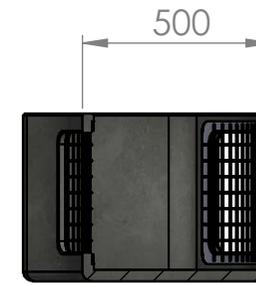
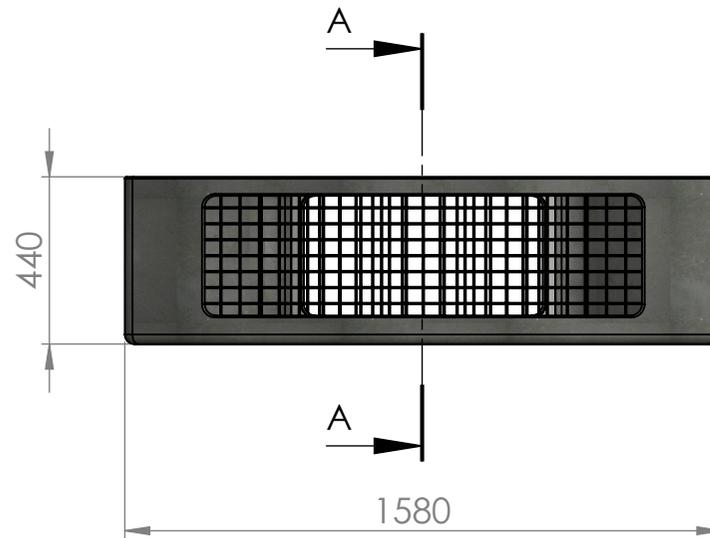
B - Casette autoporteuse cintrée en béton



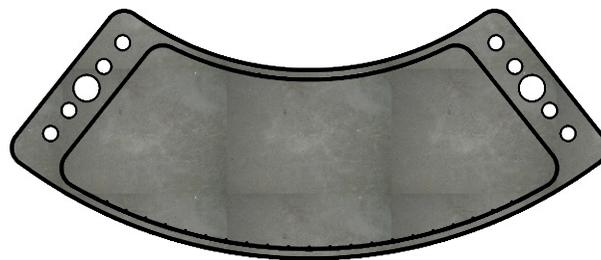
B - Cassette autoporteuse cintrée en béton



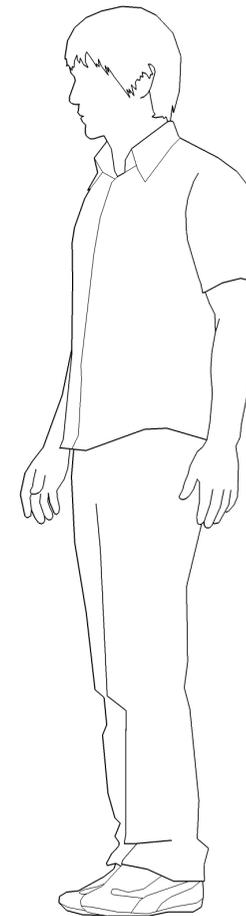
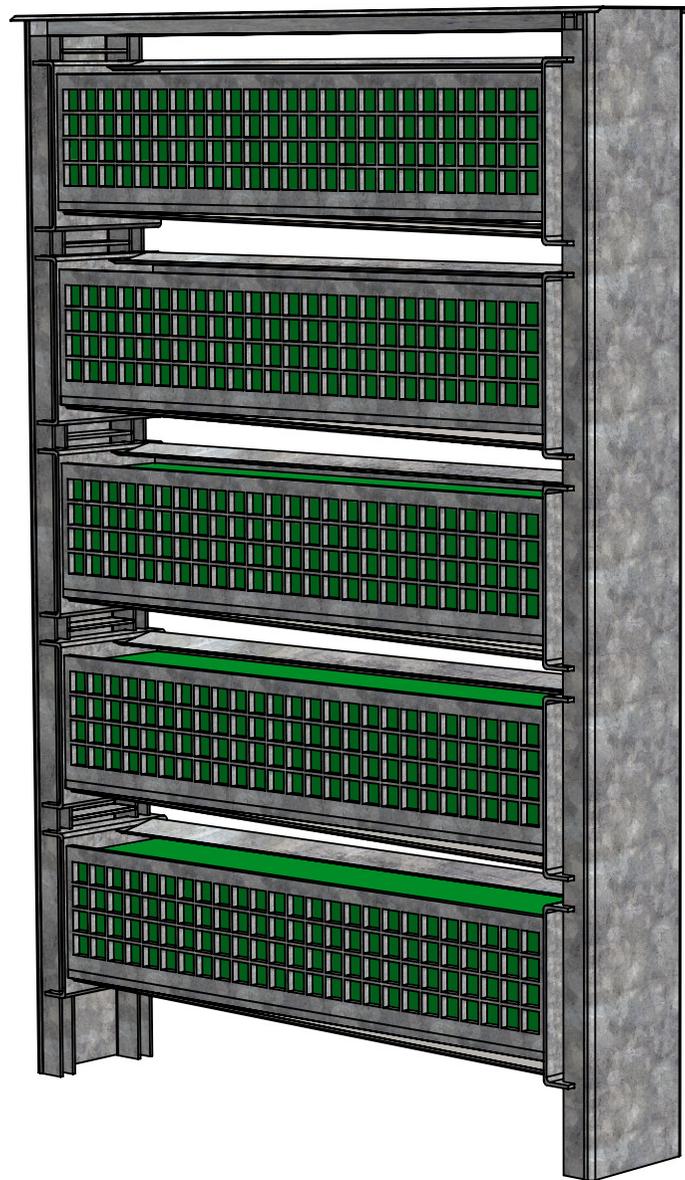
B - Cassette autoporteuse cintrée en béton



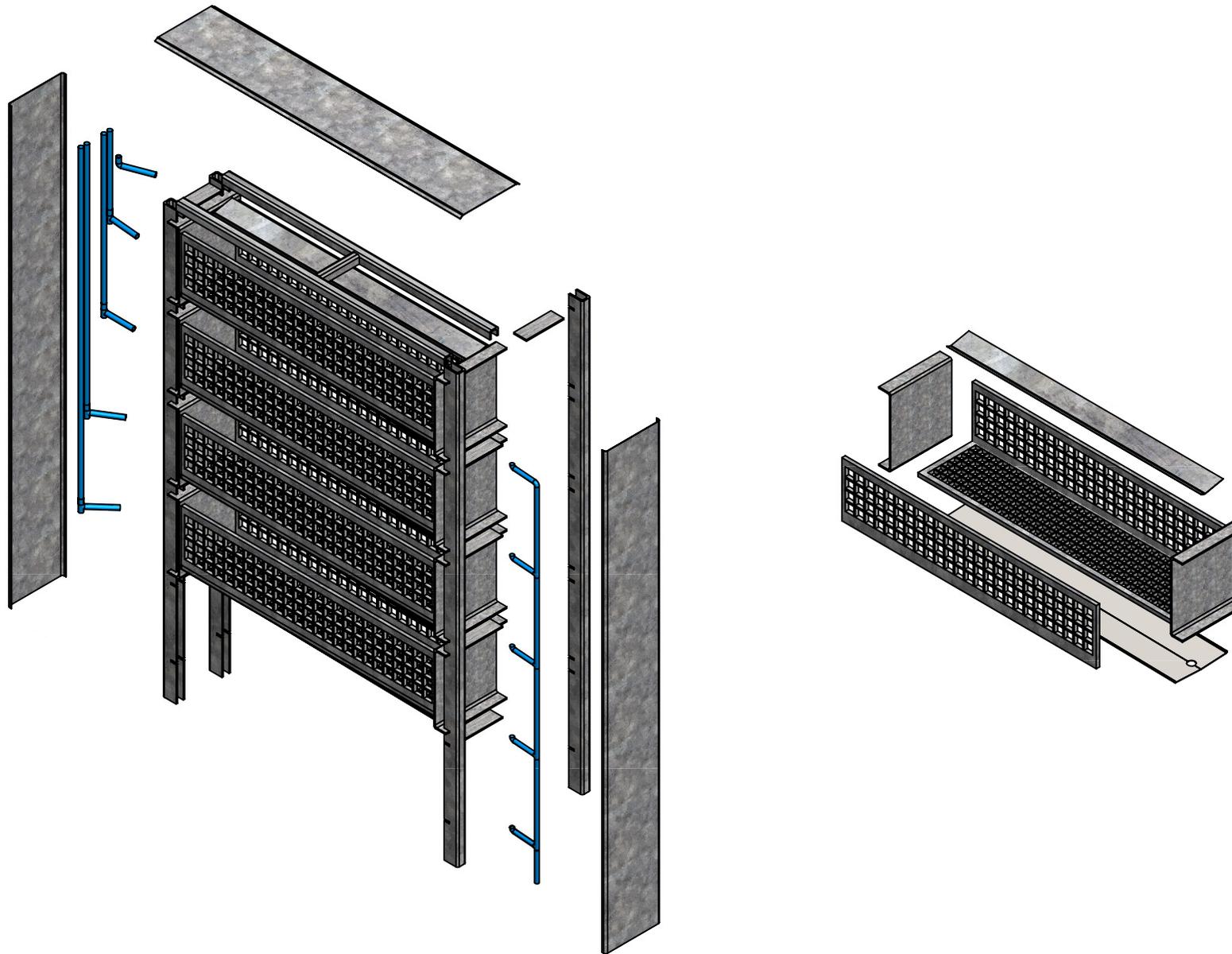
COUPE A-A



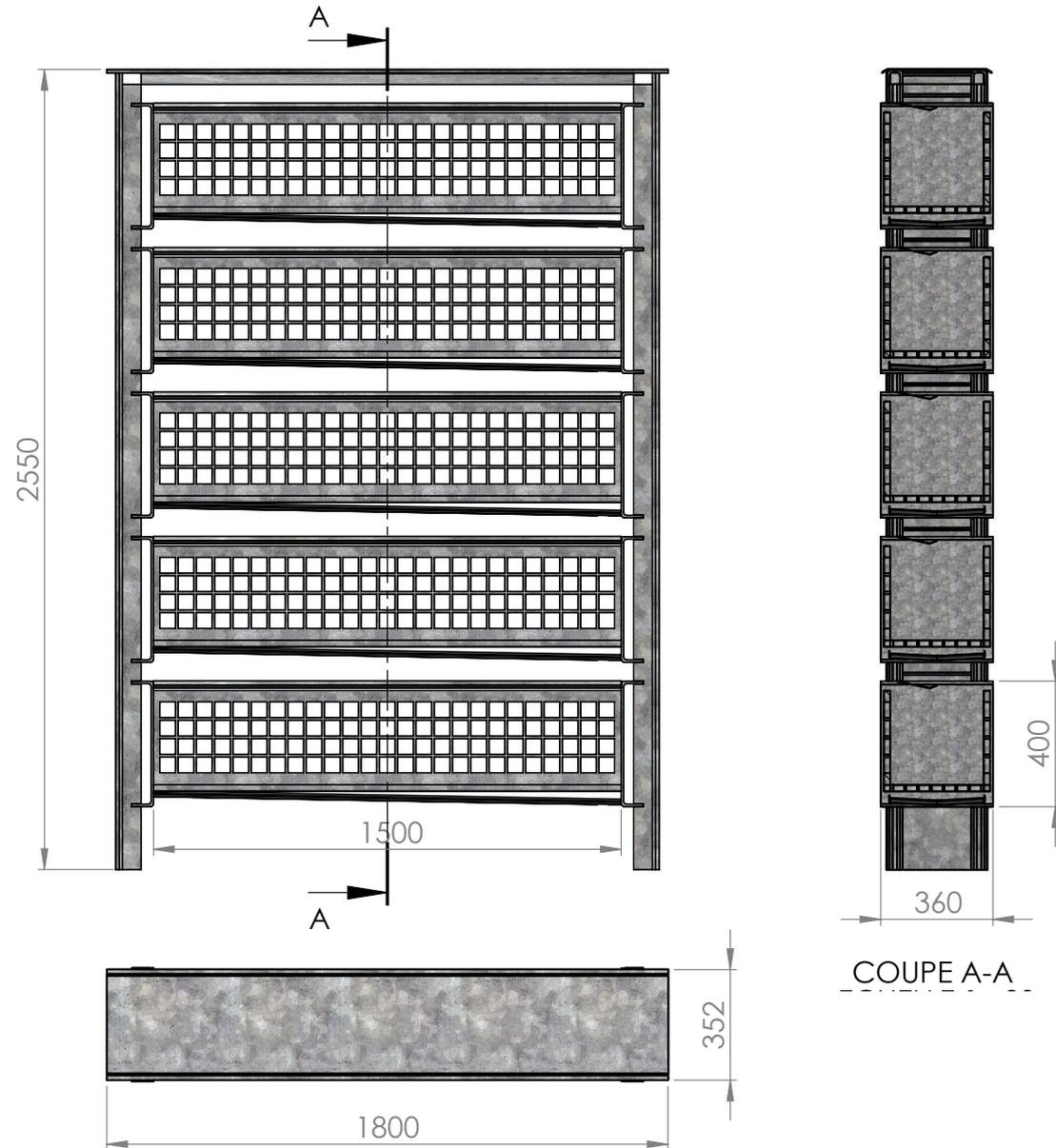
C - Cassette parallélépipédique en métal sur structure métallique



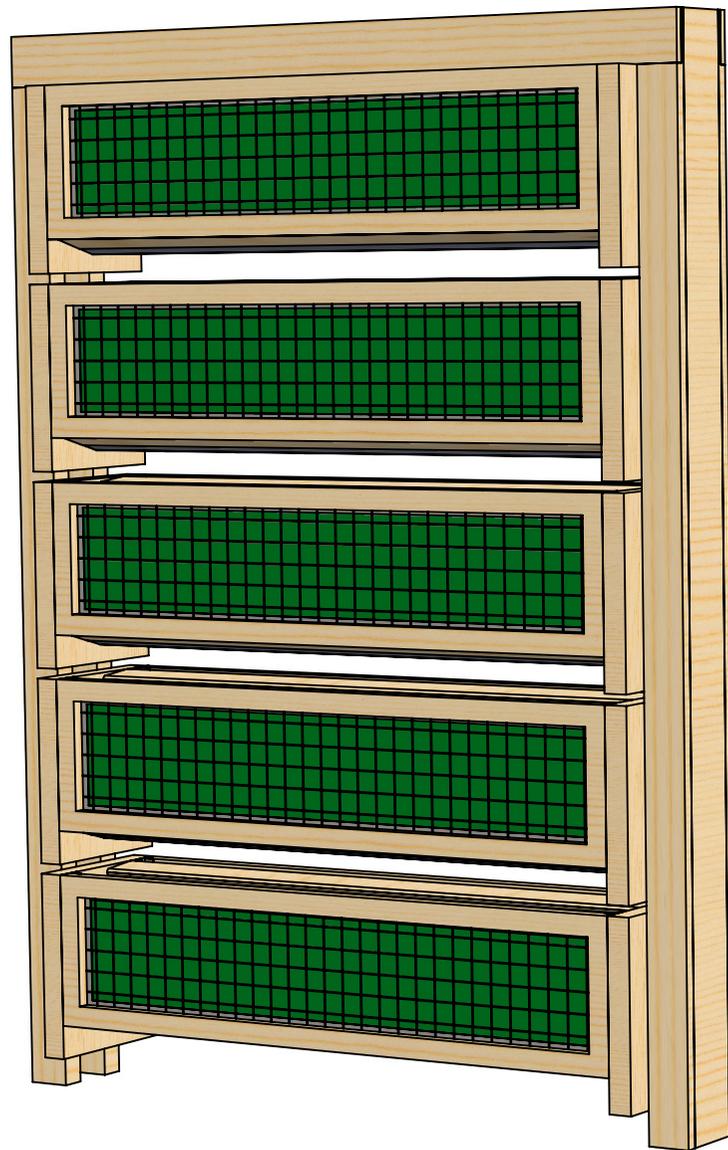
C - Cassette parallélépipédique en métal sur structure métallique



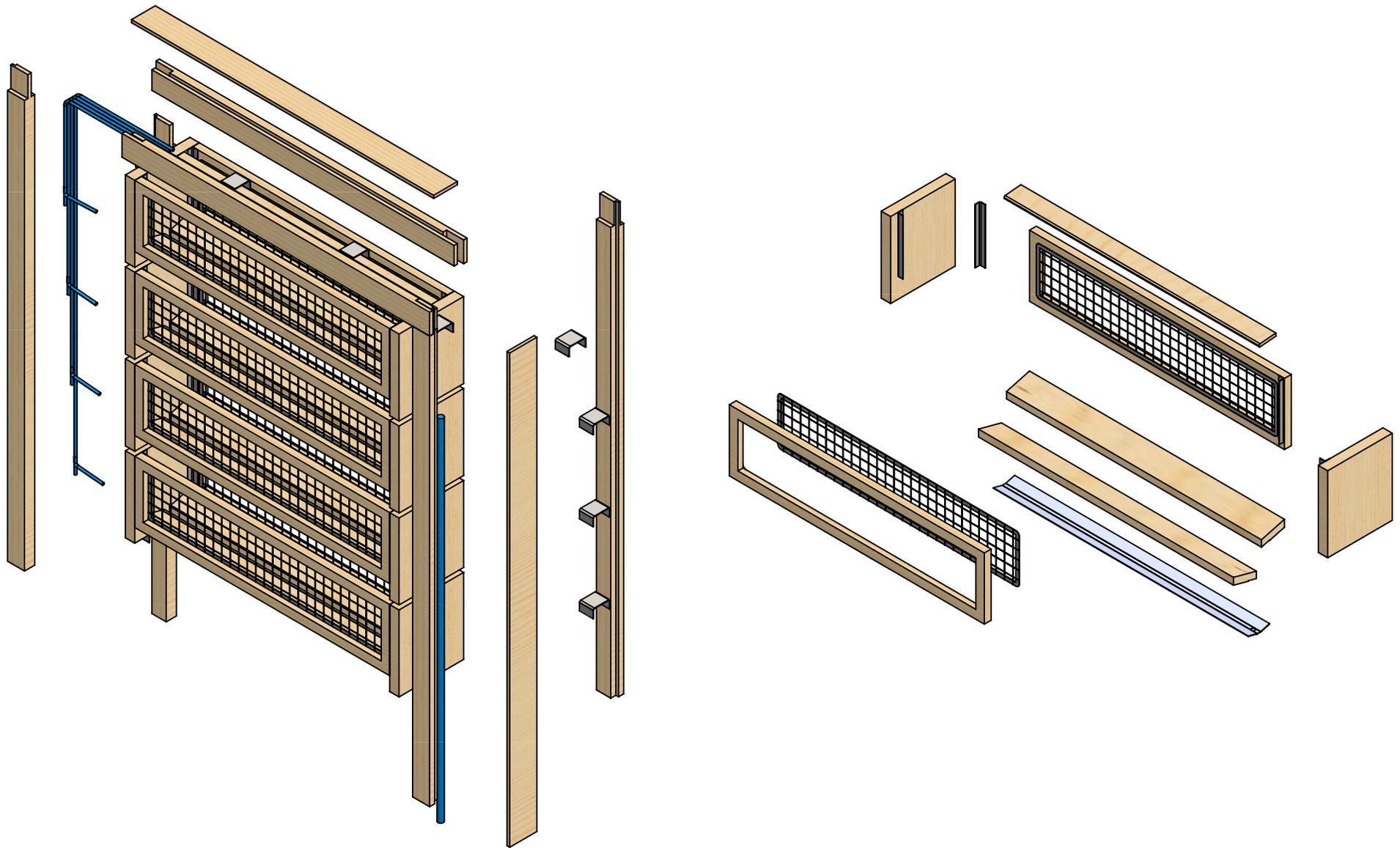
C - Casette parallélépipédique en métal sur structure métallique



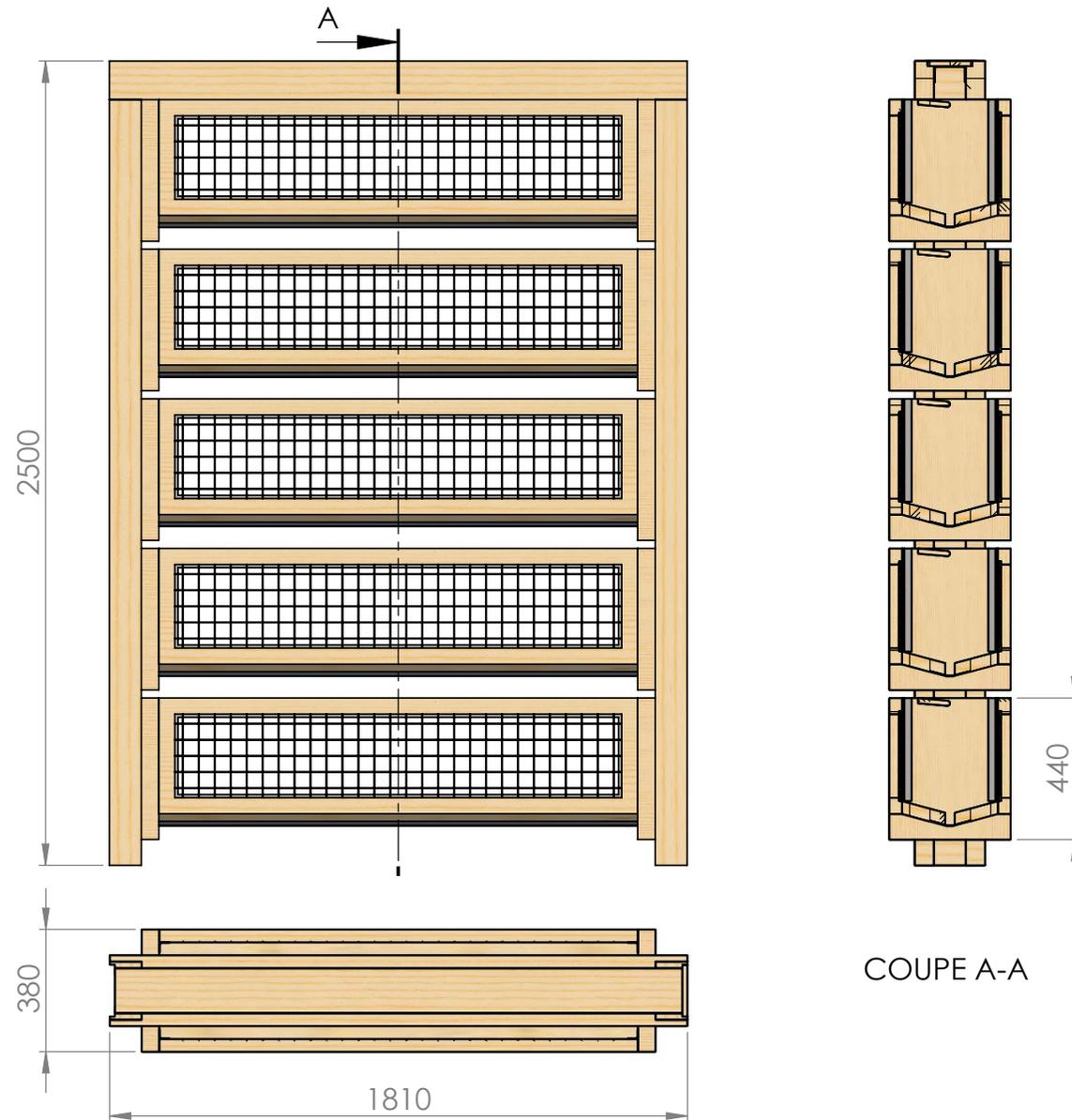
D - Casette parallélépipédique en bois sur structure en bois



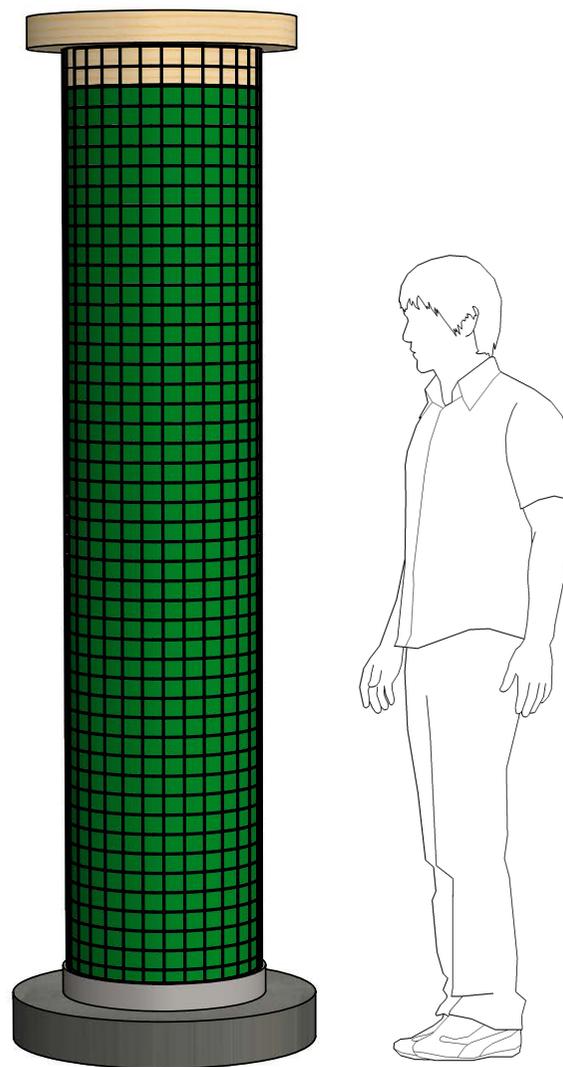
D - Cassette parallélépipédique en bois sur structure en bois



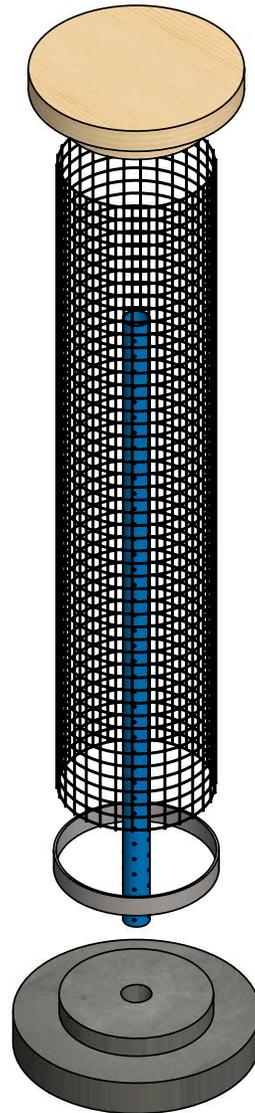
D - Cassette parallélépipédique en bois sur structure en bois



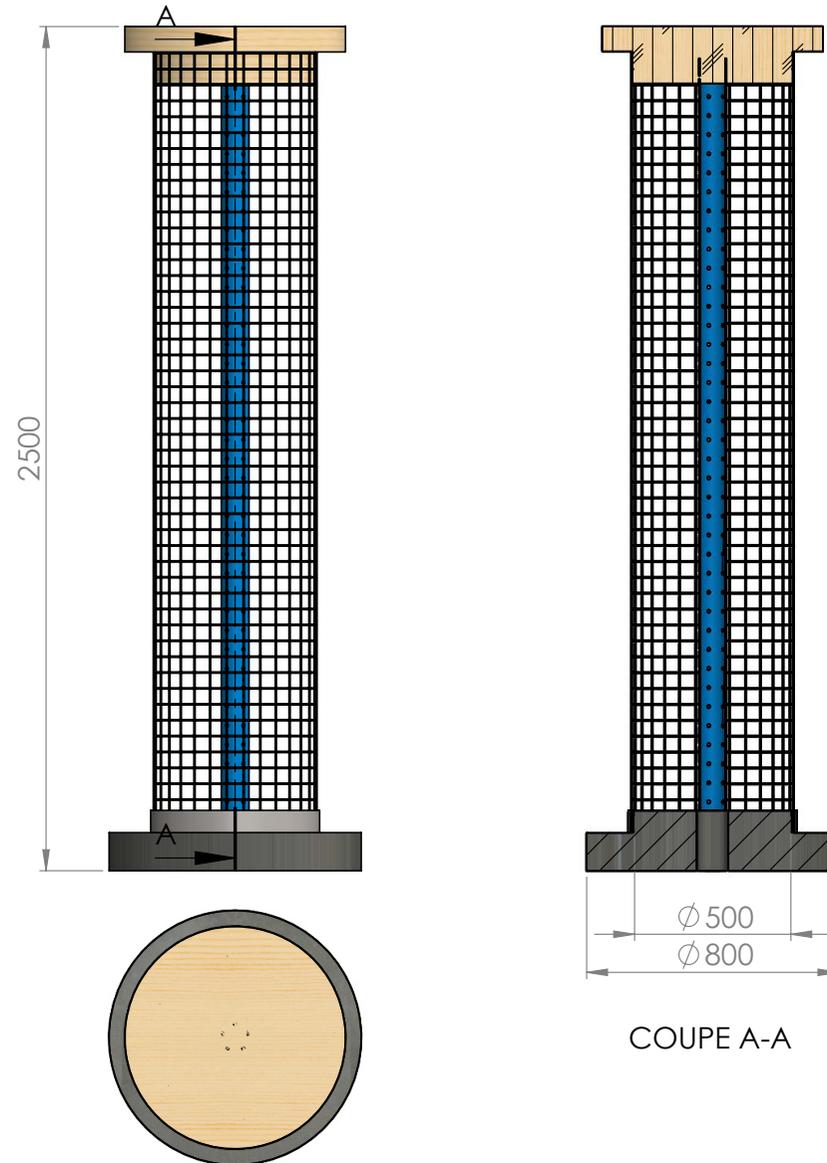
E - Casette cylindrique verticale en métal, bois et béton



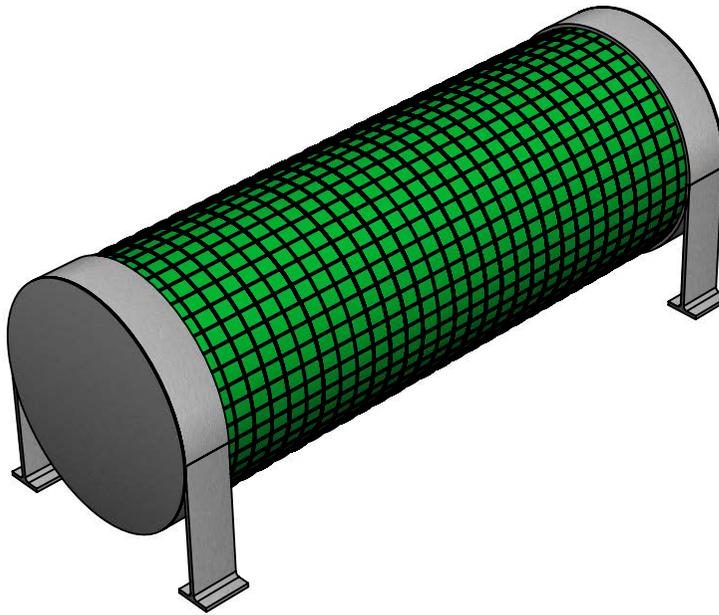
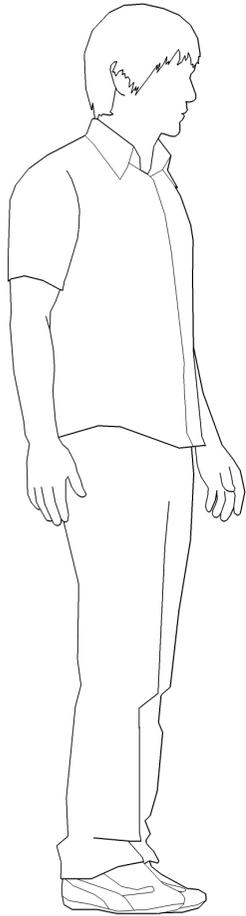
E - Casette cylindrique verticale en métal, bois et béton



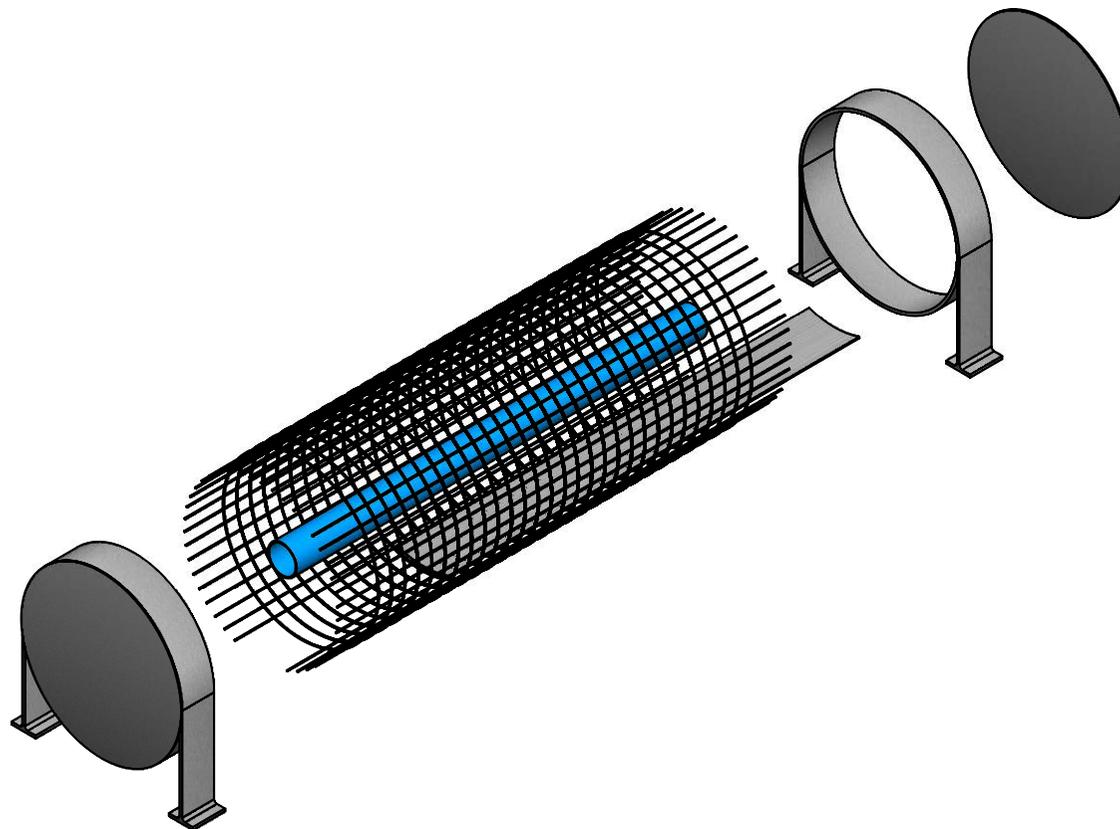
E - Cassette cylindrique verticale en métal, bois et béton



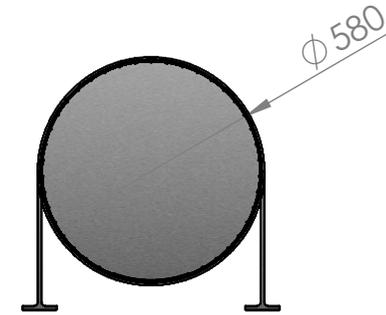
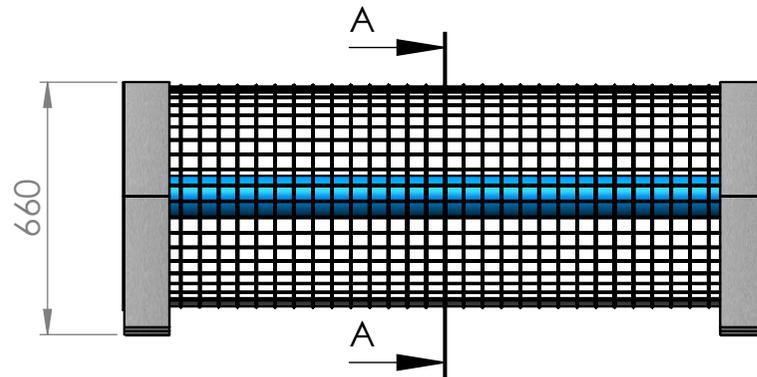
F - Cassette cylindrique horizontale en métal



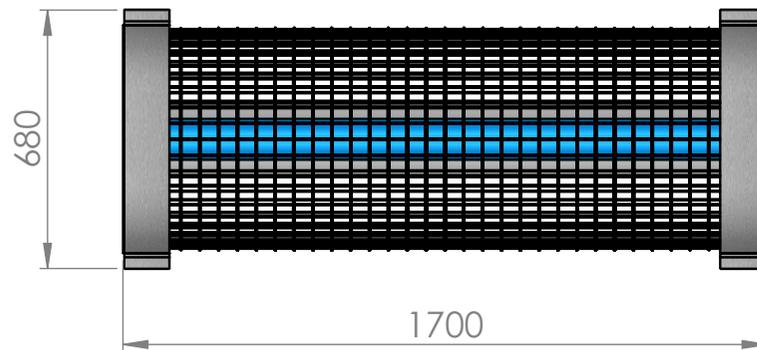
F - Cassette cylindrique horizontale en métal



F - Cassette cylindrique horizontale en métal



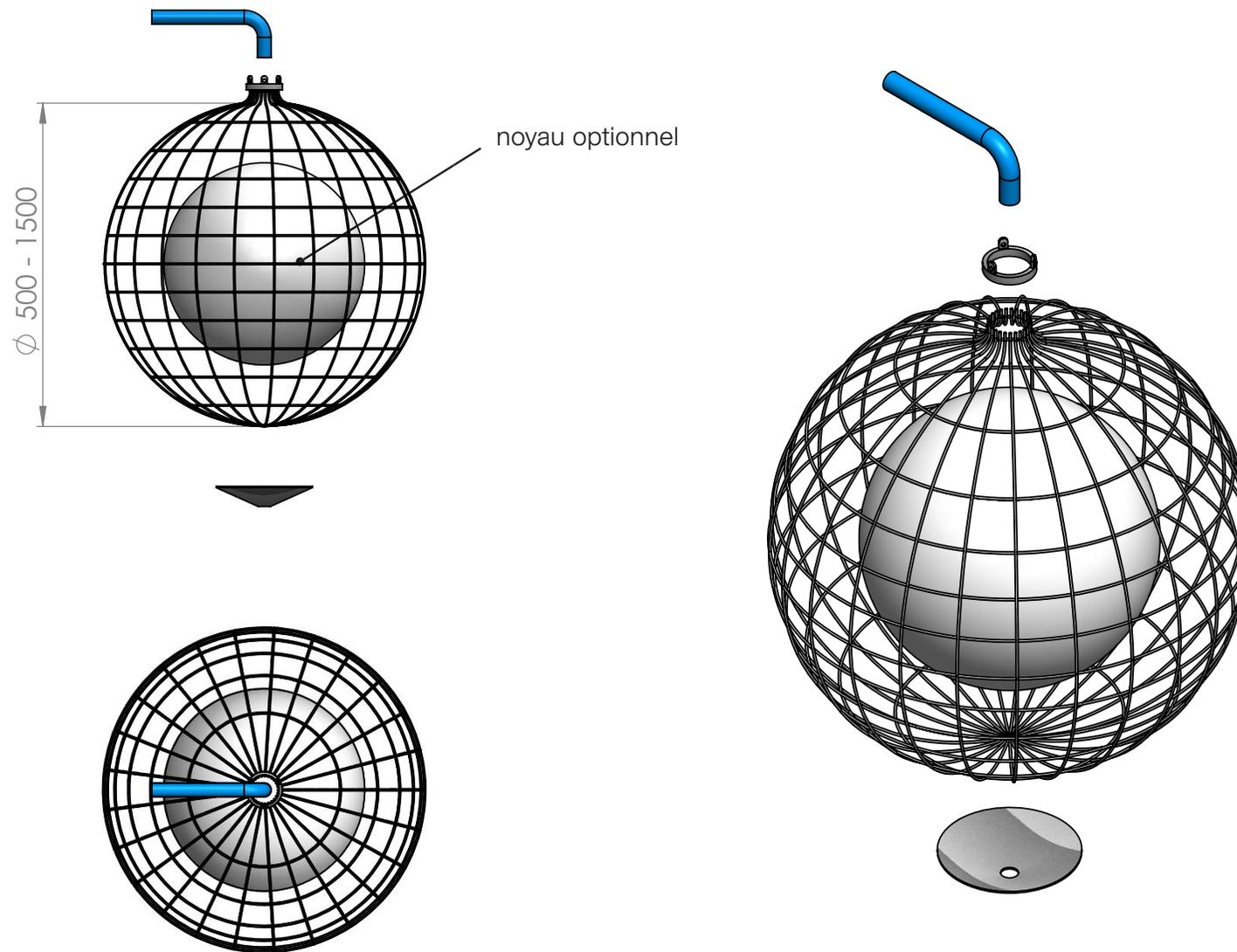
COUPE A-A

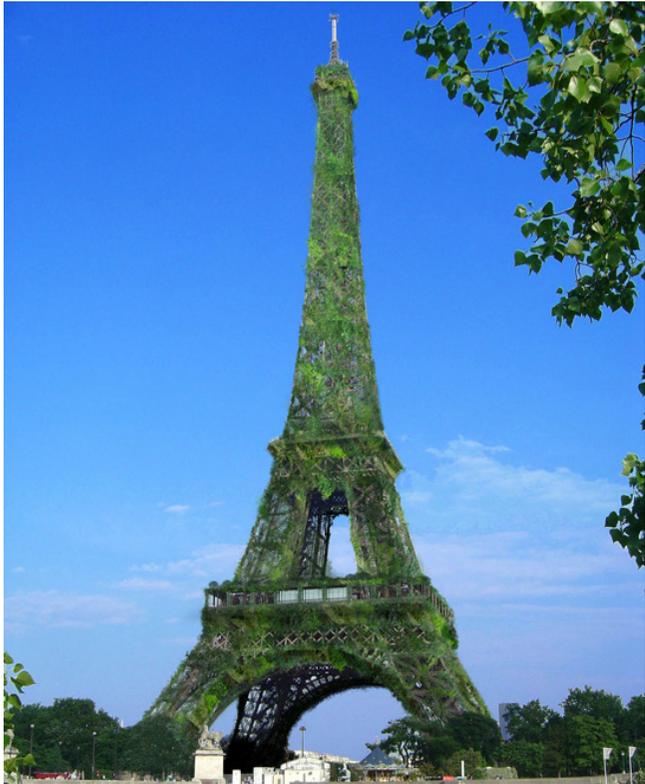


G - Casette sphérique en treillis métallique



G - Cassette sphérique en treillis métallique





ECAL
30 septembre 2013

Luc Bergeron
Laurent Soldini
Arnault Weber

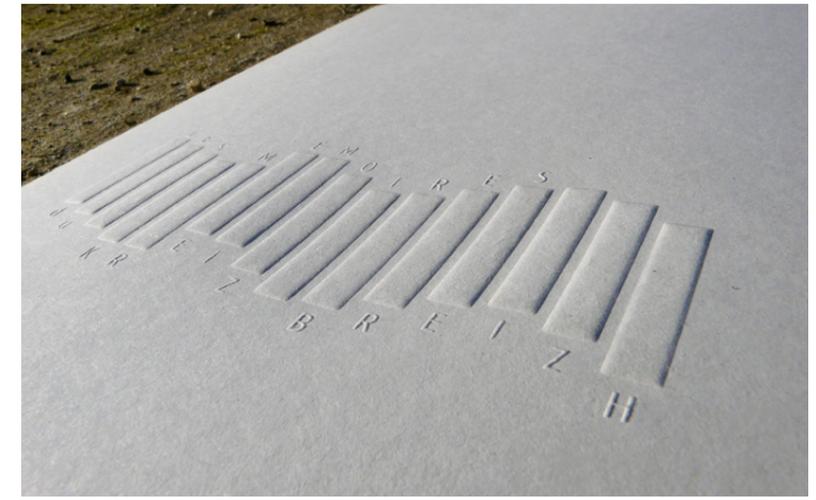
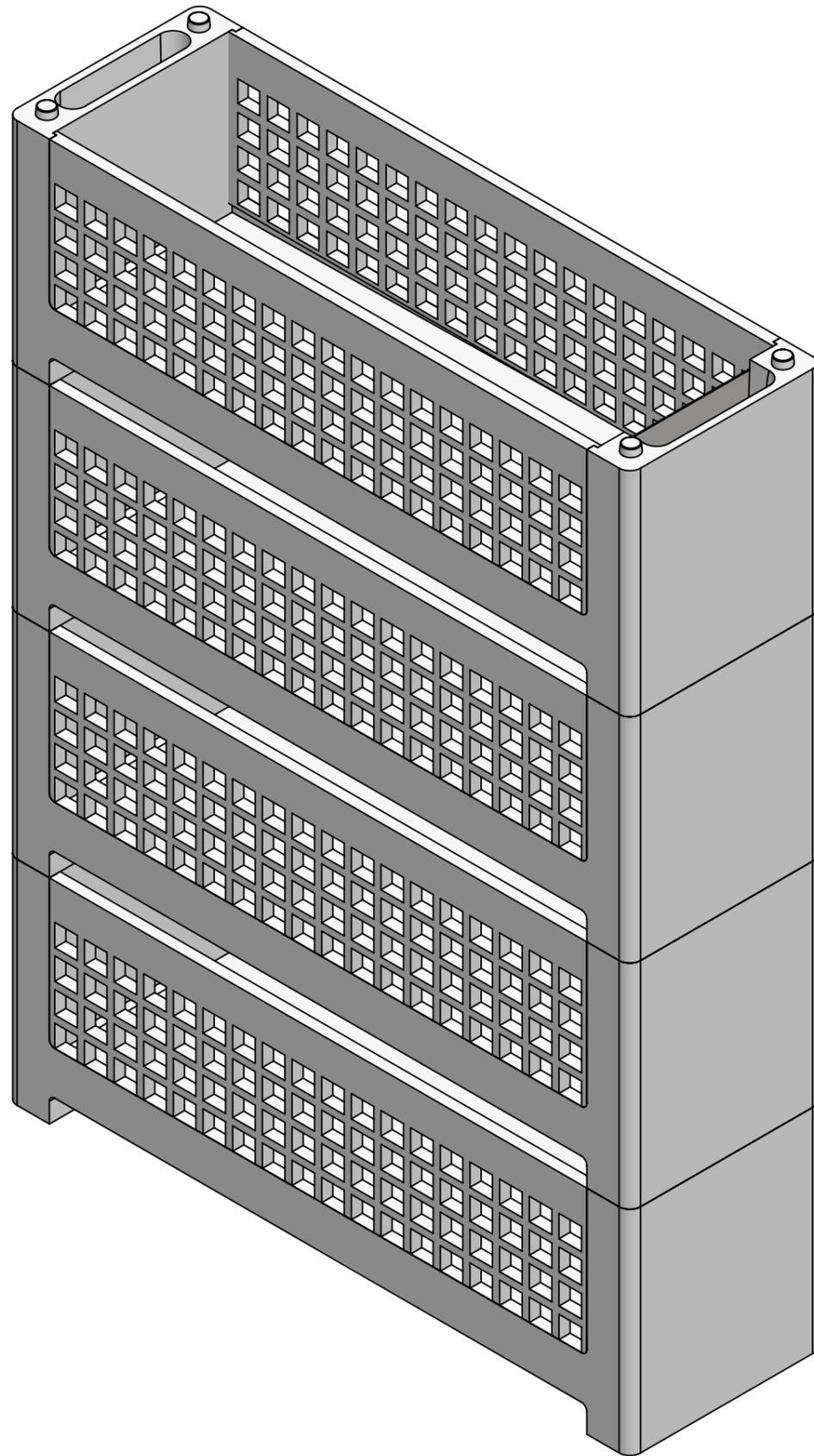
3.2 Variantes de construction

Variante cassette en béton.

Variante cassette en bois.

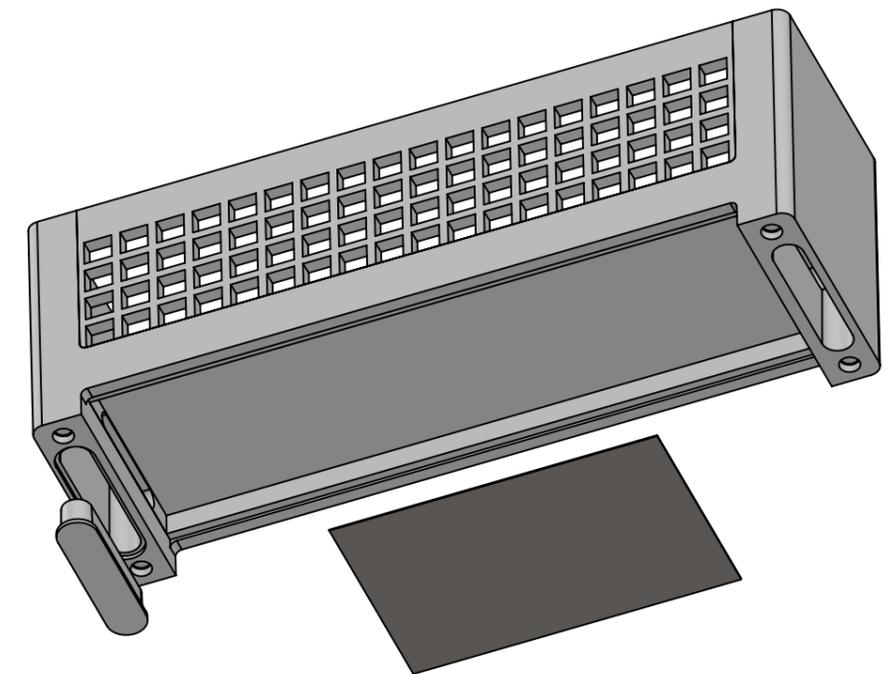
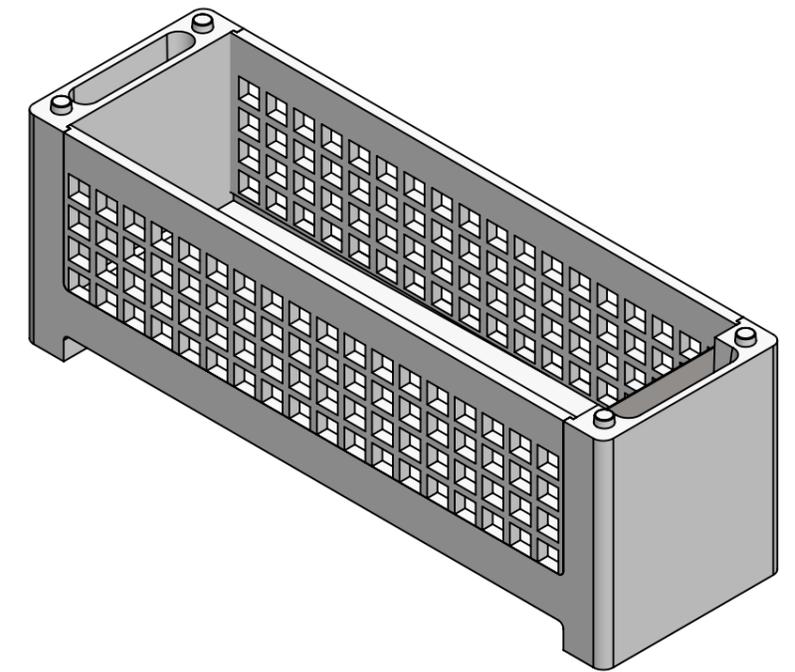
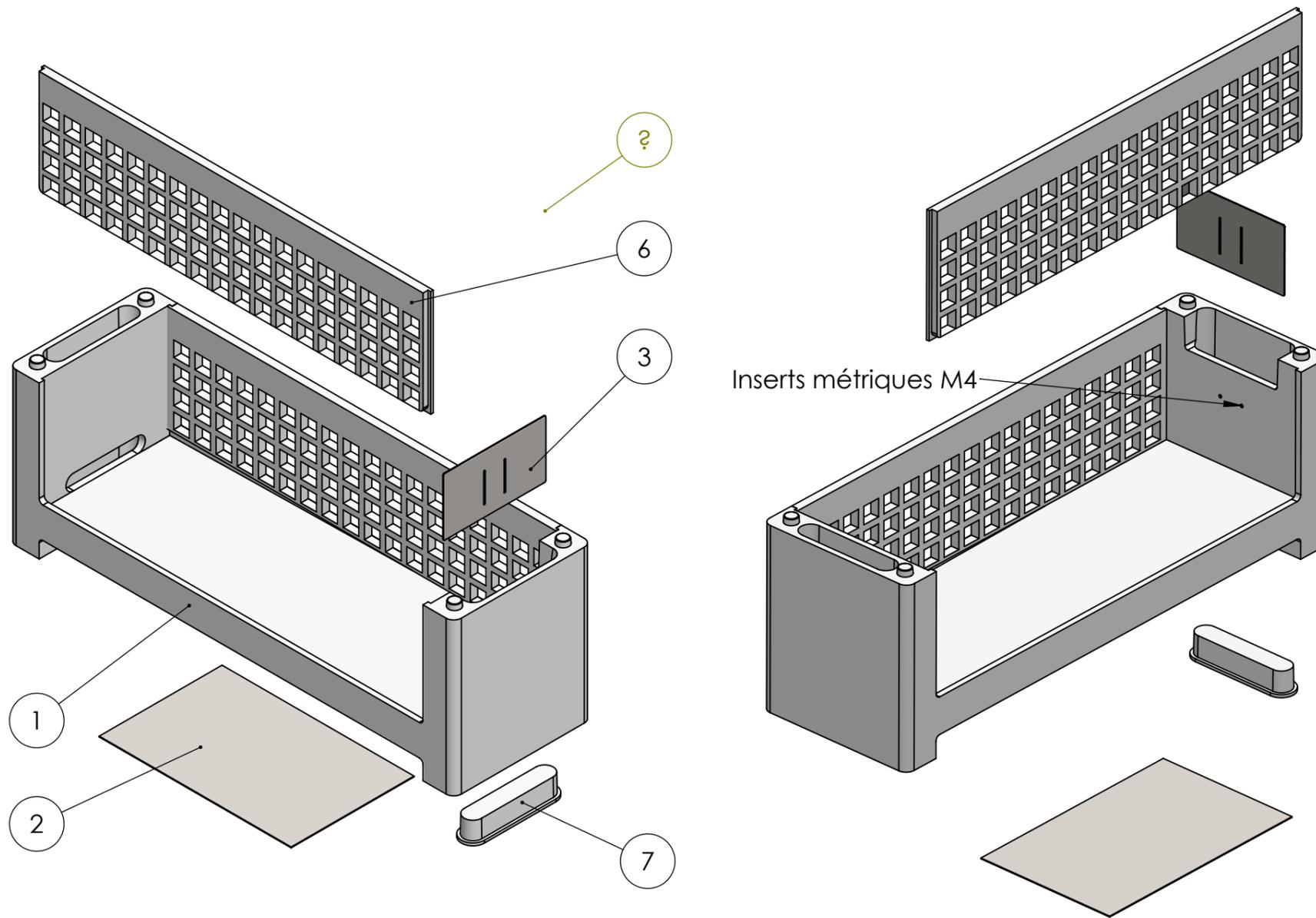
Variante cassette en métal.

Variante en béton



Possibilités d'animer les flancs des bacs en béton avec des motifs soit directement inscrits dans le moule, soit appliqués dans un deuxième temps, à l'image d'un vernis qui réagit à l'eau par exemple.

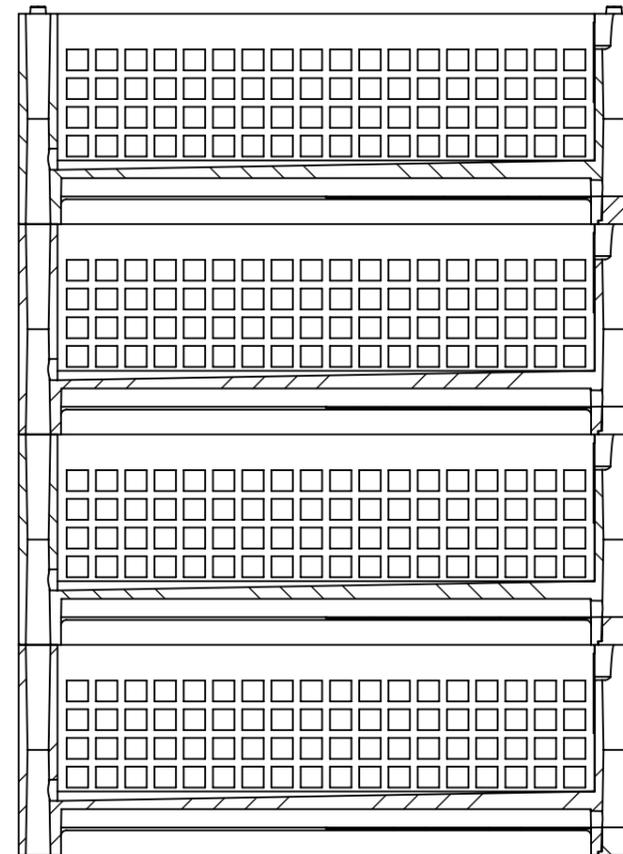
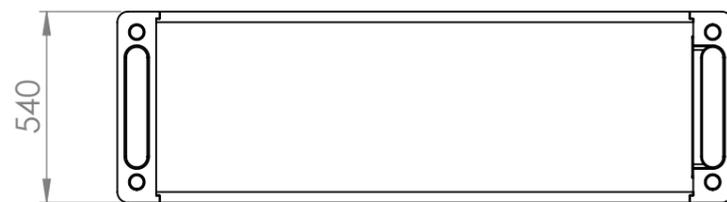
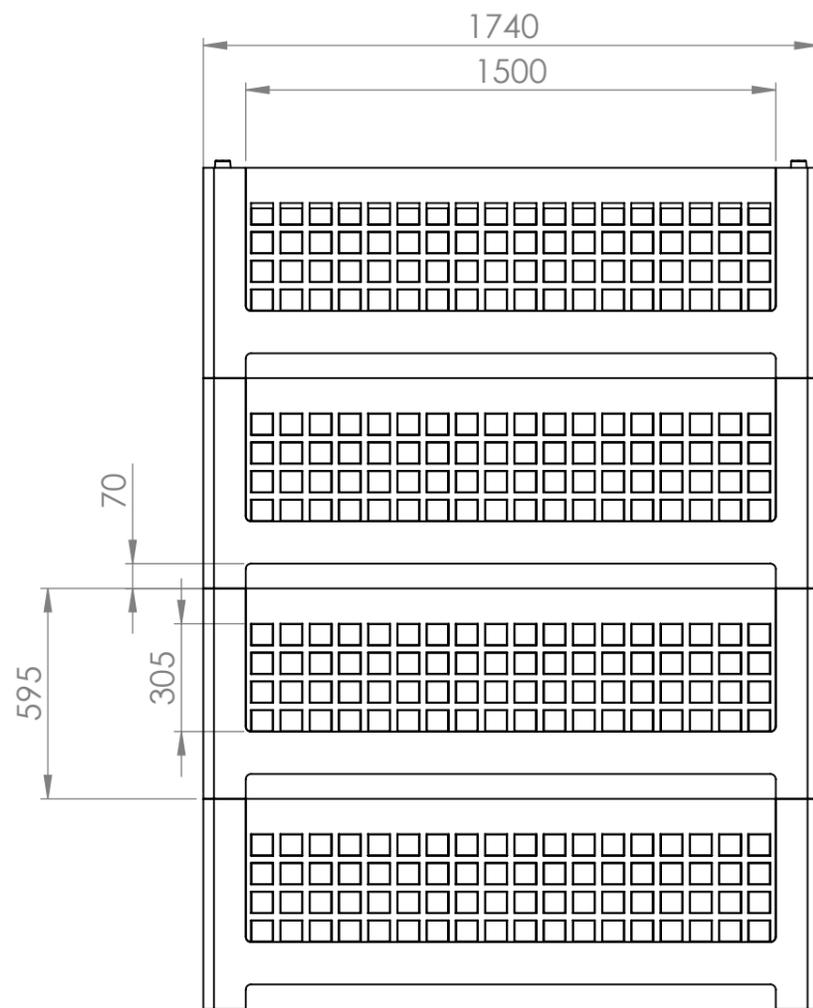
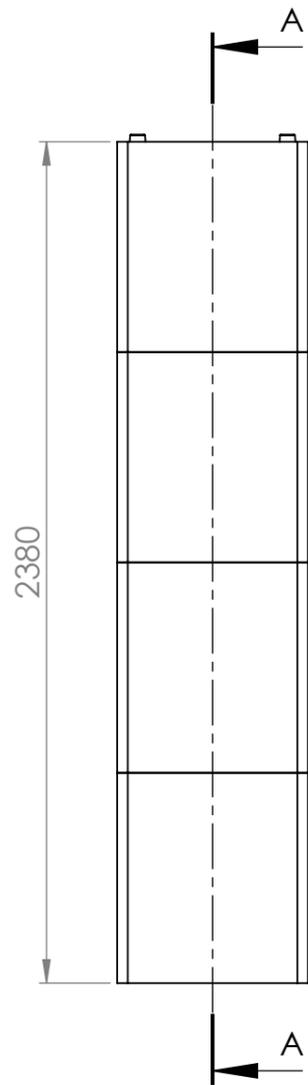
NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC 	
AUTEUR	AW		
DATE	18.11.2013		
VERSION	1		
MATERIAU: Béton	No. DE PLAN Cassette béton	A3	
ECHELLE:1:10		FEUILLE 1 / 4	



Inserts métriques M4

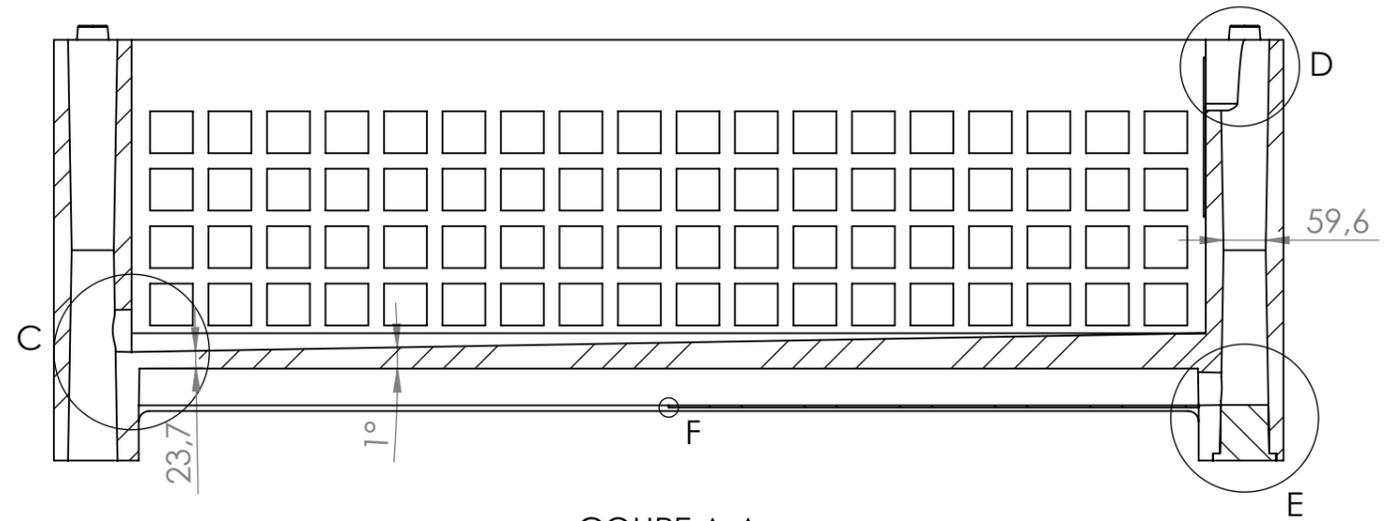
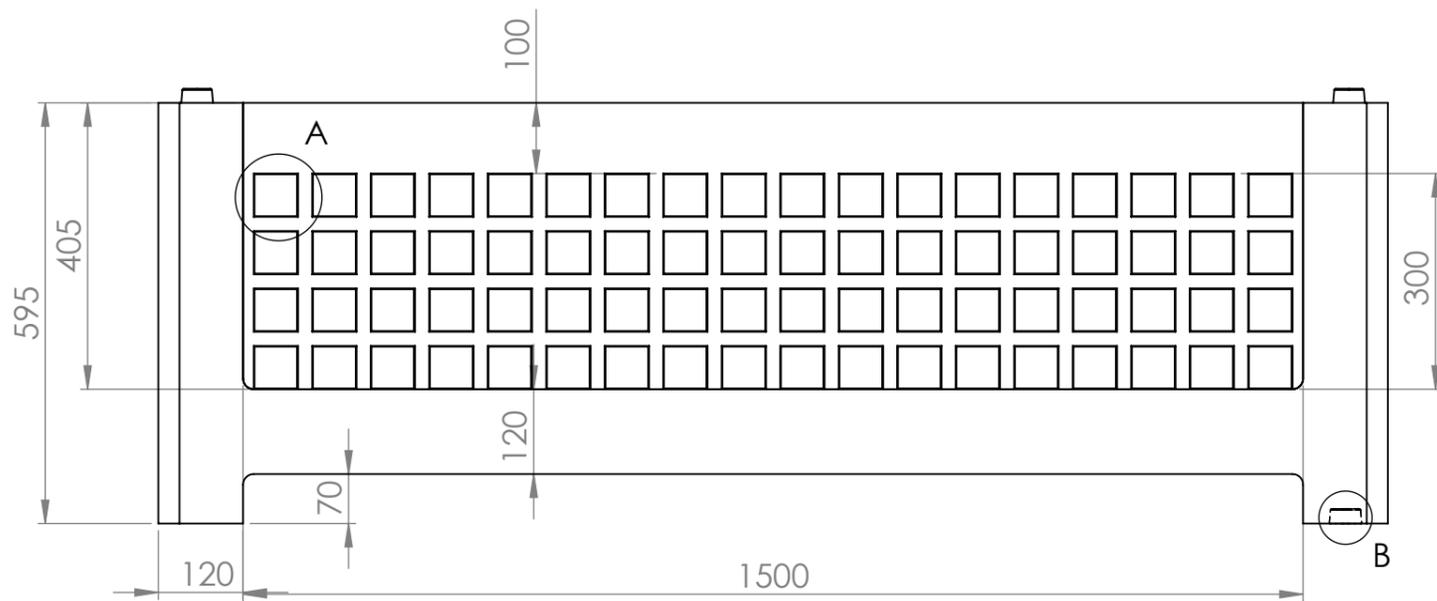
No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	MATÉRIAU	QTE	MASSE (KG)
1	base_béton	béton	1	203.8
2	tôle récup eau_traitée	inox	1	7.9
3	tôle réglage lame_eau	inox	1	1.9
4	substrat	substrat (imbibé)	1	375.8
5	nid abeille	PC	1	-
6	grille	béton	2	25
7	bouchon	béton	1	4.5
				TOTAL 644

NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland	
AUTEUR	AW		
DATE	18.11.2013		
VERSION	1		
MATERIAU: Béton		No. DE PLAN Cassette béton	A3
		ECHELLE:1:15	FEUILLE 2 / 4

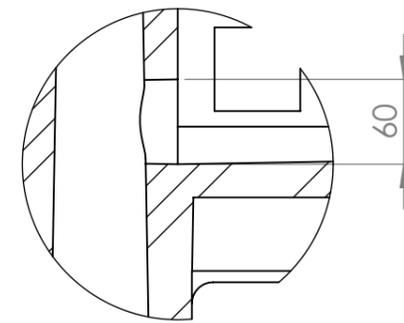


COUPE A-A

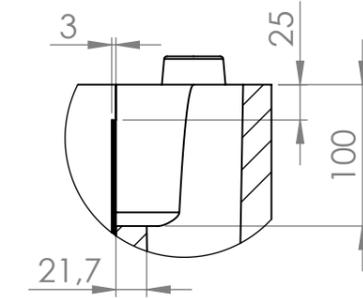
NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC 	
AUTEUR	AW		
DATE	18.11.2013		
VERSION	1		
MATERIAU: Béton	No. DE PLAN Cassette béton		A3
ECHELLE:1:20		FEUILLE 3 / 4	



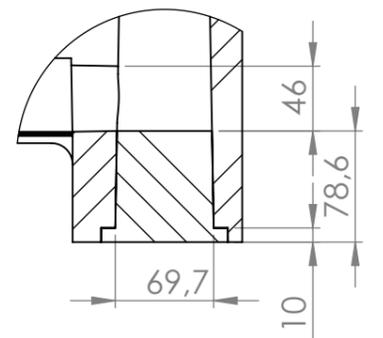
COUPE A-A



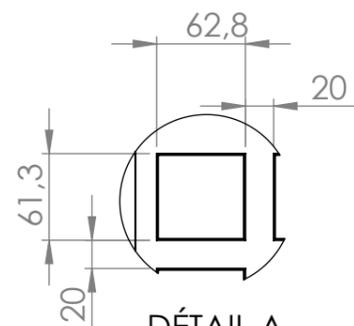
DÉTAIL C
ECHELLE 1 : 5



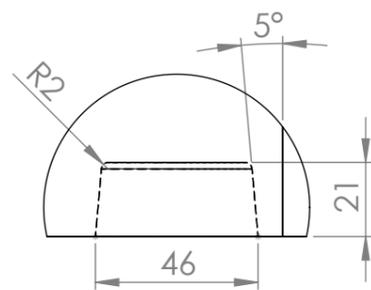
DÉTAIL D
ECHELLE 1 : 5



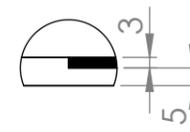
DÉTAIL E
ECHELLE 1 : 5



DÉTAIL A
ECHELLE 1 : 5



DÉTAIL B
ECHELLE 1 : 2

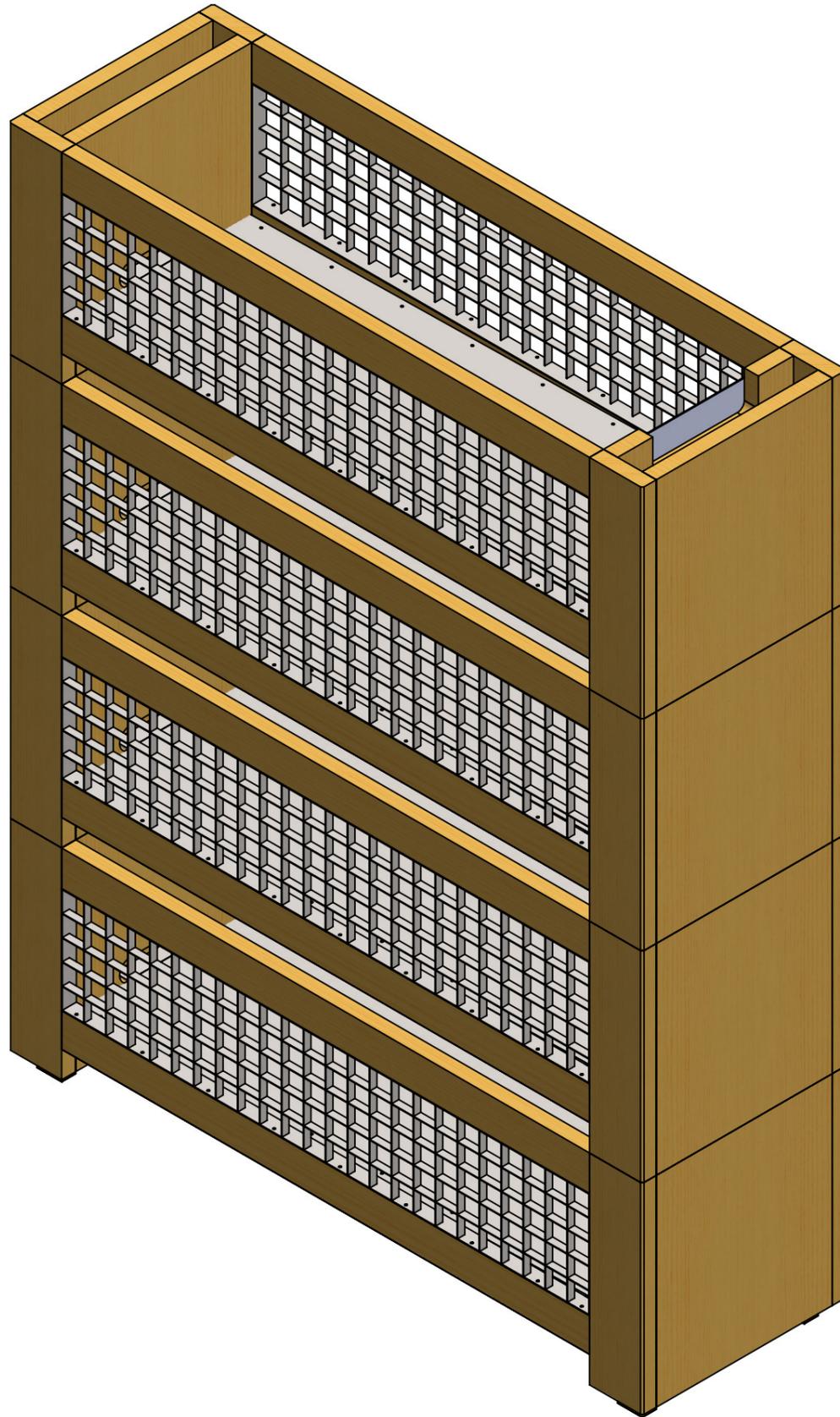


DÉTAIL F
ECHELLE 1 : 2

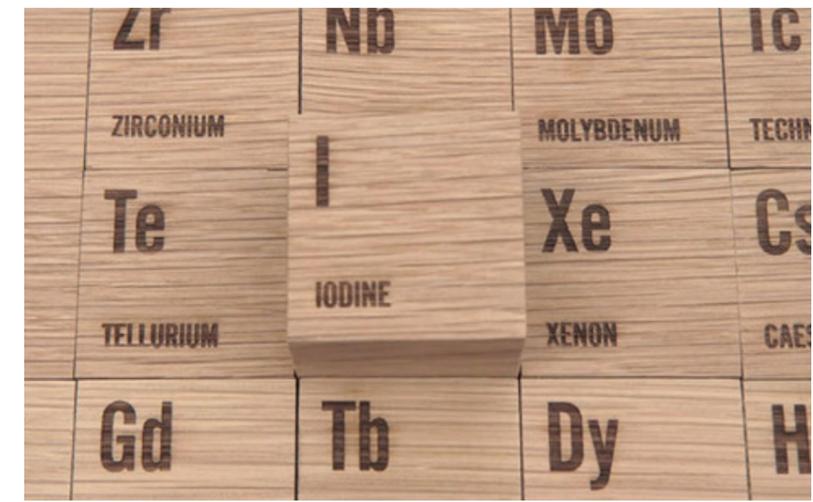
NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC <small>Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland</small>		
AUTEUR	AW			
DATE	18.11.2013			
VERSION	1	No. DE PLAN	Cassette béton	A3
MATERIAU: Béton				
ECHELLE:1:10		FEUILLE 4 / 4		

Hes-so
Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale
Fachhochschule Westschweiz
University of Applied Sciences and Arts
Western Switzerland

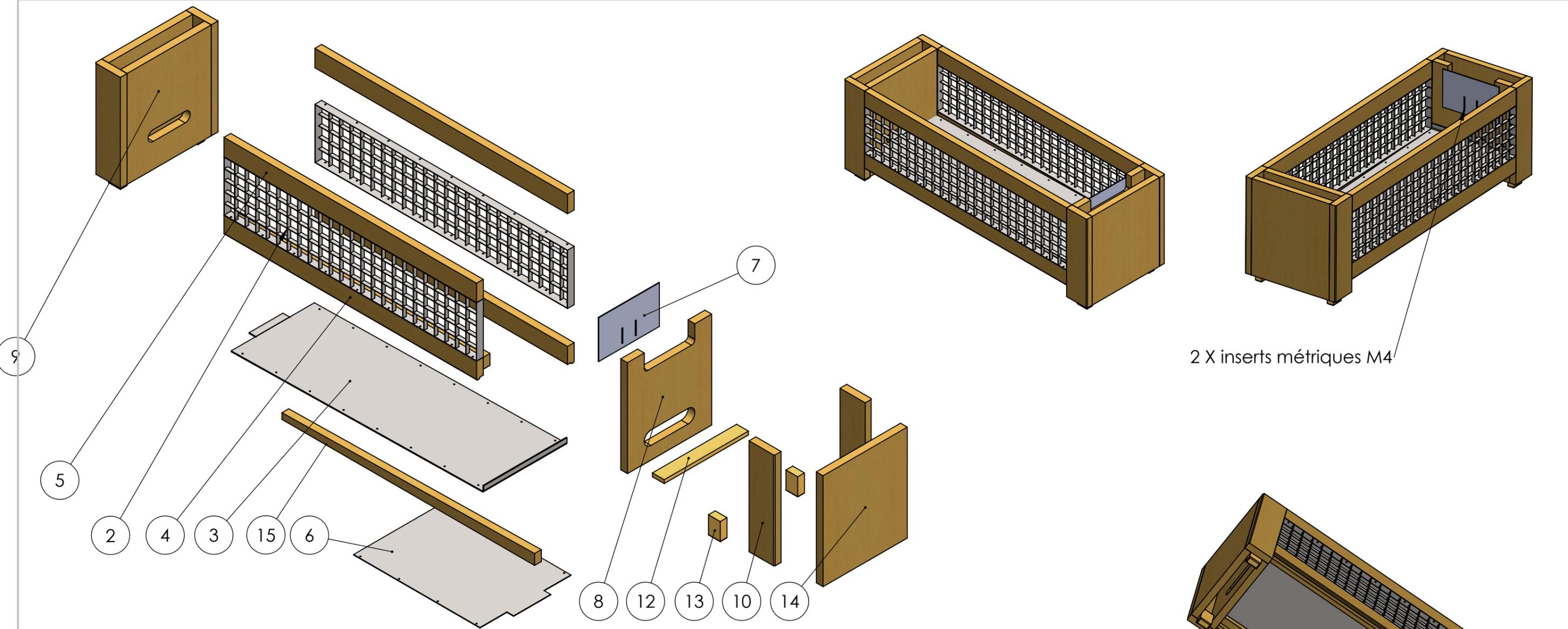
Variante en bois



Les flancs des bacs en bois peuvent être utilisés pour un décor abstrait ou pour des indications concernant la Commune par exemple. Plusieurs techniques sont envisageables et devront être valisées, on pense notamment à la (pyro-)gravure ou sérigraphie.



NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC 	
AUTEUR	AW		
DATE	18.11.2013		
VERSION	1		
MATERIAU: Bois Accoya	No. DE PLAN Cassette bois	A3	
ECHELLE:1:10		FEUILLE 1 / 4	

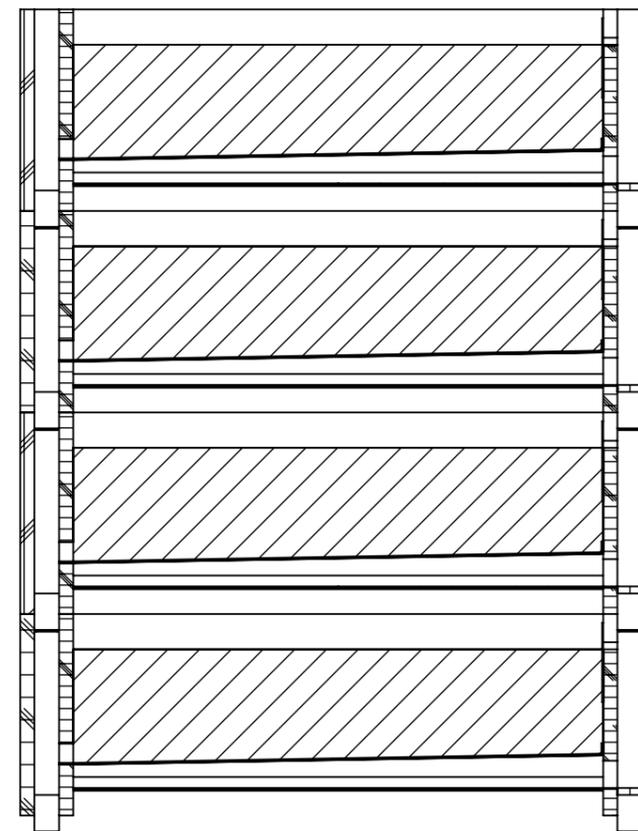
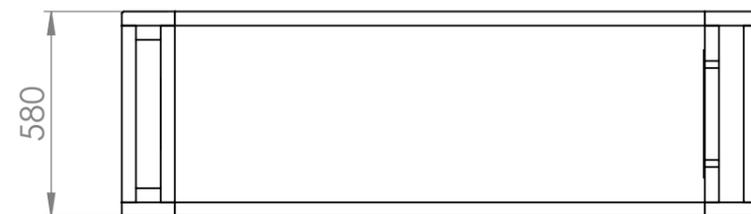
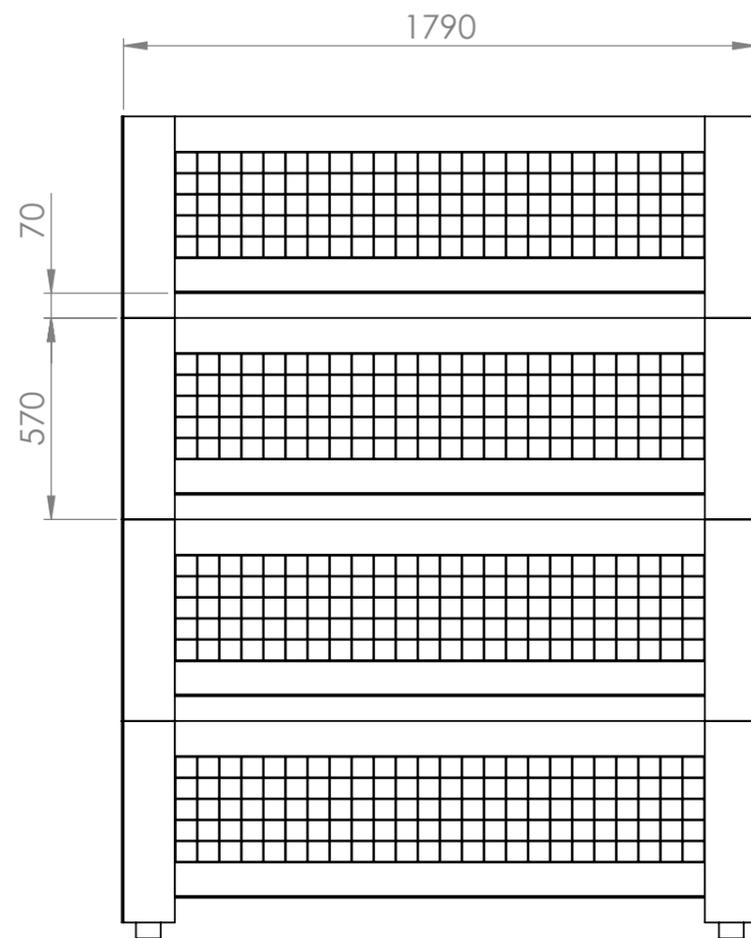
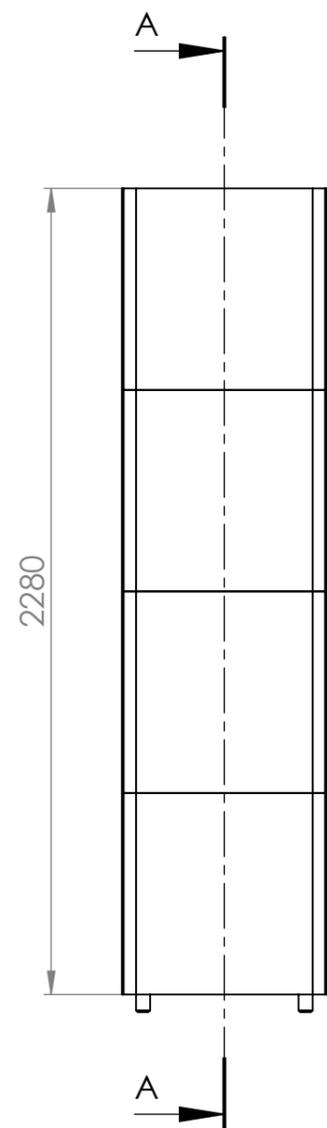


2 X inserts métriques M4

No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	MATÉRIAU	QTE	MASSE (KG)
1	substrat	Substrat	1	375.8
2	caillebottis	Inox	2	5.8
3	tôle récup eau traitée_bois_2	Inox	1	27.8
4	traverse bas	Bois Accoya	2	3
5	traverse haut	Bois Accoya	2	3.1
6	tôle eau sale	Inox	1	9
7	tôle réglage lame eau	Inox	1	0.2
8	flanc droit	Bois Accoya	1	4.8
9	flanc gauche	Bois Accoya	1	5.6
10	jonction côté	Bois Accoya	4	1.8
11	nid abeilles	PC	1	-
12	bouchon	Bois Accoya	1	0.4
13	pièce indexation	Bois Accoya	4	0.2
14	capot	Bois Accoya	2	5.9
15	appui_tôle_récup_eau_traitée	Bois Accoya	2	1.5
			TOTAL	485

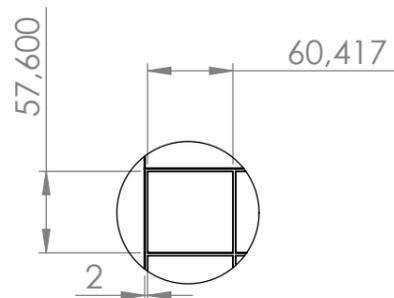
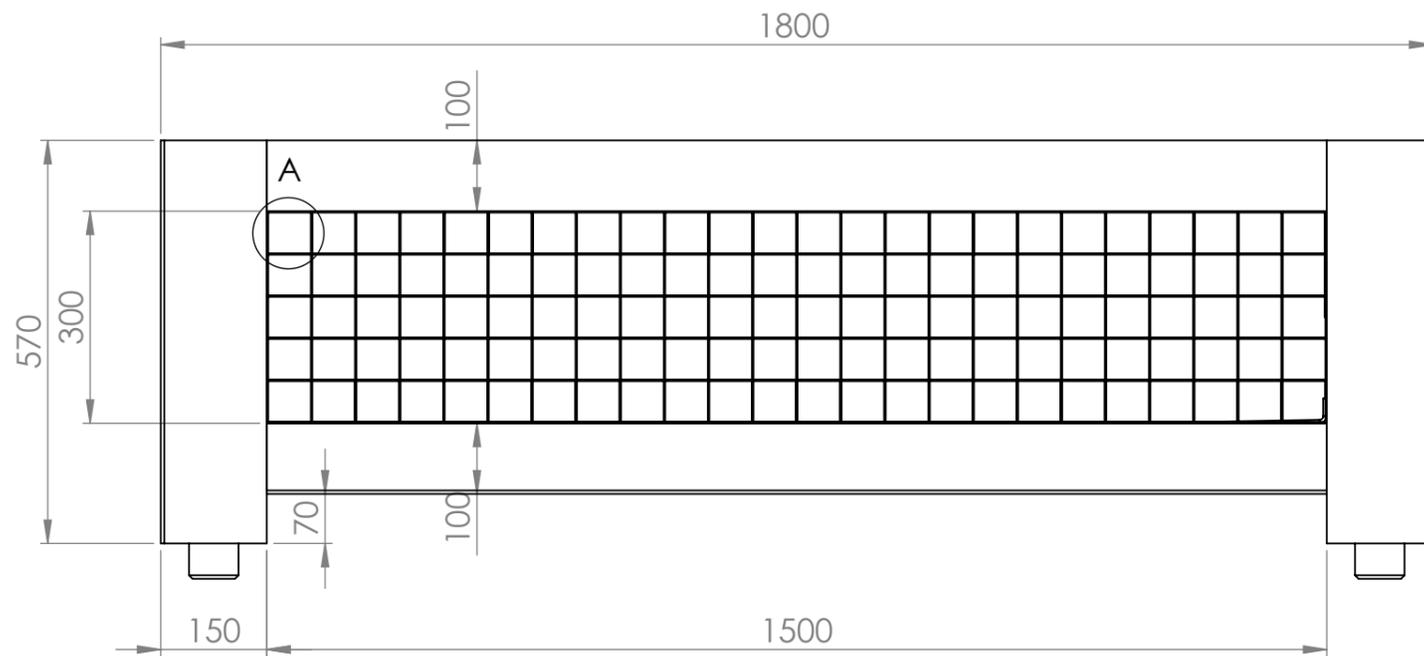
NOTE (ASSEMBLAGES)
 caillebottis / tôle à bois : vissé
 bois à bois: collé

NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland	
AUTEUR	AW		
DATE	18.11.2013		
VERSION	1		
MATERIAU: Bois Accoya		No. DE PLAN Cassette bois	A3
		ECHELLE:1:20	FEUILLE 2 / 4

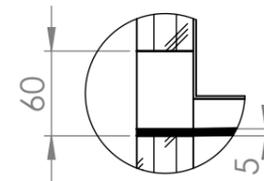
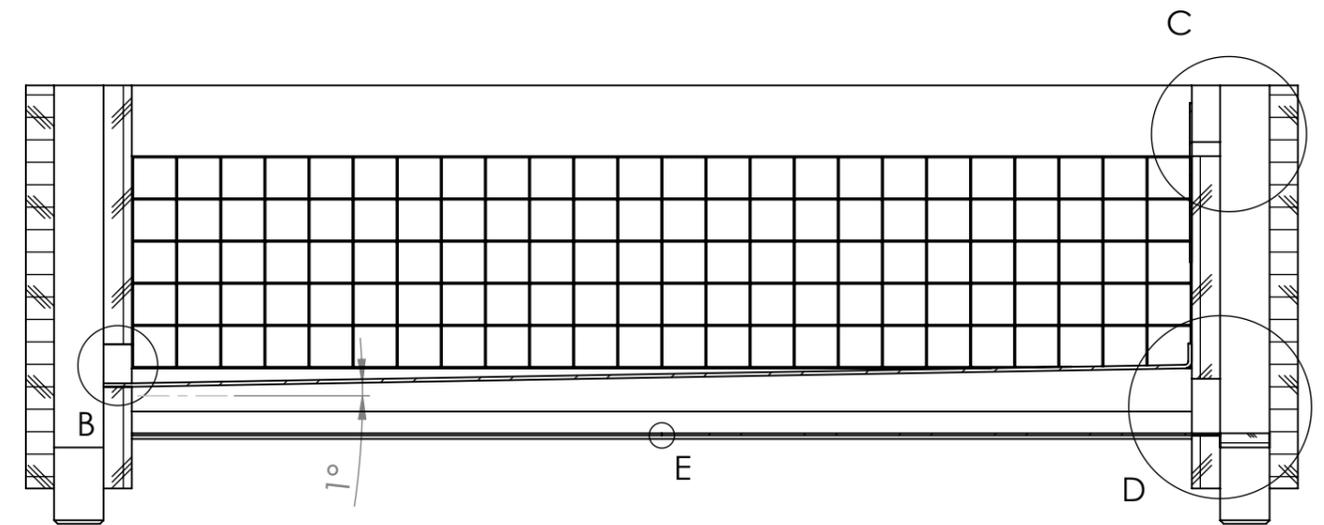
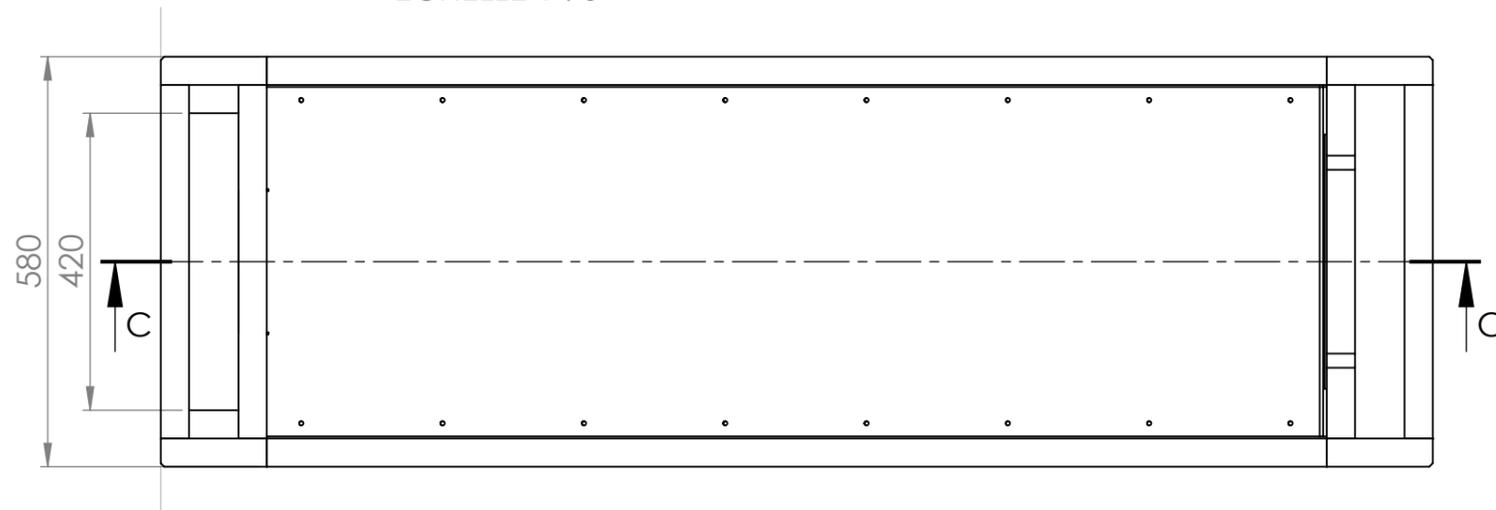


COUPE A-A

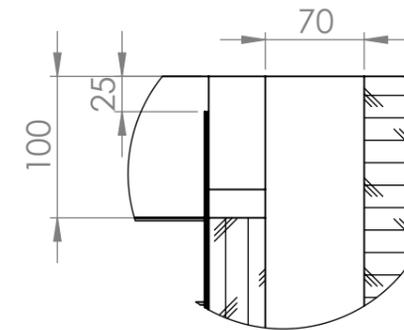
NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC 	
AUTEUR	AW		
DATE	18.11.2013		
VERSION	1		
MATERIAU: Bois Accoya		No. DE PLAN Cassette bois	A3
		ECHELLE:1:20	FEUILLE 3/4



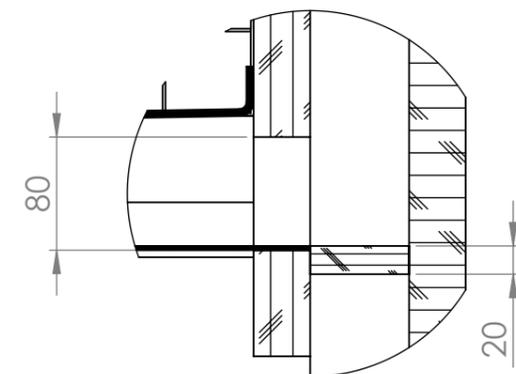
DÉTAIL A
ECHELLE 1 : 5



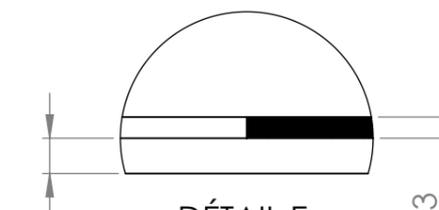
DÉTAIL B
ECHELLE 1 : 5



DÉTAIL C
ECHELLE 1 : 5



DÉTAIL D
ECHELLE 1 : 5

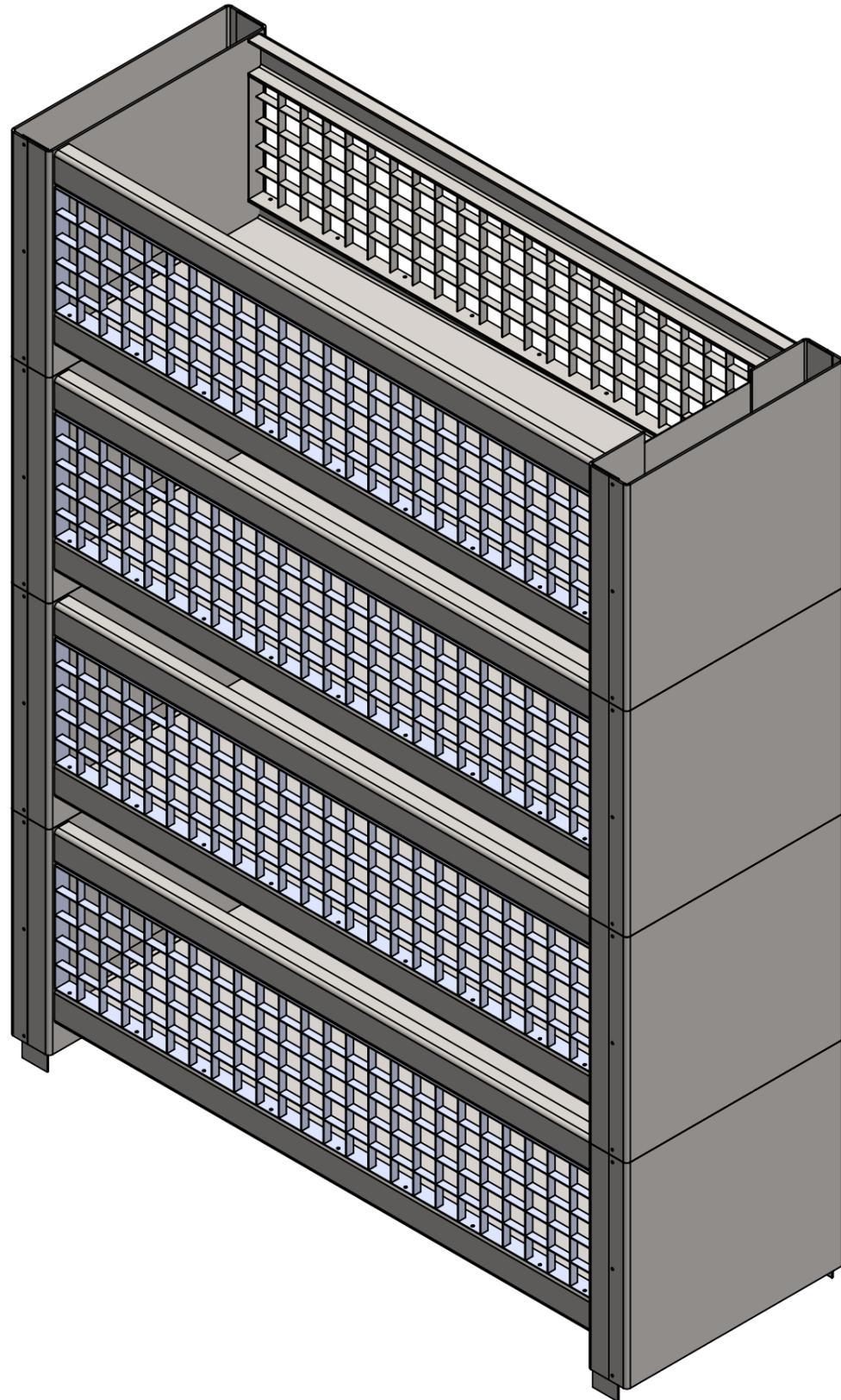


DÉTAIL E
ECHELLE 1 : 1

NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland	
AUTEUR	AW		
DATE	18.11.2013		
VERSION	1		
MATERIAU: Bois Accoya		No. DE PLAN Cassette bois	A3
		ECHELLE:1:10	FEUILLE 4 / 4

Hes·so
 Haute Ecole Spécialisée
 de Suisse occidentale
 Fachhochschule Westschweiz
 University of Applied Sciences and Arts
 Western Switzerland

Variante en métal

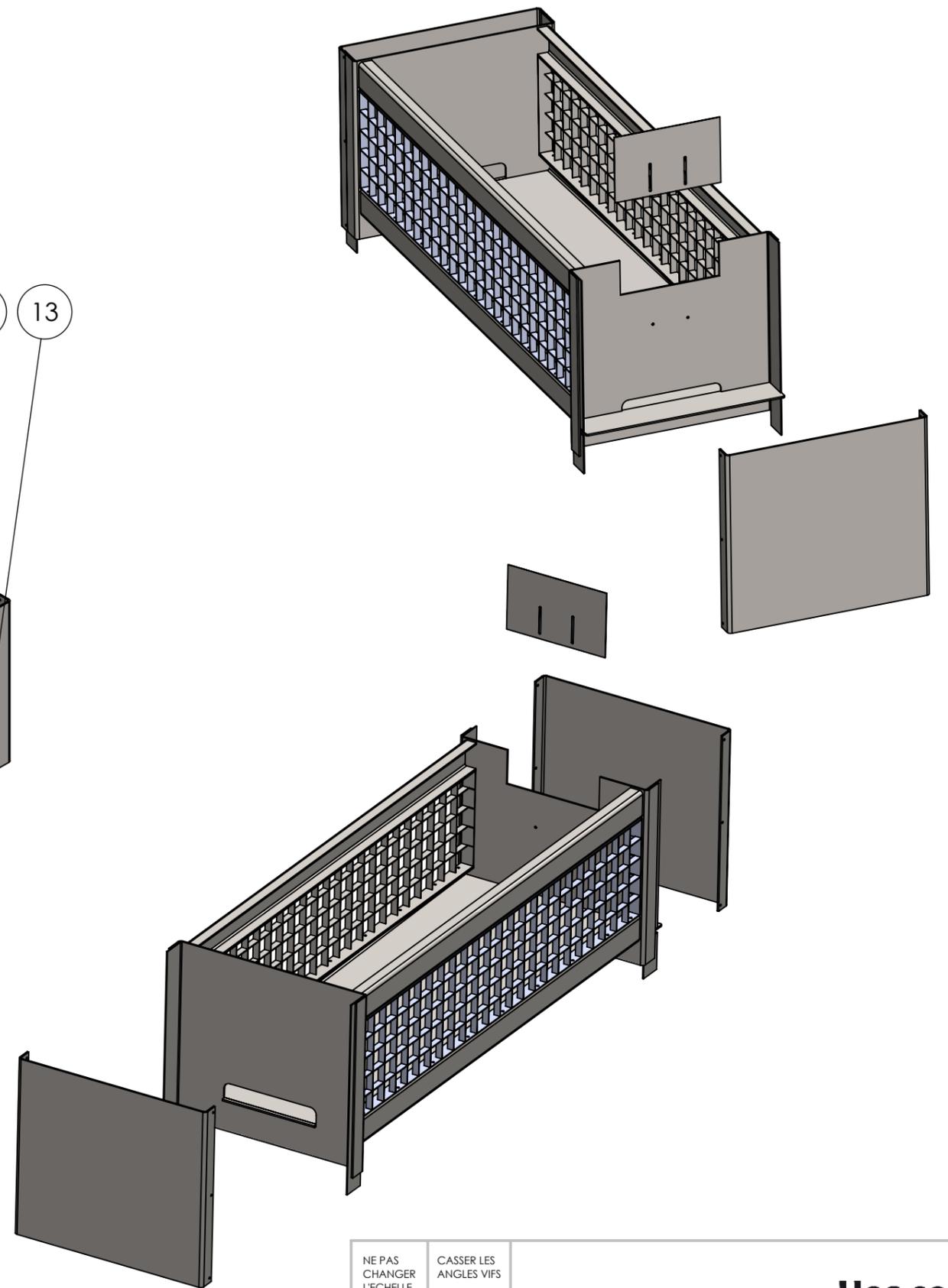
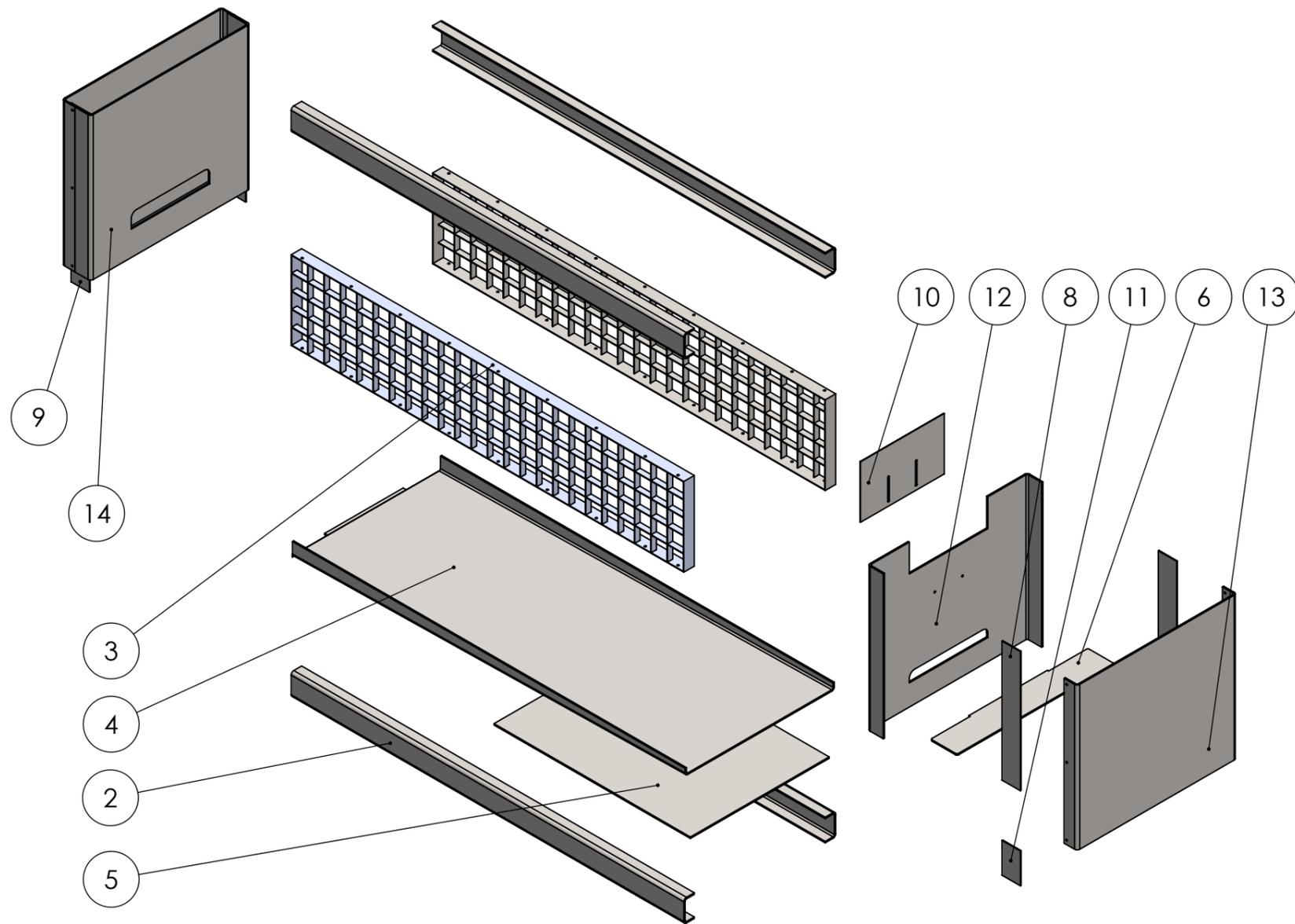


Plusieurs techniques permettront de donner vie aux flancs des cassettes métalliques. On peut imaginer de l'emboutissage, du sablage ou des agents chimiques. Certaines colorations sont envisageables.



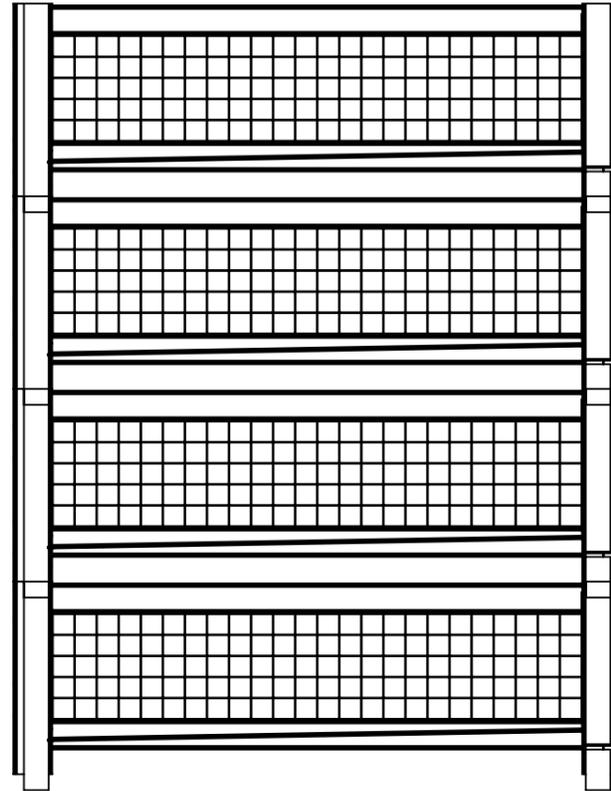
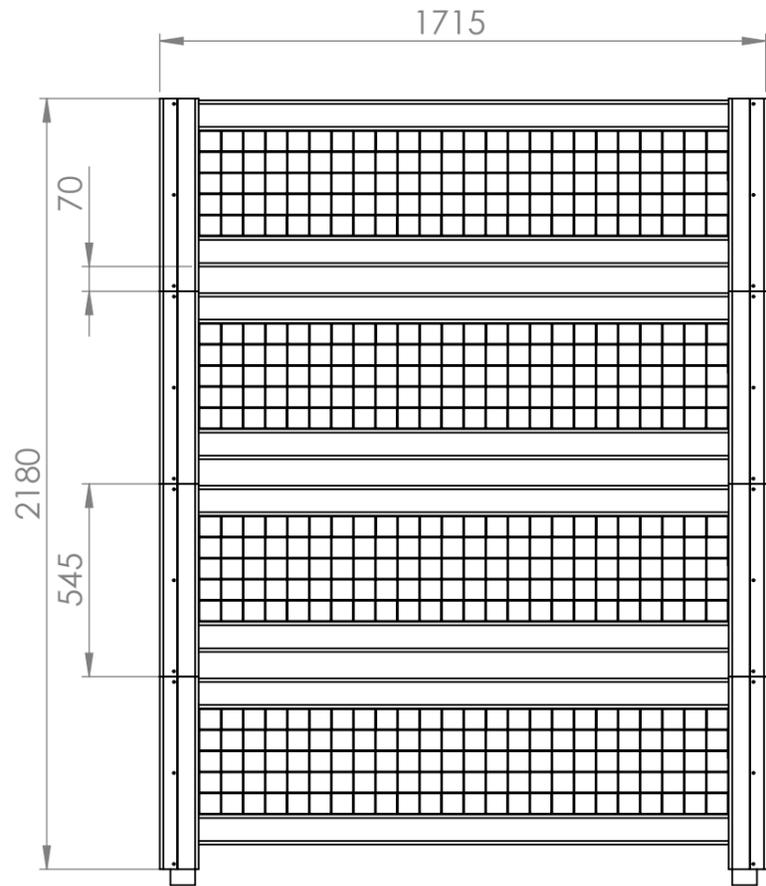
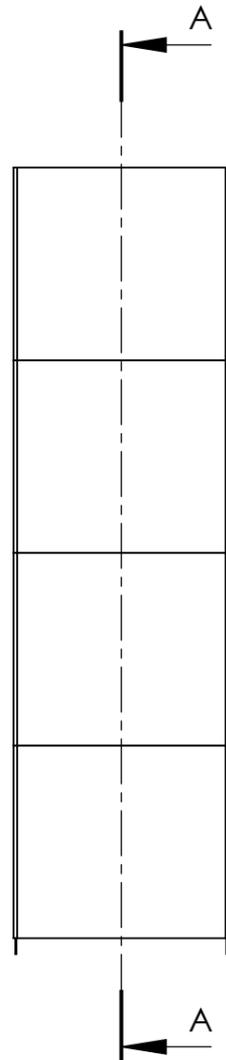
NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC <small>Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland</small>	
AUTEUR	AW		
DATE	18.11.2013		
VERSION	1		
MATERIAU: Inox	No. DE PLAN Cassette métallique	A3	
		ECHELLE:1:10	FEUILLE 1 / 4

Hes·so
 Haute Ecole Spécialisée
 de Suisse occidentale
 Fachhochschule Westschweiz
 University of Applied Sciences and Arts
 Western Switzerland

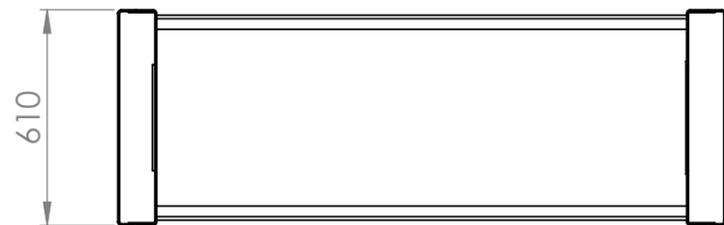


No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	MATÉRIAU	QTE	MASSE (KG)	REMARQUE
1	substrat	Substrat (imbibé)	1	375.8	
2	traverse_u	Inox	4	8.1	soudé à 2,12 et 14
3	caillebotis	Inox	2	5.8	
4	tôle_récup_eau_traitee	Inox	1	34.6	
5	tôle_amenée_eau_sale	Inox	1	14.5	
6	tôle bouchon_amenée_eau_sale	Inox	1	2.2	
7	nid_abeilles	PC	1	-	
8	reglette pour soudure 1	Inox	2	0.7	soudé à 12, vissé à 13
9	reglette pour soudure 2	Inox	2	0.9	soudé à 14, vissé à 13
10	tôle_réglage_lame_eau	Inox	1	0.9	
11	reglette pour soudure 3	Inox	2	0.2	soudé à 12, vissé à 13
12	flanc_droit	Inox	1	14.2	
13	capot	Inox	2	13.8	
14	flanc_gauche	Inox	1	14.2	
				TOTAL 515.9	

NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland	
AUTEUR	AW		
DATE	18.11.2013		
VERSION	1		
MATERIAU: Inox	No. DE PLAN Cassette métallique	A3	
	ECHELLE:1:15	FEUILLE 2/4	

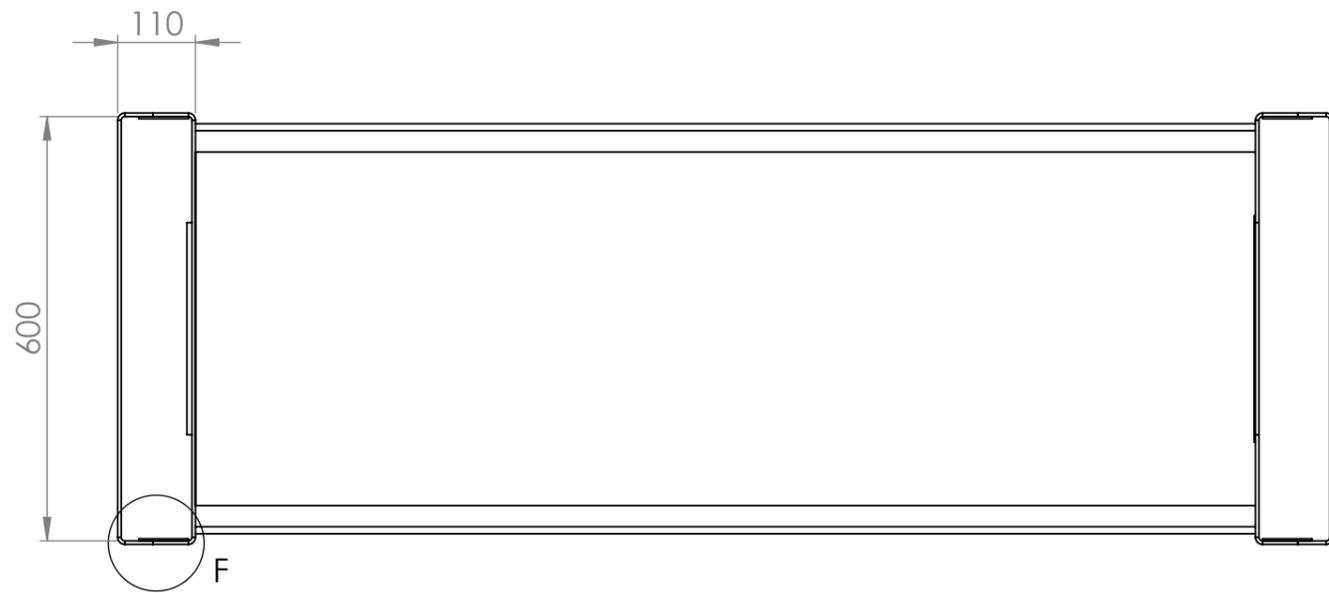
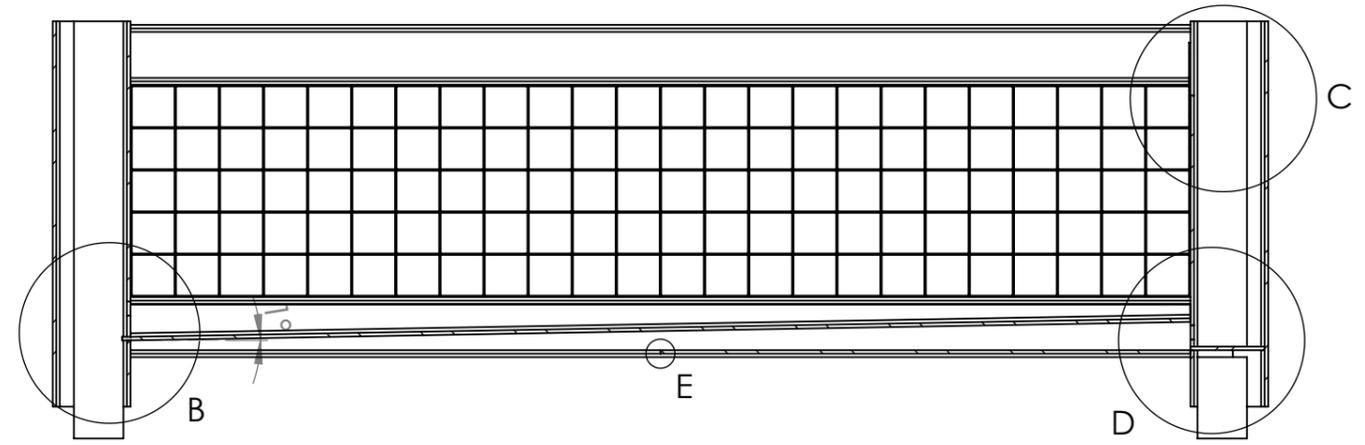
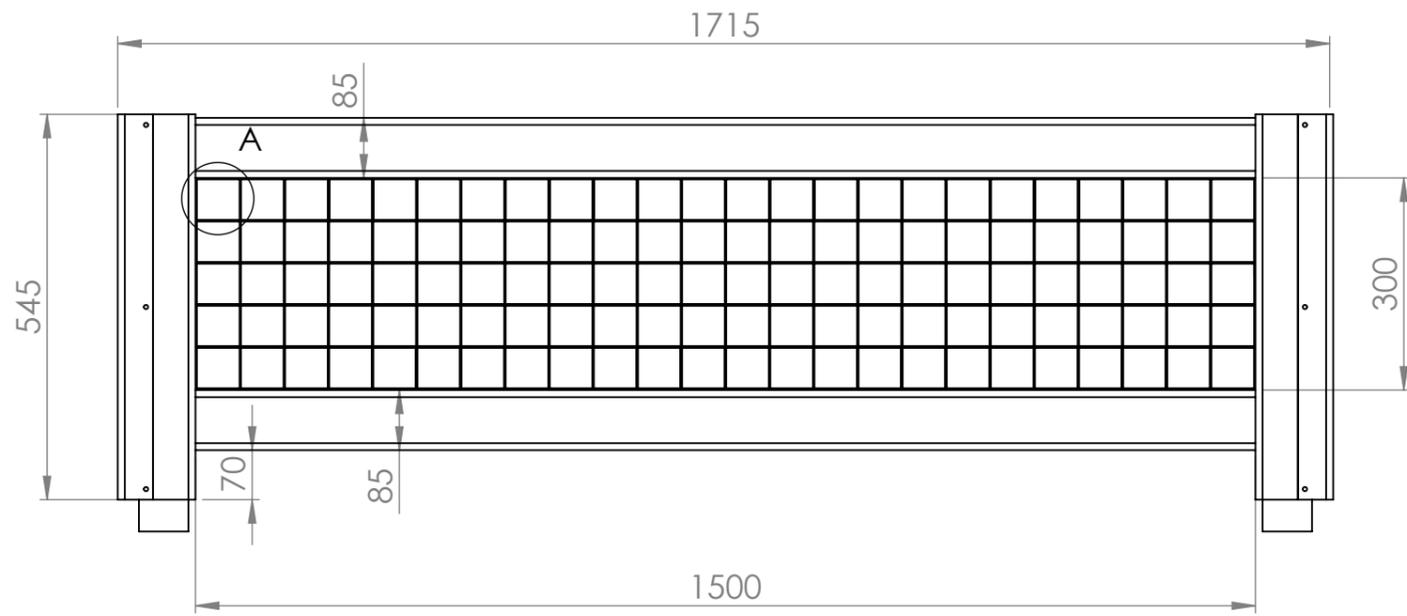


COUPE A-A

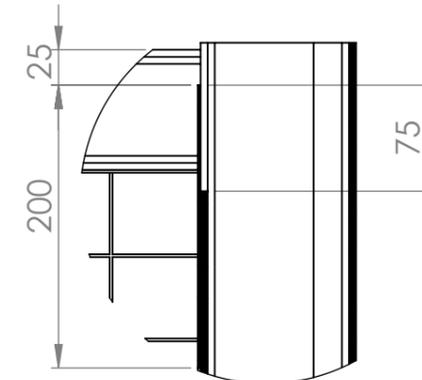


NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC <small>Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland</small>	
AUTEUR	AW		
DATE	18.11.2013		
VERSION	1		
MATERIAU: Inox	No. DE PLAN Cassette métallique	A3	
ECHELLE:1:20		FEUILLE 3 / 4	

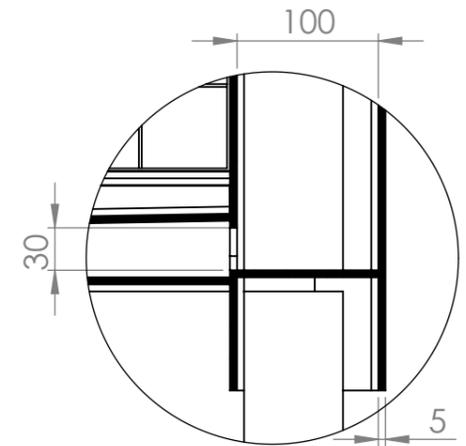
Hes·so
 Haute Ecole Spécialisée
 de Suisse occidentale
 Fachhochschule Westschweiz
 University of Applied Sciences and Arts
 Western Switzerland



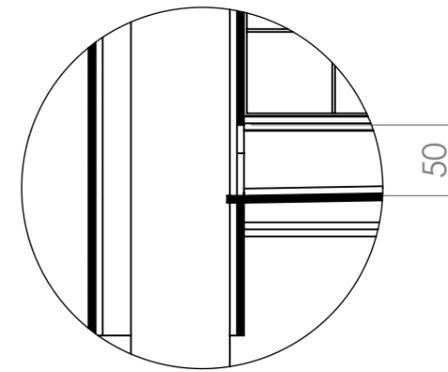
COUPE D-D



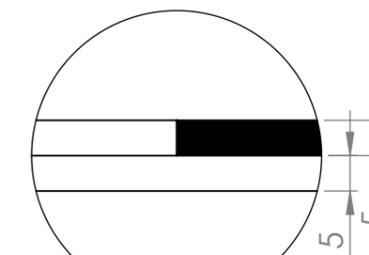
DÉTAIL C
ECHELLE 1 : 5



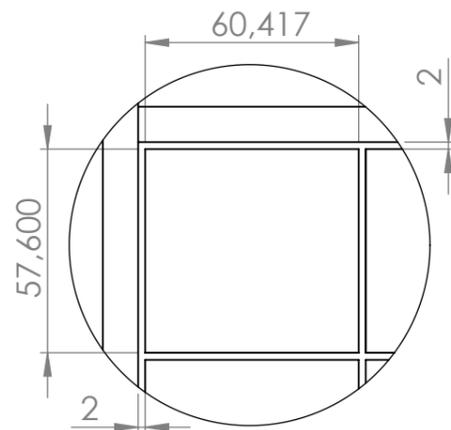
DÉTAIL D
ECHELLE 1 : 5



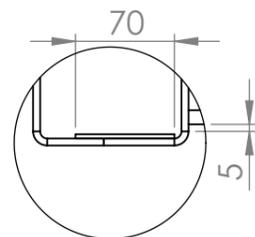
DÉTAIL B
ECHELLE 1 : 5



DÉTAIL E
ECHELLE 1 : 1



DÉTAIL A
ECHELLE 1 : 2



DÉTAIL F
ECHELLE 1 : 5

NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland	
AUTEUR	AW		
DATE	18.11.2013		
VERSION	1		
MATERIAU: Inox		No. DE PLAN Cassette métallique	A3
		ECHELLE:1:10	FEUILLE 4 / 4

Hes·so
 Haute Ecole Spécialisée
 de Suisse occidentale
 Fachhochschule Westschweiz
 University of Applied Sciences and
 Arts
 Western Switzerland

3.3 Offres sous-traitants

METAL INOX

Cassette complète

avec caillebotis maille sur mesure

Nb	Prix/unité	Mise en route	Total	Prix unité
1	2'450	480	2'930	2'930
4	1'960	480	8'320	2'080
50	1'800	480	90'480	1'810
100	1'680	480	168'480	1'685
1'000	1'590	480	1'590'480	1'590

Caillebotis uniquement, la paire

Mailles sur mesure

Nb	Prix/unité	Mise en route	Total	Prix unité
1	580	140	720	720
4	520	140	2'220	555
50	500	140	25'140	503
100	480	140	48'140	481
1'000	460	140	460'140	460

Caillebotis uniquement, la paire

Mailles 55/55 ou 66/66

Nb	Prix/unité	Mise en route	Total	Prix unité
1	426	0	426	426
4	362	0	1'448	362
50	300	0	15'000	300
100	239	0	23'900	239
1'000	206	0	206'000	206

Cassette complète et caillebotis sur mesure
> Tôlerie Industrielle d'Etagnière SA, Etagnière (VD)

Caillebotis, mailles standards
> Givel SA, Yverdon-les-Bains

En gris, chiffres interpolés

Coût des cassettes, prix en CHF, sans TVA 8%

BOIS ACCOYA

Nb	Bois	Transport	Total	Coût/unité
1	500	500	1'000	1'000
4	1'500	800	2'300	575
50	15'000	1'300	16'300	326
100	27'000	2'000	29'000	290
1'000	250'000	5'000	255'000	255

	Report	Caillebotis sur mesure	Tôle métal 15% bac métal	Menuiserie	Prix unité
1	1'000	720	440	2'300	4'460
4	575	555	312	750	2'192
50	326	503	271	600	1'700
100	290	481	253	490	1'514
1'000	255	460	239	350	1'304

Coût des cassettes, prix en CHF, sans TVA 8%

BETON

Nb	Prix/unité	Moule (50pces)	Total	Prix unité
1	4'000	20'000	24'000	24'000
4	4'000	20'000	36'000	9'000
50	4'000	20'000	220'000	4'400
100	4'000	40'000	440'000	4'400
1'000	4'000	400'000	4'400'000	4'400

Creabéton Matériaux SA, Lyss

Nb	Prix/unité	Moule (100pces)	Total	Prix unité
1			9'872	9'872
4				
50				
100			1'520	1'520
1'000				

Consortium Artbéton, Dénériaz SA, Lausanne

Remarque: Les offres n'indiquent pas le matériau utilisé pour le moule mais c'est sans doute du bois.
 Pour des séries supérieures à 100 pièces, un moule en métal est à envisager. Plus cher mais plus durable.

Tableau récapitulatif, prix unité

Nb	METAL INOX	BOIS ACCOYA	BETON
1	2'930	4'460	9'872
4	2'080	2'192	
50	1'810	1'700	
100	1'685	1'514	1'520
1'000	1'590	1'304	

3.4 Etude d'acceptabilité

Etude d'acceptabilité des structures filtrantes du projet Smart-Clean City (SMACC)

Florian Dufour, collaborateur scientifique Heig-Vd

Mélanie Vessaz, collaboratrice scientifique Heig-Vd

Etude d'acceptabilité des structures filtrantes du projet Smart-Clean City (SMACC)

Rapport réalisé par :

Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD), Institut IDE

M. Florian Dufour & Mme Mélanie Vessaz, collaborateurs scientifiques

Contact : florian.dufour@heig-vd.ch

Tél. : 0245572170

Secrétariat

Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. +41 (0)24 557 76 00
Fax +41 (0)24 557 76 01
E-mail: info@heig-vd.ch

1.	Contexte	2
2.	Problématique	2
3.	Méthodologie	3
3.1	Participants.....	3
3.2	Procédure	3
3.3	Mesures/variables indicatrices	4
3.3.1	Caractéristiques socio-démographiques	4
3.3.2	Connaissances liées au traitement des eaux.....	5
3.3.3	Attitude vis-à-vis de la pollution des routes	5
3.3.4	Attitude vis-à-vis des structures végétalisées (bacs) et du dispositif.....	6
3.3.5	Dépôt de débris et dégradations éventuelles	7
4.	Résultats	8
4.1	Caractéristiques socio-démographiques.....	8
4.2	Connaissances liées au traitement des eaux.....	10
4.3	Attitude vis-à-vis de la pollution des routes	11
4.4	Attitude vis-à-vis des structures végétalisées (bacs) et du dispositif.....	13
4.5	Dépôt de débris et dégradations éventuelles.....	19
5.	Enseignements/Recommandations	21
6.	Conclusion.....	23
7.	Bibliographie.....	23
8.	Annexes	23

Secrétariat

Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. +41 (0)24 557 76 00
Fax +41 (0)24 557 76 01
E-mail: info@heig-vd.ch

1. Contexte

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre de la demande de l'équipe interdisciplinaire du projet Smart-Clean City (SMACC, projet CALL HES-SO) de réaliser une étude d'acceptabilité d'une nouvelle technologie permettant de filtrer les eaux de ruissellement des routes. Cette technologie se présente sous la forme de parois de dimensions variables accueillant des bacs de terreaux permettant le développement de végétaux. Cette structure végétalisée permet de filtrer et traiter l'eau de ruissellement des routes contenant des micro-polluants issus de la circulation des véhicules à travers un cycle complet de purification des eaux. Le déploiement dans les villes de ce type de structure pourrait amener une solution technologique très intéressante aux problèmes des eaux souillées par les véhicules. Etant donné que ces structures devront être intégrées directement à l'environnement urbain, la question de leur acceptation par les citoyens reste de prime importance.

2. Problématique

Dans le cadre du projet SMACC qui souhaite connaître les attitudes des individus concernant les structures végétalisées apportant une solution innovante au traitement des eaux de ruissellement des routes, une étude d'acceptabilité de la dite structure a été mise en place afin de recueillir *in situ* les connaissances, attitudes et avis des individus concernant cette thématique et ces structures végétalisées.

Cette problématique a été développée par les équipes du projet SMACC et l'enquête mise en place a été élaborée en collaboration avec ces équipes. L'étude s'intéressait spécifiquement à l'ensemble des questions, regroupées par thématiques, figurant ci-dessous.

Questions adressées par l'étude :

- Quel est l'état des connaissances du public interrogé vis-à-vis du traitement des eaux de pluie et de ruissellement des routes ?
- Quels sont les avis et attitudes du public interrogé vis-à-vis de la pollution de l'eau sur les routes? Est-ce considéré comme un problème à résoudre ?
- Quels sont les avis et attitudes du public interrogé vis-à-vis des structures végétalisées ? Ces structures sont-elles perçues comme utiles et adéquates pour aider à régler ce problème de la pollution de l'eau sur les routes ? Ces structures sont-elles considérées comme esthétiques et bien intégrées à l'environnement urbain ? Existe-t-il une préférence pour une version en bois ou en acier de ces structures ?
- Quels types de débris pourraient être laissés dans ces structures et quels types de dégradations pourraient être commis ?

Secrétariat

Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. +41 (0)24 557 76 00
Fax +41 (0)24 557 76 01
E-mail: info@heig-vd.ch

3. Méthodologie

3.1 Participants

L'échantillon était composé de 85 participants ayant répondu au questionnaire (38 femmes et 47 hommes).

3.2 Procédure

Un prototype d'une structure du projet SMACC a été installé à la Plaine de Plainpalais de Genève le 06 novembre 2014 (voir figure 1). Quelques jours après cette installation, deux enquêtrices (étudiantes en Bachelor 3^{ème} année d'économie d'entreprise à la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud) ont abordé les personnes passant à proximité du dit prototype afin de leur soumettre un questionnaire destiné à recueillir leurs avis sur cette structure (également appelée bac dans la suite de ce document). La récolte de données s'est déroulée à deux moments distincts, les samedi 15 et 22 novembre 2014. Il est à noter que le samedi est jour de marché aux puces et brocante à la plaine de Plainpalais.

Les enquêtrices abordaient les individus à proximité de la structure et leur proposaient de participer à une enquête par questionnaire qui s'intéressait à leur avis sur cette structure végétalisée. Les volontaires pouvaient alors commencer à passer le questionnaire. La première page du questionnaire (voir annexe 1) contenait un texte présentant plus en détails le but de l'étude et les conditions de la récolte de données (anonymat des réponses, etc.). Le questionnaire était divisé en quatre parties :

- la première partie comprenait des questions générales dites de mise en confiance
- la seconde partie contenait les questions concernant le traitement des eaux de ruissellement
- la troisième partie contenait un paragraphe décrivant plus en détail la structure et ses fonctionnalités puis les questions portant sur la structure
- la quatrième partie était destinée à compléter les informations sur le profil du répondant.

Une fois le questionnaire complété, les participants étaient remerciés et invités à se rendre sur un site Internet dans le cas où ils souhaitaient obtenir des renseignements complémentaires sur le projet SMACC.

Secrétariat

Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. +41 (0)24 557 76 00
Fax +41 (0)24 557 76 01
E-mail: info@heig-vd.ch



Figure 1 : Prototype d'une structure filtrante du projet SMACC composé d'un panneau en métal et d'un panneau en bois installée pour le bien de l'étude sur la plaine de Plainpalais.

3.3 Mesures/variables indicatrices

Le questionnaire comprenait une série de questions renvoyant à diverses variables d'intérêt dérivées de la problématique de l'étude. L'ensemble de ces mesures/variables indicatrices sont regroupées par catégories et détaillées ci-dessous.

3.3.1 Caractéristiques socio-démographiques

- **Genre** (annexe 1, question 17) : les participants devaient indiquer leur genre (femme vs. homme).
- **Age** (annexe 1, question 18) : les participants devaient indiquer leur âge en choisissant une des tranches d'âges proposées (<20 ans vs. 20 à 29 ans vs. 30 à 39 ans vs. 40 à 49 ans vs. 50 à 59 ans vs. 60 an et plus).
- **Milieu d'habitation** (annexe 1, question 19) : les participants devaient indiquer dans quel milieu ils habitaient en choisissant parmi trois propositions (en ville vs. en banlieue vs. en campagne).
- **Lieu d'habitation** (annexe 1, question 1) : les participants devaient indiquer s'ils habitaient ou non dans la ville de Genève et, le cas échéant, depuis combien de temps.
- **Lieu d'activité professionnelle** (annexe 1, question 2) : les participants devaient indiquer s'ils travaillaient ou non dans la ville de Genève et, le cas échéant, depuis combien de temps.

Secrétariat

Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. +41 (0)24 557 76 00
Fax +41 (0)24 557 76 01
E-mail: info@heig-vd.ch

- **Fréquentation de la plaine de Plainpalais** (annexe 1, question 3) : les participants devaient indiquer leur fréquence de passage par la plaine de Plainpalais lors des deux dernières semaines (c'est la première que vous passez par la plaine de Plainpalais vs. une fois par semaine vs. plusieurs fois par semaine vs. une fois par jour vs. plusieurs fois par jour).

3.3.2 Connaissances liées au traitement des eaux

- **Connaissances subjectives auto-rapportées concernant le traitement des eaux de pluie et de ruissellement** (annexe 1, question 4) : les participants devaient indiquer comment ils qualifiaient les connaissances qu'ils pensaient avoir à ce sujet (échelle de 1= aucune connaissance à 6 = de très bonnes connaissances).
- **Connaissances objectives auto-rapportées concernant le traitement des eaux de pluie et de ruissellement** (annexe 1, question 5) : les participants devaient indiquer quel était, selon eux, le mode de traitement des eaux de pluie et de ruissellement parmi quatre propositions dont une seule était correcte (traitées par la station d'épuration vs. retournent à la nature une fois traitées par la station d'épuration vs. *ne sont pas traitées par la station d'épuration et retournent directement dans la nature* vs. je ne sais pas).

3.3.3 Attitude vis-à-vis de la pollution des routes

- **Problème de la pollution de l'eau sur les routes** (annexe 1, question 6) : les participants devaient indiquer à quel point ils trouvaient que ce type de pollution constitue un problème (échelle de 1= pas du tout un problème à 6 = un très sérieux problème).
- **Nécessité d'investir des ressources pour traiter la pollution de l'eau sur les routes** (annexe 1, question 7) : les participants devaient indiquer s'ils trouvaient nécessaire ou non d'investir de telles ressources (oui vs. non).
- **Priorité d'investir des ressources pour traiter la pollution de l'eau sur les routes** (annexe 1, question 8) : les participants devaient indiquer s'ils trouvaient prioritaire ou non d'investir de telles ressources (oui vs. non).
- **Importance de traiter la pollution de l'eau sur les routes** (annexe 1, question 9) : les participants devaient indiquer à quel point ils trouvaient important de traiter cette pollution (échelle de 1= pas important du tout à 6 = extrêmement important).

Secrétariat

3.3.4 Attitude vis-à-vis des structures végétalisées (bacs) et du dispositif

- **Utilité des bacs** (annexe 1, question 10) : les participants devaient indiquer s'ils trouvaient que ce type de bacs était utile ou non pour contribuer au traitement des eaux de pluie et de ruissellement des routes (oui vs. non).
- **Apport bonus des bacs** (annexe 1, question 11) : les participants devaient indiquer s'ils trouvaient que ce type de bacs pouvait apporter quelque chose de plus dans le traitement des eaux usées (oui vs. non) puis avaient le choix d'indiquer la ou les raisons de leur réponse.
- **Critère esthétique d'intégration des bacs** (annexe 1, question 12) : les participants devaient indiquer à quel point ils étaient en désaccord ou en accord avec l'affirmation « esthétiquement, ces bacs s'intègrent bien au paysage urbain » (échelle de 1= pas du tout d'accord à 6 = tout à fait d'accord).
- **Volume des bacs** (annexe 1, question 12) : les participants devaient indiquer à quel point ils étaient en désaccord ou en accord avec l'affirmation « ces bacs sont trop volumineux » (échelle de 1= pas du tout d'accord à 6 = tout à fait d'accord).
- **Emprise des bacs** (annexe 1, question 12) : les participants devaient indiquer à quel point ils étaient en désaccord ou en accord avec l'affirmation « l'emprise de ces bacs sur l'espace urbain est trop importante » (échelle de 1= pas du tout d'accord à 6 = tout à fait d'accord).
- **Impact des bacs sur le paysage** (annexe 1, question 12) : les participants devaient indiquer à quel point ils étaient en désaccord ou en accord avec l'affirmation « ces bacs jurent dans le paysage » (échelle de 1= pas du tout d'accord à 6 = tout à fait d'accord).
- **Végétation des bacs** (annexe 1, question 12) : les participants devaient indiquer à quel point ils étaient en désaccord ou en accord avec l'affirmation « la végétation proposée est adéquate » (échelle de 1= pas du tout d'accord à 6 = tout à fait d'accord).
- **Installation des bacs** (annexe 1, question 12) : les participants devaient indiquer à quel point ils étaient en désaccord ou en accord avec l'affirmation « ces bacs devraient être installés de manière permanente à Genève » (échelle de 1= pas du tout d'accord à 6 = tout à fait d'accord).
- **Version préférée des bacs** (annexe 1, question 13) : les participants devaient indiquer leur préférence vis-à-vis des versions acier ou bois des bacs (version en bois vs. version en acier vs. les deux versions me plaisent tout autant vs. aucune des deux) puis devaient, s'ils le souhaitaient, indiquer la ou les raisons de leur choix.

Secrétariat

- **Autre commentaire à propos de ces bacs** (annexe 1, question 16) : les participants disposaient d'une question placée en toute fin du questionnaire pour indiquer s'ils avaient ou non d'autres commentaires à propos de ces bacs (oui vs. non). Ils pouvaient ensuite, le cas échéant, indiquer directement leur(s) commentaire(s).

3.3.5 Dépôt de débris et dégradations éventuelles

- **Dépôt de divers débris** (annexe 1, question 14) : les participants devaient indiquer si des personnes pourraient être tentées ou non de déposer dans les bacs :
 - o des mégots de cigarettes (oui vs. non).
 - o des bouteilles en PET (oui vs. non).
 - o des chewing-gums (oui vs. non).
 - o des emballages (oui vs. non).
 - o des canettes (oui vs. non).
 - o des papiers (oui vs. non).
- **Dégradations éventuelles diverses** (annexe 1, question 14) : les participants devaient indiquer si les dégradations suivantes pouvaient être faites ou non aux bacs :
 - o déjections d'animaux (oui vs. non).
 - o végétaux arrachés (oui vs. non).
 - o bacs détruits (oui vs. non).
 - o autocollants (oui vs. non).
 - o tags (oui vs. non).
 - o autres type de dégradation à préciser librement.

Secrétariat

4. Résultats

4.1 Caractéristiques socio-démographiques

Sexe et âge

L'échantillon était composé de 38 femmes (45%) et de 47 hommes (55%) sur un total de 85 participants. Si la proportion d'hommes a été plus importante que celle des femmes dans l'échantillon, un test de khi carré d'ajustement a indiqué que cette différence de proportion n'était pas significative ($\chi^2(1) = 0.95$; $p = 0.33$) et qu'ainsi la population dont était issu cet échantillon contenait probablement un nombre similaire d'hommes et de femmes. La distribution de l'âge des participants a indiqué que 70% de l'échantillon était âgé de 40 ans ou plus (voir figure 2), la catégorie la plus fréquemment retrouvée, qui représente aussi la médiane de la distribution, étant la catégorie des personnes âgées de 50 à 59 ans. Sachant que la médiane de l'âge des habitants de la ville de Genève (centre et agglomération) se situe autour des 40 ans et que l'âge médian des habitants des grandes agglomérations suisses est relativement proche de cette valeur (OFS, 2014), l'âge médian de notre échantillon est plus élevé que ce à quoi on aurait pu s'attendre s'il avait été strictement représentatif des genevois ou des suisses (en terme d'âge). Ceci dit, cela ne remet pas en question la qualité des réponses obtenues ou des informations que l'on peut en tirer.

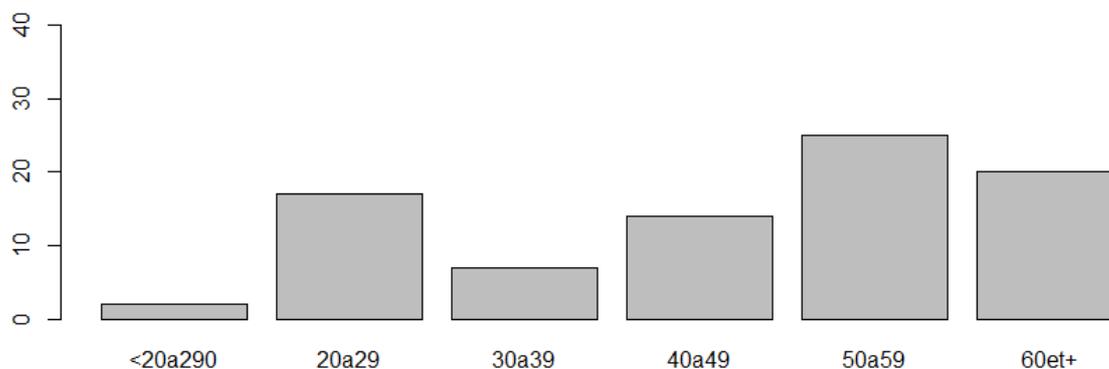


Figure 2. Distribution de l'âge des participants.

Lieu et milieu d'habitation

Les participants ont reporté en majorité habiter dans un milieu urbain (60 ; 71% ; $\chi^2(2) = 53$; $p < 0.001$, voir figure 3). Sans trop de surprise, les participants s'étant déclarés comme genevois (59; 69% ; $\chi^2(1) = 12.8$; $p < 0.001$) habitaient également majoritairement dans un milieu urbain (47 ; 80%, voir tableau 1). Les genevois ont indiqué habiter Genève depuis 30 ans en moyenne (écart-type = 20.92 ; médiane = 26.5). En ce qui concerne les non

Secrétariat

genevois, la même constatation a pu être faite, avec une population issue d'un habitat plutôt urbain (13 ; 50%, voir tableau1).

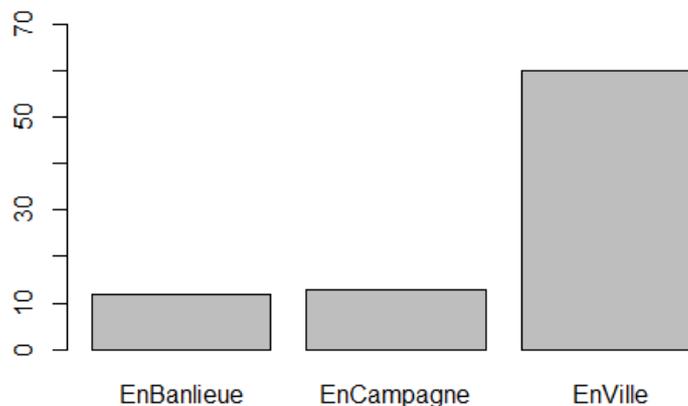


Figure 3. Distribution du milieu d'habitation des participants.

Tableau 1. Croisement des réponses aux variables milieu d'habitation et lieu d'habitation

	Milieu d'habitation		
	En banlieue	En campagne	En ville
N'habite pas à Genève	4	9	13
Habite à Genève	8	4	47

Lieu de travail

La proportion de participants ne travaillant pas à Genève était comparable à celle y travaillant (42 vs. 43 ; $\chi^2(1) = 0.01$; $p = 0.91$), ces derniers exerçant leur activité professionnelle à Genève depuis 18 ans en moyenne (écart-type = 15 ; médiane = 18).

En résumé

L'échantillon était composé d'un nombre comparable de femmes et d'hommes mais était relativement âgé avec une majorité de participants habitant à Genève depuis une période de temps relativement longue. De manière générale, la plupart des participants habitaient en ville, avec environ la moitié d'entre eux exerçant une activité professionnelle à Genève. Mis à part son âge médian relativement élevé, cet échantillon correspond relativement bien au public auquel on aurait pu s'attendre. Le fait de disposer d'une population plutôt urbaine représente évidemment un atout pour cette étude étant donné la volonté de recueillir les avis des premiers intéressés au déploiement des structures du projet SMACC, c'est-à-dire les citoyens.

Secrétariat

4.2 Connaissances liées au traitement des eaux

Connaissances subjectives et objectives

Les participants ont reporté disposer de peu de connaissances à propos du traitement des eaux usées et polluées sur les routes (moyenne = 2.48 ; écart-type = 1.59 ; médiane = 2, voir figure 4), la distribution de cette variable étant clairement asymétrique avec une proportion de connaissances nulles à faibles significativement plus importante que celle des bonnes à excellentes connaissances ($\chi^2(5) = 37.61$; $p < 0.001$). Cette méconnaissance a été confirmée par les réponses à la question dite objective (*i.e.*, avec une réponse correcte, voir figure 5) touchant au devenir des eaux usées. En effet, si la réponse la plus fréquente donnée a effectivement été la réponse correcte (32 ; 37.7%), la majorité des participants ont soit donné une mauvaise réponse (37 ; 43.5%) soit indiqué ne pas savoir (16 ; 18.8%). La distribution de cette variable ne renvoyait néanmoins pas à une distribution théorique liée à des réponses choisies purement au hasard ($\chi^2(3) = 10.29$; $p = 0.02$).

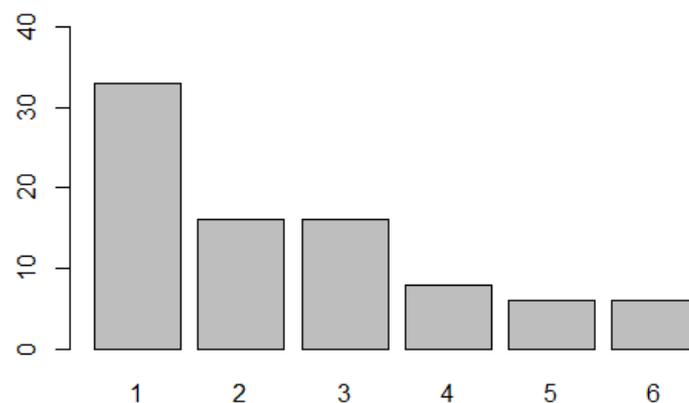


Figure 4. Distribution des réponses à la question portant sur les connaissances subjectives auto-rapportées vis-à-vis du traitement des eaux usées et polluées sur les routes.

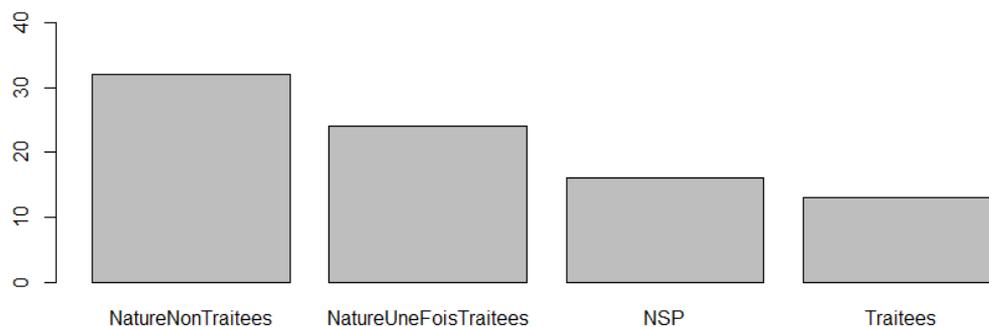


Figure 5. Distribution des réponses à la question portant sur les connaissances objectives auto-rapportées vis-à-vis du traitement des eaux usées et polluées sur les routes.

Secrétariat

Analyse complémentaire

Cette connaissance limitée de la thématique est confirmée par d'autres résultats. En effet, il ne semble pas exister de lien entre les connaissances subjectives déclarées et le choix de la bonne réponse (voir tableau 2). L'analyse du tableau 2 nous indique que la réponse correcte a été donnée en majorité par les participants ayant déclarés avoir les moins bonnes connaissances du sujet (*i.e.*, les trois premières modalités de la variable de connaissances subjectives, soit 24 participants, ce qui correspond à 75% du total des réponses correctes). Autrement dit, contrairement à ce que l'on aurait pu attendre en cas de bonnes connaissances subjectives de la thématique, la bonne réponse a été significativement plus choisie par les participants ayant reportés disposer des moins bonnes connaissances sur le sujet ($\chi^2(5) = 12.25$; $p = 0.03$).

Tableau 2. Croisement des réponses aux variables connaissances objectives et connaissances subjectives.

		Connaissances objectives			
		Eaux retournent à la nature non traitées	Eaux retournent à la nature une fois traitées	Eaux sont traitées	Ne sais pas
Connaissances subjectives	1 = aucune connaissance	10	6	8	9
	2	5	4	2	5
	3	9	6	1	0
	4	5	3	0	0
	5	2	2	1	1
	6 = de très bonnes connaissances	1	3	1	1

En résumé

Il ressort de ces analyses des connaissances qu'elles ont à la fois été perçues comme limitées par les participants eux-mêmes et, qu'effectivement, elles se sont révélées de faible qualité.

4.3 Attitude vis-à-vis de la pollution des routes

Caractère sérieux de la pollution de l'eau et importance accordée à ce problème

Les participants ont considéré la pollution de l'eau sur les routes comme représentant un problème relativement sérieux (moyenne = 4.22 ; écart-type = 1.60 ; médiane = 4, voire figure 6). En effet, la modalité la plus fréquemment choisie a été celle

Secrétariat

donnant le problème comme très sérieux (25 ; 29%). La figure 6 indique que les modalités les plus exprimées ont été celles présentant le problème comme s'échelonnant de relativement sérieux à très sérieux, ce qui c'est traduit statistiquement par un test de khi carré significatif révélateur de ces fréquences relatives plus élevées que celles du reste de la distribution ($\chi^2(5) = 17.99$; $p < 0.01$). Cette préoccupation vis-à-vis de la pollution de l'eau s'est retrouvée dans l'importance accordée au traitement de l'eau des routes par les participants (moyenne = 4.31 ; écart-type = 1.40 ; médiane = 4 ; $\chi^2(5) = 22.29$; $p < 0.001$, voire figure 7). La cohérence entre les réponses pour les variables de sérieux du problème et d'importance du traitement de l'eau s'est révélée relativement élevée (corrélation de Spearman = 0.52 ; $p < 0.001$). En moyenne, plus les individus ont déclaré le problème comme sérieux et plus ils ont également déclaré important de traiter l'eau des routes.

Nécessité et priorité à l'investissement de ressources

Cette préoccupation chez les participants s'est aussi traduite par le très fort accord concernant la nécessité d'investir des ressources pour traiter la pollution de l'eau (75 oui ; 88% ; $\chi^2(1) = 49.71$; $p < 0.001$) associé à une majorité de participants (même si l'accord est moins massif) considérant également cet investissement comme prioritaire (54 oui ; 64% ; $\chi^2(1) = 6.22$; $p = 0.01$). Le lien entre ces variables s'est révélé positif et significatif (corrélation phi = 0.41 ; $p < 0.001$) mais d'importance plutôt modéré (ce qui s'explique par la distribution univariée des variables).

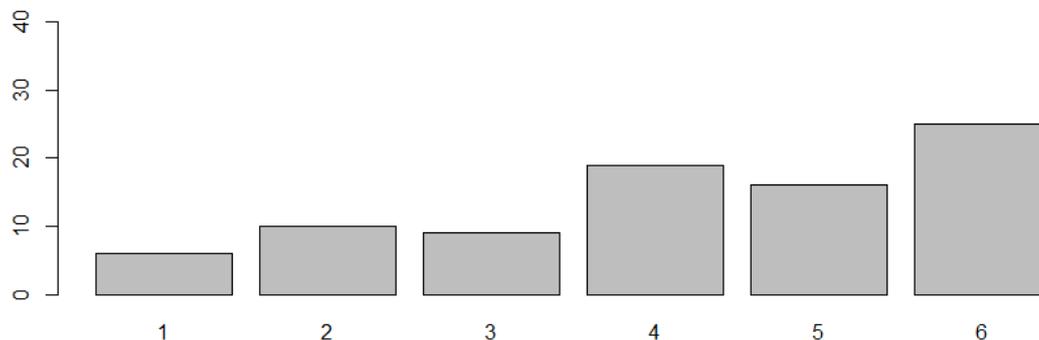


Figure 6. Distribution des réponses à la question portant sur le caractère « sérieux » du problème de la pollution des routes.

Secrétariat

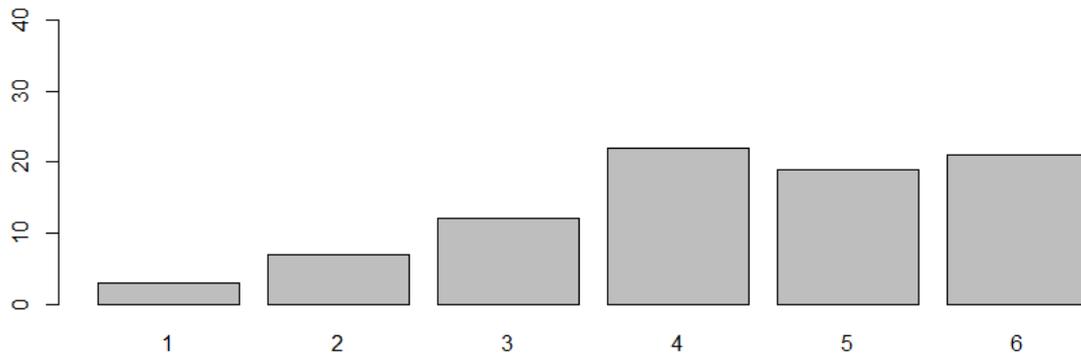


Figure 7. Distribution des réponses à la question portant sur l'importance de traiter la pollution de l'eau sur les routes.

En résumé

La cohérence et le consensus important décrit à travers l'analyse de ces résultats traduit une véritable conscience des participants du problème du traitement des eaux des routes ainsi que de la nécessité de le traiter.

4.4 Attitude vis-à-vis des structures végétalisées (bacs) et du dispositif

Utilité de la structure des bacs pour traiter les eaux polluées

La structure de bacs végétalisés a été perçue par une grande majorité de participants comme a) apportant une contribution utile à la résolution du problème du traitement des eaux polluées (78 ; 92% ; $\chi^2(1) = 61.71$; $p < 0.001$) et b) apportant un réel plus dans ce traitement (82 ; 97.5% ; $\chi^2(1) = 73.42$; $p < 0.001$), la cohérence entre les réponses à ces deux variables étant sans aucune surprise importante et significative (corrélation phi = 0.69 ; $p < 0.001$). Les raisons évoquées par les participants concernant le plus apporté par la structure sont diverses. Cependant les réponses (au nombre de 50) les plus fréquemment observées peuvent être classées en plusieurs catégories. Tout d'abord, plusieurs participants (7) ont justifié leur réponse positive en s'appuyant sur « ce qui a été dit » (dans le texte du questionnaire et la présentation de l'étude). D'autres participants (12) ont repris ce type d'explication mais en la rendant conditionnelle (e.g. : « si ça fonctionne vraiment » [c'est un plus] ou encore « s'il y a assez de bacs » [c'est un plus]), autrement dit, quelques doutes ont émané vis-à-vis de l'efficacité des structures, un autre participant a ainsi déclaré ne pas comprendre comment ce traitement était possible et a demandé d'obtenir plus de détails. Ensuite, une raison évoquée par cinq participants était qu'étant donné qu'il n'existe rien pour le moment pour traiter ces eaux polluées, cela rendait *de facto* la solution intéressante. Le fait d'utiliser des plantes pour cela a été perçu comme un réel plus par trois participants.

Secrétariat

La structure a également été très positivement évaluée par six participants qui l'ont trouvée soit originale, sympathique, esthétique (2), positive et constituant une bonne idée. Enfin, deux participants ont évalué l'idée comme positive mais non forcément comme la meilleure solution.

Esthétisme et intégration au paysage urbain

Concernant les évaluations liées à l'esthétisme des bacs, les participants ont très nettement jugé les bacs comme s'intégrant bien au paysage urbain (57 participants ayant répondu la modalité représentant le plus grand accord, soit 68% de l'échantillon) avec une distribution (voir figure 8) non équivoque des réponses (moyenne = 5.29 ; écart-type = 1.29 ; médiane = 6). Les bacs n'ont ni été perçus a) comme trop volumineux (moyenne = 1.55 ; écart-type = 1.13 ; médiane = 1 avec 61 participants ayant répondu la modalité représentant le moins grand accord, voir figure 9) b) comme ayant une emprise trop importante sur l'espace urbain (moyenne = 1.81 ; écart-type = 1.41 ; médiane = 1 avec 54 participants ayant répondu la modalité représentant le moins grand accord, voir figure 10) ou encore c) comme jurant dans le paysage (moyenne = 1.45 ; écart-type = 1.02 ; médiane = 1 avec 63 participants ayant répondu la modalité représentant le moins grand accord, voir figure 11).

Spécifiquement à propos de la végétation contenue dans les bacs, les participants l'ont majoritairement trouvée tout à fait adéquate (moyenne = 5.22 ; écart-type = 1.09, médiane = 6 avec 47 participants ayant répondu la modalité représentant le plus grand accord, soit 57% de l'échantillon, voir figure 12).

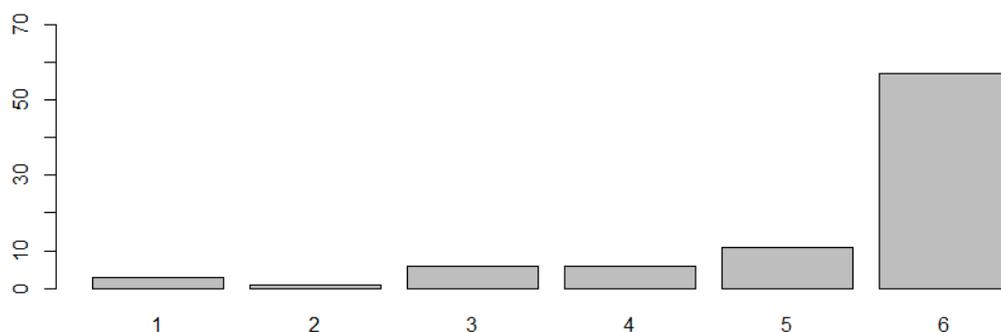


Figure 8. Distribution des réponses à la question portant sur l'intégration des bacs au paysage urbain du point de vue de l'esthétisme.

Secrétariat

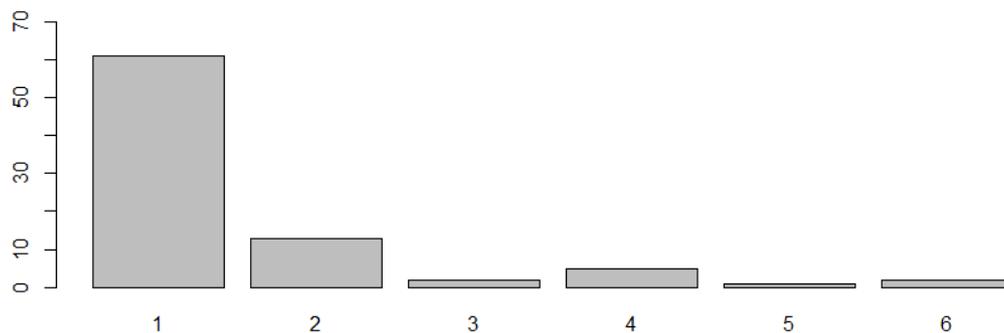


Figure 9. Distribution des réponses à la question portant sur l'aspect trop volumineux des bacs.

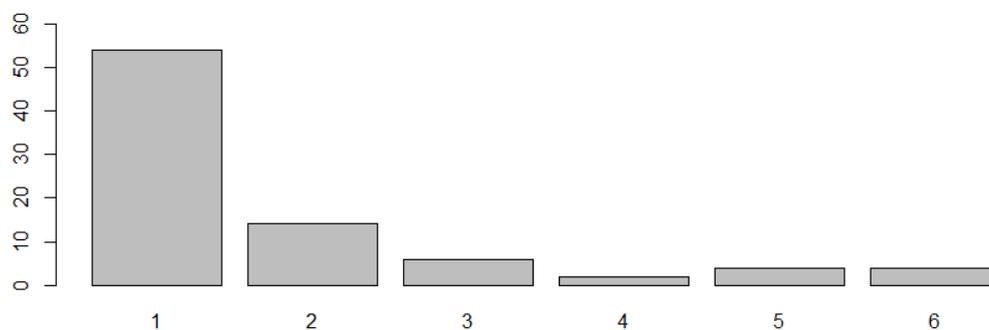


Figure 10. Distribution des réponses à la question portant sur l'emprise trop importante des bacs sur l'espace urbain.

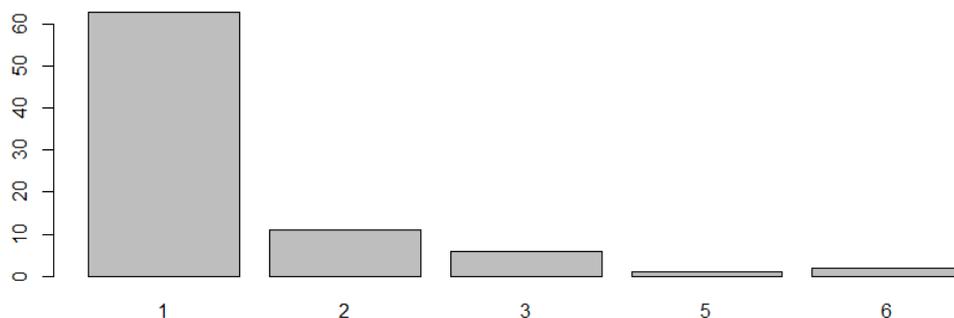


Figure 11. Distribution des réponses à la question portant sur le fait que les bacs jurent dans le paysage.

Secrétariat

Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. +41 (0)24 557 76 00
Fax +41 (0)24 557 76 01
E-mail: info@heig-VD.ch

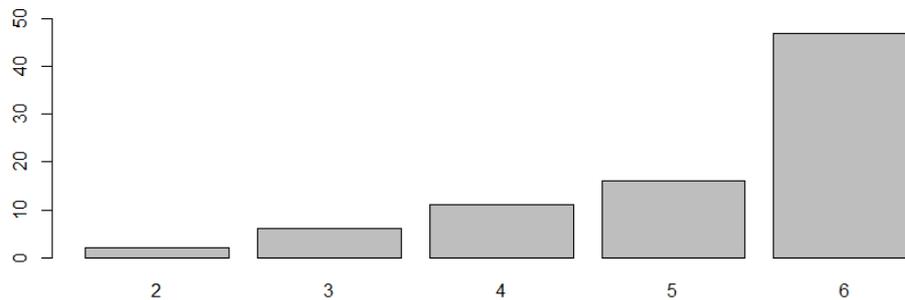


Figure 12. Distribution des réponses à la question portant sur le niveau adéquat de végétation.

Analyse complémentaire :

Une analyse plus approfondie des cinq variables de cette partie a été menée afin de comprendre leurs liens. Nous avons modélisé ces liens au moyen d'une analyse factorielle basée sur la matrice des corrélations polychoriques étant donné le type des variables et leurs distributions très asymétriques. Une analyse parallèle a été effectuée afin de déterminer le nombre de facteurs à retenir. Les données ont indiqué une solution en deux facteurs dont les poids de saturations (voir tableau 3) indiquent un premier facteur très général d'appréciation des bacs déterminant toutes les variables excepté la variable mesurant le caractère adéquat de la végétation. Le second facteur, plus complexe à interpréter, détermine principalement les scores à la variable mesurant le caractère adéquat de la végétation suivi des scores à la question générale de l'intégration des bacs au paysage urbain du point de vue esthétique. Ce facteur plus spécifique semble indiquer ainsi qu'il semble malgré tout qu'une part de la perception de l'esthétisme soit liée à l'acceptation du niveau de la végétation.

Tableau 3. Poids factoriels standardisés pour les deux facteurs retenus lors de l'analyse des variables concernant l'esthétisme et l'emprise des bacs sur le paysage urbain.

	Facteur 1 : Esthétisme général	Facteur 2 : Esthétisme végétation
Intégration au paysage urbain	0.46	-0.43
Volume trop volumineux	-0.77	0.17
Emprise trop importante	-0.95	-0.18
Jure dans le paysage	-0.62	0.32
Végétation adéquate	-0.02	-0.83

Préférence pour le type de version de la structure

La version en bois a été la version la plus plébiscitée (38 ; 45%), suivie par la version en acier (29 ; 34%) alors que 17 participants (20%) préféreraient les deux versions tout

Secrétariat

autant (17 ; 20%). Un seul participant a déclaré n'aimer aucune des deux versions. Les raisons de ces choix ont été multiples mais certaines réponses ont été plus fréquentes que d'autres. Voir ci-dessous pour le détail.

- En ce qui concerne les participants préférant la version en acier, deux raisons principales ont été évoquées : l'une étant que le bois est moins durable, pourri plus vite ou vieillit plus mal que l'acier (10 participants) et l'autre que l'acier s'intègre mieux au paysage urbain et passe plus facilement inaperçu (huit participants).
- En ce qui concerne les participants préférant la version en bois, les principales raisons évoquées étaient que « c'est plus naturel » (16 participants), « plus écolo » (trois participants) ou que ça allait bien avec les plantes (un participant).
- En ce qui concerne les participants préférant les deux versions, les raisons principales évoquées étaient que « cela dépend du lieu » (9 participants) ou encore de la « durabilité » de la matière (2 participants).
- Enfin, l'unique participant ayant déclaré n'apprécier ni l'une, ni l'autre des versions, aurait simplement préféré une version en pierre.

Installation permanente des bacs à Genève

Les évaluations consensuelles sur l'esthétisme des bacs et leur bonne intégration au paysage urbain, tout comme la positivité de l'évaluation de leur utilité, ont été confirmées par le massif accord autour de l'éventualité de l'installation permanente des bacs à Genève pour laquelle les participants ont exprimé un avis tout à fait favorable (moyenne = 5.29 ; écart-type = 1.27 ; médiane = 6 avec 56 participants ayant répondu la modalité représentant le plus grand accord, soit 67% de l'échantillon, voir figure 13).

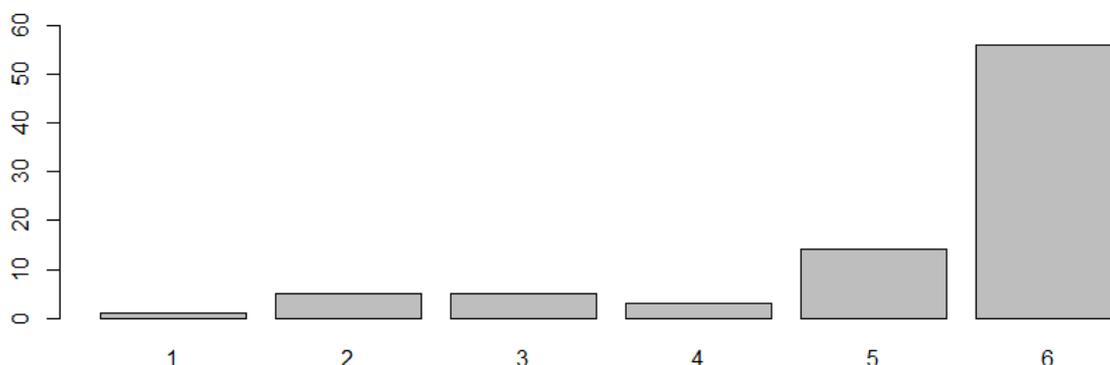


Figure 13. Distribution des réponses à la question portant sur l'installation permanente des bacs à Genève.

Secrétariat

Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. +41 (0)24 557 76 00
Fax +41 (0)24 557 76 01
E-mail: info@heig-vd.ch

Commentaire libre

45 participants ont laissé un commentaire final portant spécifiquement sur la structure. Le commentaire le plus fréquemment donné (20 participants) était que la mise en place de telles structures constituait une « bonne idée », une « bonne initiative », une idée « intéressante » ou encore « originale ». Parmi ces réponses, six participants ont nuancé malgré tout quelque peu leur propos en y associant une nécessité de ces structures d'être « efficace » ou encore « d'améliorer la qualité de l'eau pour pas cher ». Un autre participant a également évoqué une peur de voir trop d'argent investi pour trop peu de résultats. Deux autres participants ont émis des interrogations sur la manière dont vont se comporter ces structures lors du changement de saison et particulièrement en hiver avec l'arrivée du gel. Divers conseils ont été proposés par des participants, à savoir a) qu'il faudrait encore mieux sensibiliser les gens aux problématiques environnementales (deux participants) et que cette structure était intéressante notamment dans ce but (trois participants), b) qu'il serait intéressant d'ajouter une grille plus fine ou un grillage afin d'éviter au mieux le dépôt de déchets (deux participants).

En résumé

Le consensus retrouvé entre les participants concernant l'utilité de ce type de structure s'est révélé très important. Ces bacs sont réellement considérés comme un plus et ce pour diverses raisons. Les raisons principales étant que le principe des structures comme décrit dans l'enquête et observable sur place semblait bien intégré par les participants, bien qu'une part non négligeable d'entre eux ont exprimé quelques réticences à accorder pleine confiance à la description et aux propriétés de ce type de structures. L'absence de solution connue au problème du traitement des eaux de route polluées a semblé jouer en faveur de l'évaluation positive de cette structure qui a par ailleurs été perçue très positivement par plusieurs participants. Une grande majorité des participants ont trouvé cette structure comme esthétique et s'intégrant tout à fait correctement à l'espace urbain. Ce fort consensus concernant l'utilité de cette structure couplée à celui concernant son esthétisme ont sans doute concouru à expliquer qu'une écrasante majorité de participants sont tout à fait prêts à voir ce type de structure installé de manière permanente à Genève. Il reste à déterminer quelle version de cette structure le public préfère entre une version en bois et en acier. Si la version en bois a été la plus retenue pour son aspect plus naturel, la version en acier n'était pas très loin derrière avec la perception d'un matériau plus durable et cadrant assez bien avec le paysage urbain. D'autres participants n'ont pas réussi à trancher entre les deux versions, de manière intéressante ils ont évoqués que tout dépendrait du lieu où serait installé ce type de bacs. Les commentaires libres ont permis d'analyser plus en profondeur ce que pensaient les participants de ce type de structure, ce qui a confirmé qu'elles sont perçues comme intéressantes mais, qu'à nouveau, certaines craintes concernant leur efficacité et leur rendement ont été exprimées.

Secrétariat

4.5 Dépôt de débris et dégradations éventuelles

Dépôt de débris

En ce qui concerne les variables touchant au dépôt de débris dans les bacs, les participants ont estimé que le type de débris qui pourrait le plus volontiers être déposé par les personnes serait les mégots de cigarettes (57 ; 67% ; $\chi^2(1) = 9.89$; $p < 0.01$), suivi par les chewing-gums (51 ; 61% ; $\chi^2(1) = 4.35$; $p = 0.04$) et les papiers (52 ; 61% ; $\chi^2(1) = 4.25$; $p = 0.04$). Si le nombre de participants ayant rapporté un dépôt possible pour chacun de ces trois premiers types de débris a été significativement plus élevé que le nombre de participants n'ayant pas rapporté la possibilité d'un tel dépôt, les trois dernières variables n'ont pas montré cette même tendance. En effet, la distribution de ces variables indiquait une part non significativement différente de réponses oui et de réponses non, respectivement pour ce qui touchait au dépôt de bouteilles en PET (44 oui ; 52% ; $\chi^2(1) = 0.11$; $p = 0.75$), de canettes (44 oui ; 52% ; $\chi^2(1) = 0.11$; $p = 0.75$) ou d'emballages (41 oui ; 49% ; $\chi^2(1) = 0.01$; $p = 0.91$).

Analyse complémentaire

Bien que l'ensemble des variables ne soient pas distribuées de la même manière, il a été intéressant d'obtenir les résultats d'une analyse factorielle basée sur les corrélations tétrachoriques (étant donné le type des variables) qui permet de comprendre quel(s) lien(s) ont entretenu ces variables. La structure factorielle retenue suite à une analyse parallèle a été une solution en un seul facteur général, les poids de saturations (voir tableau 4) ont reflété les fortes corrélations entre les variables qui révélaient un facteur que l'on a pu interpréter comme une propension générale à percevoir les bacs comme pouvant être sujet au dépôt de tout type de débris. Ainsi, lorsque les personnes ont tendance à trouver que des personnes pourraient déposer des débris dans les bacs, cela se généralise à tous les types de débris, même si certains sont reportés en moyenne comme ayant une probabilité plus grande que d'autres d'être déposés.

Tableau 4. Poids factoriel standardisés pour les deux facteurs retenus lors de l'analyse des évaluations du dépôt éventuel de débris par des tierces personnes.

	Tentation des tierces personnes à déposer des débris
Mégots de cigarettes	0.98
Bouteilles en PET	0.91
Chewing-gums	0.88
Emballages	0.95
Canettes	0.97
Papiers	0.98

Secrétariat

Dégradations diverses éventuelles

La dégradation éventuelle la plus citée par les participants a été le tag (69 oui, 82% ; $\chi^2(1) = 34.71$; $p < 0.001$) suivie par les autocollants (61 oui ; 73% ; $\chi^2(1) = 17.19$; $p < 0.01$) et les déjections d'animaux (61 oui ; 73% ; $\chi^2(1) = 17.19$; $p < 0.001$). Les participants ont été plus mitigés concernant l'arrachage des végétaux, avec descriptivement légèrement plus de réponses positives que négatives (46 oui vs. 38 non ; 55% vs. 45%) bien que cette différence de proportion ne se révèle pas significative ($\chi^2(1) = 0.76$; $p = 0.38$). Enfin, la dégradation la moins retenue a été la destruction des bacs qui a recueilli une majorité significative d'avis négatifs (55 non ; 65% ; $\chi^2(1) = 8.05$; $p < 0.01$). 10 participants ont proposé d'autres types de dégradations possibles, à savoir des actes de vandalisme (trois participants), des enfants grimant sur la structure (un participant) ou encore les nuisances liées aux oiseaux (un participant).

Analyse complémentaire

Une analyse factorielle basée sur les corrélations tétrachoriques a été mise en place, malheureusement, des problèmes d'estimations liés à une matrice non positivement définie et à des inter-corrélations hétérogènes entre les variables nous a empêché d'interpréter les résultats de cette modélisation statistique. Une brève analyse des corrélations (de type phi, immune aux problèmes d'estimations précités) entre ces variables a indiqué que les seuls liens significatifs et de taille relativement importante étaient ceux caractérisant la relation entre a) les scores de dégradations de type arrachage des végétaux et de type destruction ($r = 0.61$; $p < 0.001$) et b) les scores de dégradation de type tags et de type autocollants ($r = 0.69$; $p < 0.001$). Il est possible que ces variables aient été retrouvées associées parce qu'elles représentent respectivement a) des nuisances de taille importante et b) des nuisances de relative moindre ampleur.

En résumé

Les objets les plus susceptibles d'être déposés dans les bacs ont été les mégots de cigarettes, les chewing-gums et les papiers, tous trois des objets de petite taille comparé aux autres objets proposés. Les types de dégradations éventuelles retrouvés le plus fréquemment ont été les tags, les autocollants et les déjections d'animaux qui constituent pour les deux premiers des dégradations de moindre importance en comparaison aux dégradations retrouvés les moins fréquemment (arrachage des végétaux et destruction des bacs) et pour le troisième le seul acte paraissant relativement inévitable ou en tout cas n'émanant pas (forcément) d'une volonté humaine de nuire.

Secrétariat

5. Enseignements/Recommandations

Informations au public concernant le traitement des eaux des routes et de ruissellement

L'état des connaissances du public vis-à-vis du traitement des eaux de pluie et de ruissellement des routes s'est avéré tout à fait lacunaire avec une large méconnaissance de l'absence effective d'un tel traitement. De plus, les participants ont volontiers avoué n'avoir que peu de connaissances en la matière. Il convient donc de mieux informer le public à ce sujet afin de permettre une plus grande prise de conscience de l'état actuel de la problématique ce qui pourrait aider à favoriser une acceptation encore plus grande des structures.

Appui sur la bonne conscience du problème de la pollution des eaux des routes et de ruissellement

Les résultats ont démontré de manière relativement massive que le public est tout à fait conscient de l'importance du problème du traitement des eaux de routes et de ruissellement, tout autant que de la nécessité d'investir des ressources afin d'aider à le traiter. Le consensus et la conscience forte autour de cette problématique pourrait se révéler un appui tout à fait intéressant à l'acceptabilité de technologies destinées à régler ce qui est considéré de fait comme un réel problème.

Acceptabilité des structures et renforcement de cette acceptabilité

L'utilité de ce type de structure a été évaluée comme excellente par les participants avec un réel plus apporté par ces bacs. Un approfondissement des raisons ayant conduit à ce type de réponses donne tout d'abord que les participants ont globalement trouvé cette solution intéressante et ont généralement accepté le principe de son fonctionnement qui a pu être perçu comme une solution intéressante car unique. Ces dernières constatations sont malgré tout à nuancer étant donné que plusieurs participants ont émis certaines réticences à accorder pleine confiance à l'efficacité et au fonctionnement de ce type de structure. C'est un point sur lequel il conviendrait de communiquer afin de réduire ces méfiances et augmenter l'acceptation de la structure.

Cette acceptation des structures a sûrement été renforcée par les perceptions de leur esthétique globale et leur propension à s'intégrer au paysage qui se sont révélées tout à fait excellentes et consensuelles. Si le public a majoritairement préféré la version bois de ces structures pour son aspect plus naturel, il reste quelques craintes sur la durabilité de ce

Secrétariat

Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. +41 (0)24 557 76 00
Fax +41 (0)24 557 76 01
E-mail: info@heig-VD.ch

09.01.2015

matériau. Ceci dit, la version acier a également obtenu une bonne partie des suffrages pour son aspect plus résistant et en raccord avec les éléments des structures urbaines. Enfin, il semble que le type d'environnement dans lequel ces structures seront développées est un facteur important du choix de la version bois ou acier. Il serait intéressant de déterminer plus avant quel type d'environnement s'accorde le mieux avec chacune des versions mais, à la vue des résultats de cette étude, un voisinage très urbain avec des architectures en acier et béton pourrait être associé avec la version acier, alors qu'un décor plus boisé pourrait plus facilement être associé avec la version bois, bien que cette dernière a également été perçue comme intéressante dans un environnement urbain pur étant donné qu'elle permettrait de restaurer un peu de nature dans la ville.

Point sur le dépôt éventuel de débris et dégradations diverses

Les participants ont reporté la possibilité que ces structures soient effectivement prises pour cible de dépôt de débris et de dégradations. Le point commun entre les diverses réponses les plus fréquemment retrouvées, que ce soit concernant les débris ou les dégradations, semble être le caractère relativement modéré des dégradations avec des objets déposés étant plus volontiers de petite taille et des dégradations d'importance de faible à modérée plutôt que de plus grande importance. Deux participants ont également émis l'idée d'ajouter une grille ou un grillage aux structures afin d'empêcher le dépôt d'objet, si l'idée est intéressante il reste à savoir si elle est implémentable et sans nocivité à l'esthétique de la structure.

Accord avec l'installation des bacs de manière permanente à Genève

A la question très directe du degré de désaccord ou d'accord avec l'installation permanente des bacs à Genève, les participants ont à nouveau répondu de manière massive qu'ils étaient très en accord avec cette proposition. Au-delà d'un biais potentiel de désirabilité lié à l'utilisation d'une question auto-rapportée cela donne malgré tout un indice franc de la bonne acceptabilité de ce type de structure ce qui confirme les attitudes et avis très positifs recueillis dans cette étude. Il semble donc que leur déploiement soit tout à fait indiqué ou *a minima*, non contre-indiqué.

Secrétariat

Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. +41 (0)24 557 76 00
Fax +41 (0)24 557 76 01
E-mail: info@heig-vd.ch

6. Conclusion

Les résultats de cette enquête basée sur le principe des réponses auto-rapportées ont démontré une bonne acceptabilité des structures du projet SMACC par le public et a également permis de mettre en évidence les points sur lesquels il pourrait être possible de jouer pour augmenter encore cette acceptation. Cette étude, bien que basée sur un échantillon relativement restreint, permet de tirer des enseignements relativement clairs sur la perception positive de l'implémentation de telles structures à Genève, perception que l'on espère généralisable à d'autres villes en Suisse.

7. Bibliographie

1. Site Internet OFS,
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/international/03/04/02/ind31.indicator.31010107.310101.html?open=31010110,31010107#31010107>, page consultée le 07.01.2014

8. Annexes

Annexe 1 : questionnaire soumis aux participants à l'étude d'acceptabilité.

Etude d'acceptabilité des structures filtrantes du projet SMACC

Aidez-nous à déterminer si ce nouveau dispositif technologique urbain pourrait être implanté dans les villes !

Nous sommes des étudiantes en 3^{ème} année à la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud (HEIG-VD), filière économie d'entreprise. Dans le cadre de notre cursus académique, nous réalisons une étude destinée à recueillir vos avis concernant ce dispositif technologique destiné à filtrer les eaux de ruissellement des routes en ville. Ces eaux sont potentiellement polluées par des micropolluants (éléments d'usure du revêtement et des véhicules et résidus des carburants)

Secrétariat

Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. +41 (0)24 557 76 00
Fax +41 (0)24 557 76 01
E-mail: info@heig-vd.ch

09.01.2015

Nous serions très heureux que vous nous aidiez en nous faisant part de vos points de vue et remarques à propos de ce dispositif.

Nous tenons à vous informer que ce questionnaire durera environ 10 minutes, nous vous remercions d'avance du temps que vous consacrerez pour répondre à nos questions.

Ce questionnaire est anonyme et nous vous garantissons le traitement confidentiel de toutes les données qui nous seront transmises.

Questions de mise en confiance

1. Habitez-vous à Genève ?

Oui Non

Si oui, depuis combien de temps _____

2. Travaillez-vous à Genève ?

Oui Non

Si oui, depuis combien de temps _____

3. Combien de fois êtes-vous passé par la plaine de Plainpalais lors des deux dernières semaines ?

C'est la première fois que vous passez par la plaine de Plainpalais

Une fois par semaine

Plusieurs fois par semaine

Une fois par jour

Plusieurs fois par jour

Secrétariat

Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. +41 (0)24 557 76 00
Fax +41 (0)24 557 76 01
E-mail: info@heig-vd.ch

Questions sur le traitement des eaux de ruissellement

4. Comment qualifieriez-vous vos connaissances concernant ce qui touche au traitement des eaux de pluies et de ruissellement des routes sur une échelle de 1 aucune connaissance à 6 de très bonnes connaissances ?

aucune connaissance 1 2 3 4 5 6 de très bonnes connaissances

5. Selon vous, comment sont traitées les eaux de pluies et de ruissellement des routes ?

- Elles sont traitées par la station d'épuration
- Elles retournent à la nature une fois traitées par la station d'épuration
- Elles ne sont pas traitées par la station d'épuration et retournent directement dans la nature
- Je ne sais pas

6. Selon vous, la pollution de l'eau sur les routes est, sur une échelle de 1 pas du tout un problème à 6 un très sérieux problème ?

pas du tout un problème 1 2 3 4 5 6 un très sérieux problème

7. Selon vous, est-il nécessaire d'investir des ressources pour traiter la pollution de l'eau sur les routes ?

- Oui Non

8. Selon vous, est-il prioritaire d'investir des ressources pour traiter la pollution de l'eau sur les routes ?

- Oui Non

Secrétariat

09.01.2015

9. Quelle est selon vous l'importance de traiter la pollution de l'eau sur les routes, sur une échelle de 1 pas important du tout à 6 extrêmement important ?

pas important du tout 1 2 3 4 5 6 extrêmement important

Questions sur le dispositif

Descriptif du dispositif

Le projet SMACC (Smart Clean City) a pour objectif de mettre au point des structures végétalisées capables de filtrer l'eau de ruissellement des routes qui sont souillées par le passage des véhicules (micropolluants issus des matériaux et du carburant).

Les structures qui ont été développées dans le cadre du projet sont des bacs de terreau-plantés modulaires qui servent à construire des parois végétales, de dimensions variables en fonction des environnements dans lesquels ils sont intégrés. Les bacs à plantes sont remplis d'un terreau naturel (contenant du compost et du bio-charbon), spécialement mis au point à cet effet, qui filtre l'eau en fixant les micropolluants. Les plantes qui poussent dans les bacs aident au renouvellement du terreau. Le système effectue ainsi un cycle complet et naturel de purification de l'eau.

La structure devant vous est inerte dans le sens qu'il y manque l'arrivée d'eau. A terme, ce dispositif sera disposé en contrebas des routes permettant à l'eau d'y arriver naturellement par gravité.

10. Pensez-vous que ces bacs sont utiles pour contribuer au traitement des eaux de pluies et de ruissellement des routes ?

Oui Non

11. Pensez-vous que ces bacs puissent apporter quelque chose de plus concernant le traitement de l'eau ?

Oui Non

Pour quelle(s) raison(s) ?

Secrétariat

Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. +41 (0)24 557 76 00
Fax +41 (0)24 557 76 01
E-mail: info@heig-VD.ch

12. A propos de ces bacs, pourriez-vous s'il vous plaît nous indiquer à quel point vous êtes en désaccord ou en accord avec chacune des affirmations suivantes sur une échelle de 1 pas du tout d'accord à 6 tout à fait d'accord ?

Esthétiquement, ces bacs s'intègrent bien au paysage urbain :

pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 tout à fait d'accord

Ces bacs sont trop volumineux:

pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 tout à fait d'accord

L'emprise de ces bacs sur l'espace urbain est trop importante :

pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 tout à fait d'accord

Ces bacs jurent dans le paysage :

pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 tout à fait d'accord

La végétation proposée est adéquate :

pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 tout à fait d'accord

Ces bacs devraient être installés de manière permanente à Genève :

pas du tout d'accord 1 2 3 4 5 6 tout à fait d'accord

13. Quelle version des bacs préférez-vous ?

- La version en bois
- La version en acier
- Les deux versions me plaisent tout autant
- Aucune des deux

Pour quelle(s) raison(s) ?

Secrétariat

09.01.2015

14. Selon vous, des personnes pourraient-elles être tentées de déposer dans ces bacs :

Des mégots de cigarettes Oui Non

Des bouteilles en PET Oui Non

Des chewing-gums Oui Non

Des emballages Oui Non

Des canettes Oui Non

Des papiers Oui Non

15. Selon vous, quels autres types de dégradations pourraient être faites à ces bacs ?

des déjections d'animaux

des végétaux arrachés

des bacs détruits

des autocollants sur les bacs

des tags sur les bacs

Autre :

16. Souhaitez-vous nous faire partager d'autres commentaires à propos de ces bacs ?

Oui Non

Secrétariat

Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. +41 (0)24 557 76 00
Fax +41 (0)24 557 76 01
E-mail: info@heig-VD.ch

09.01.2015

Si oui, merci d'indiquer ci-dessous vos commentaires :

Questions sur le profil de la personne interrogée

17. Genre :

- Homme Femme

18. Dans quelle tranche d'âge vous situez-vous ?

- < 20 ans 20 à 29 ans 30 à 39 ans 40 à 49 ans 50 à 59 ans 60 ans et plus

19. Dans quel milieu habitez-vous?

- En ville
 En banlieue
 En campagne

Clôture

Nous arrivons au terme de notre questionnaire. Nous vous remercions du temps que vous nous avez consacré et nous vous rappelons que vos données seront traitées de manière confidentielle et anonyme.

Si vous souhaitez obtenir des informations complémentaires, nous vous invitons à vous rendre sur le site internet : <http://project.eia-fr.ch/smacc>

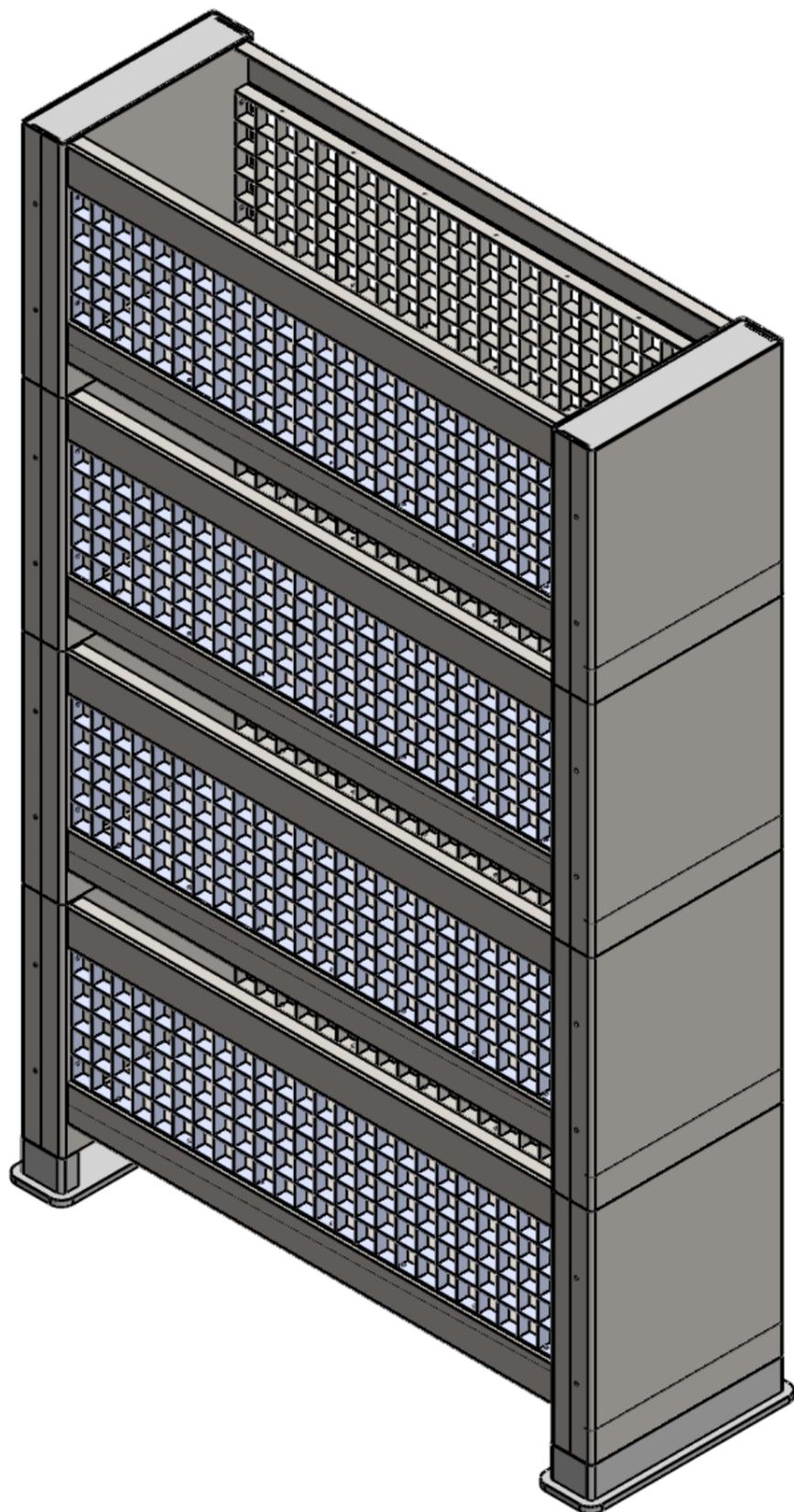
Merci de votre participation !

Secrétariat

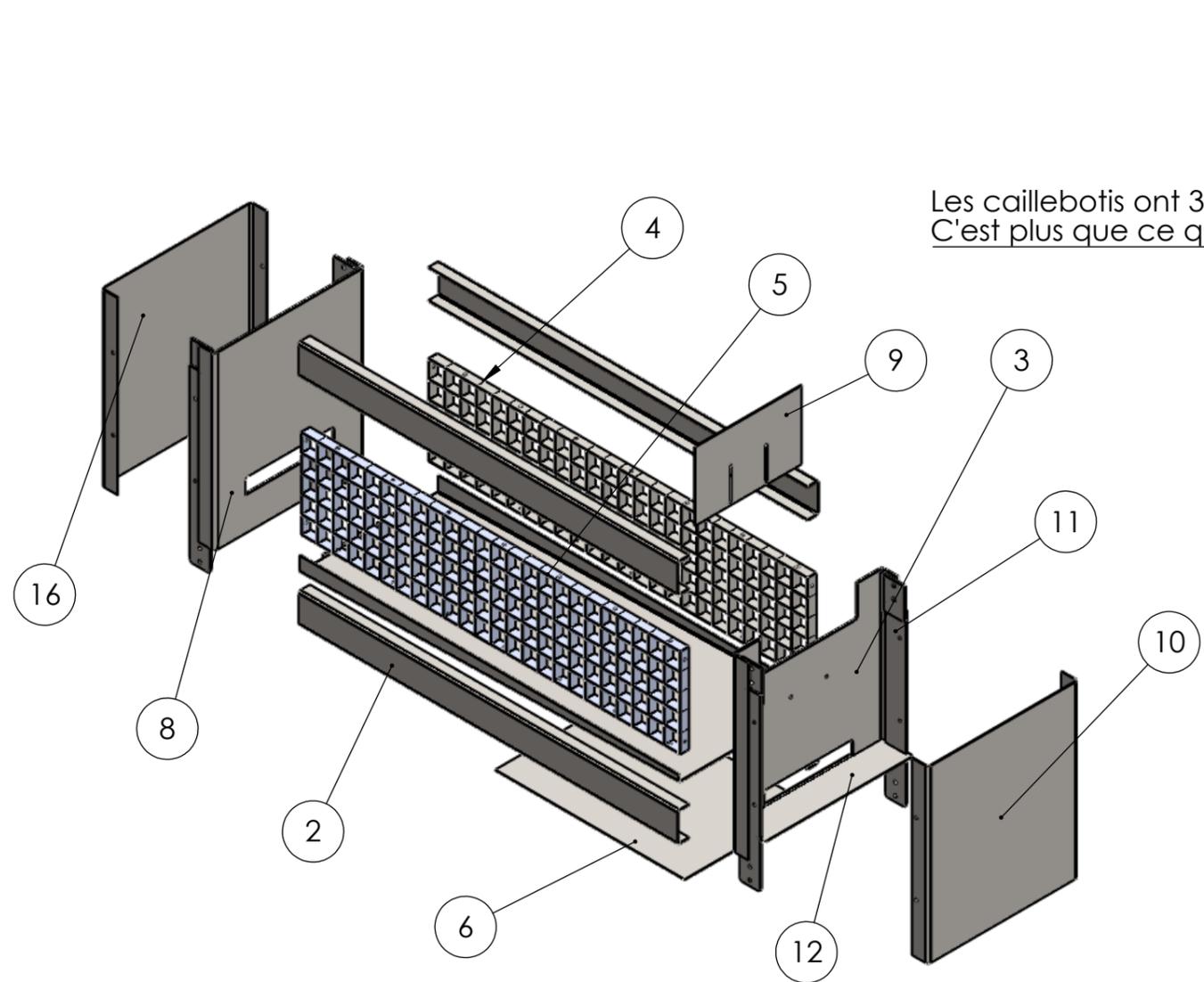
Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. +41 (0)24 557 76 00
Fax +41 (0)24 557 76 01
E-mail: info@heig-vd.ch

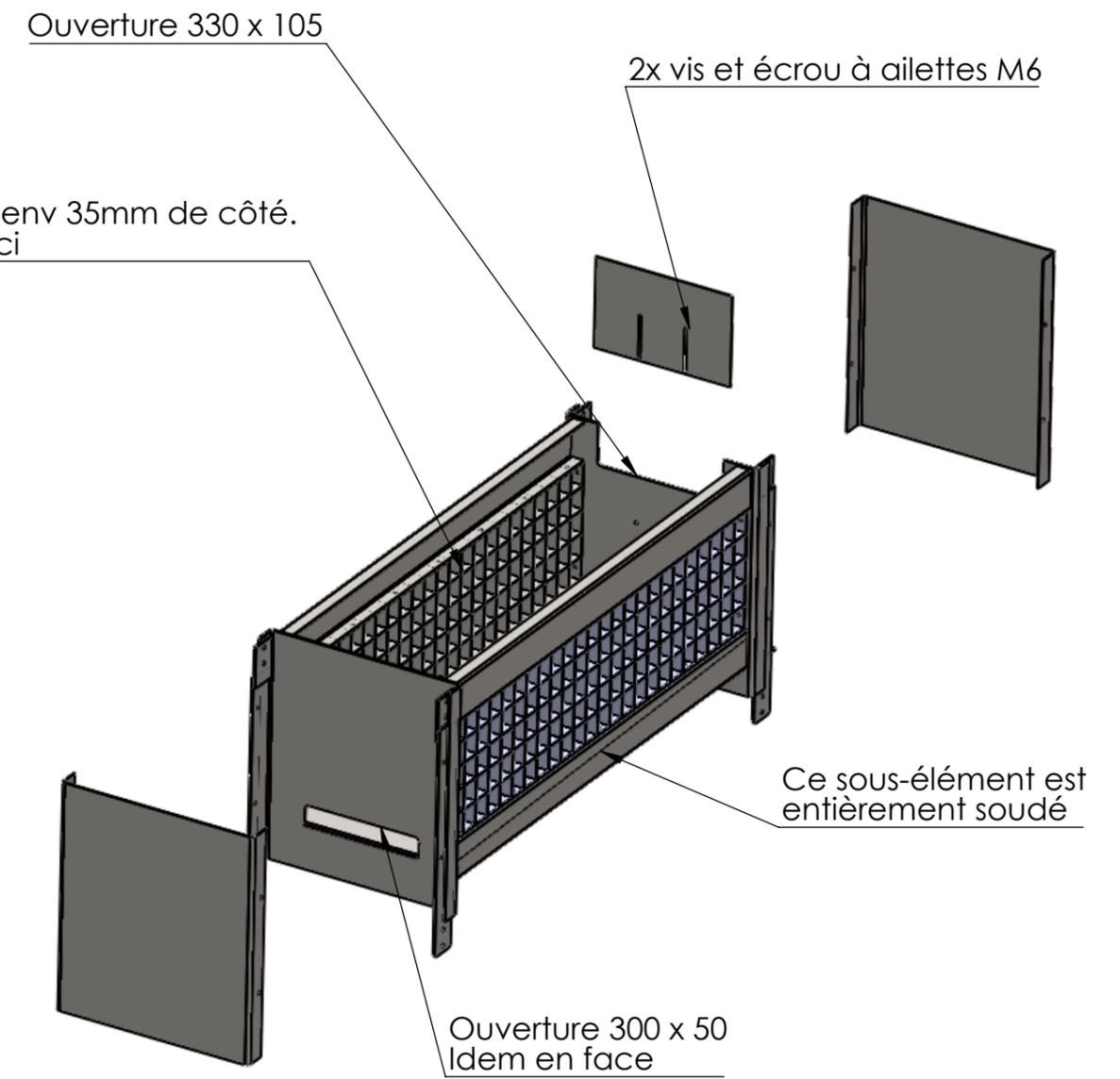
3.5 Plan final de cassette en inox



NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC 	
AUTEUR	LS		
DATE	22.05.2015		
VERSION			
MATERIAU: Inox	No. DE PLAN	Caissette	A3
		FEUILLE 1 / 5	

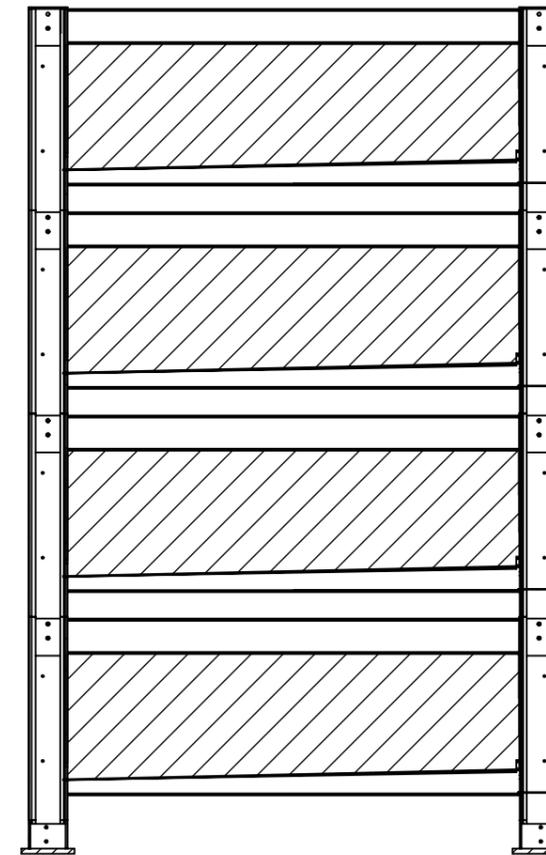
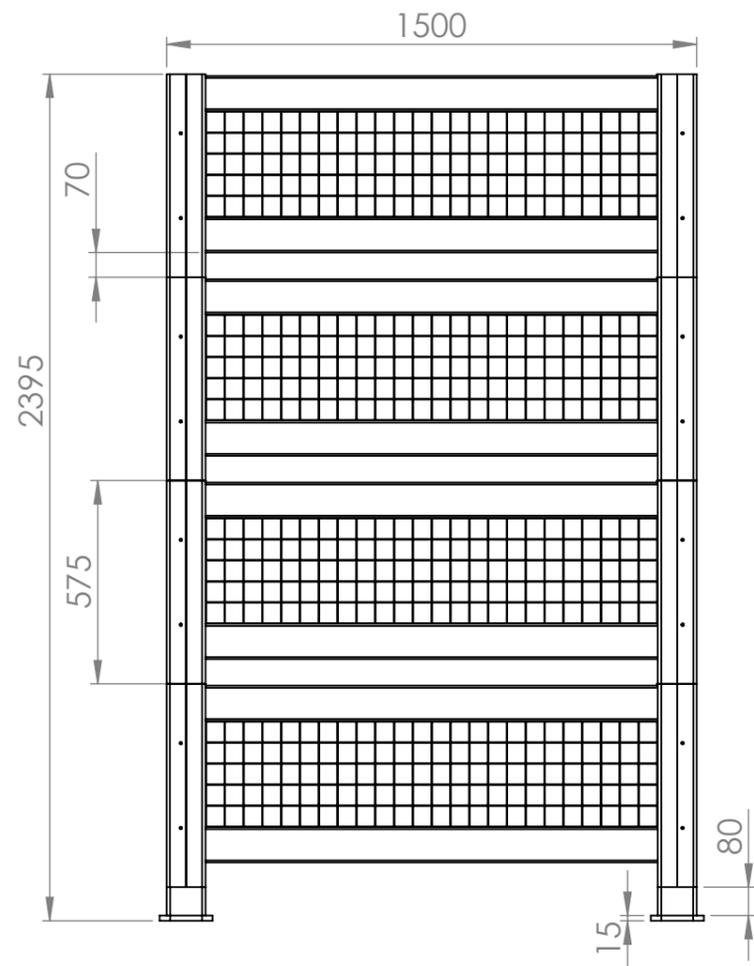
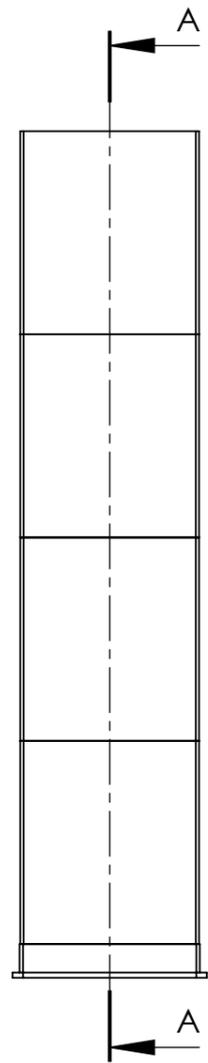


Les caillebotis ont 34x8 mailles d'env 35mm de côté.
C'est plus que ce qui est visible ici

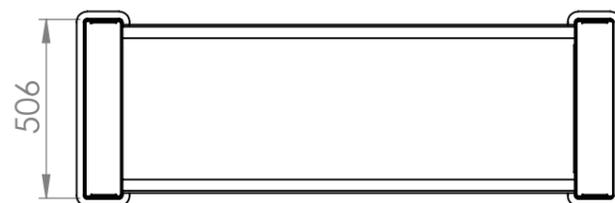


No	Nom de la pièce	Nb	Ep. mm
2	p_traverse_u	4	3
3	p_flanc_droit	1	5
4	p_caillebotis	2	2
5	p_tole_recup_eau-traitee	1	3
6	p_tole_amenee_eau-sale	1	2
8	p_flanc_gauche	1	5
9	p_tole_reglage_eau	2	2
10	p_capot	1	2
11	p_lame_fixation	1	5
12	p_tole_bouchon_eau-sale	1	2
16	Symétriep_capot	1	2
17	p_couvercle	2	2

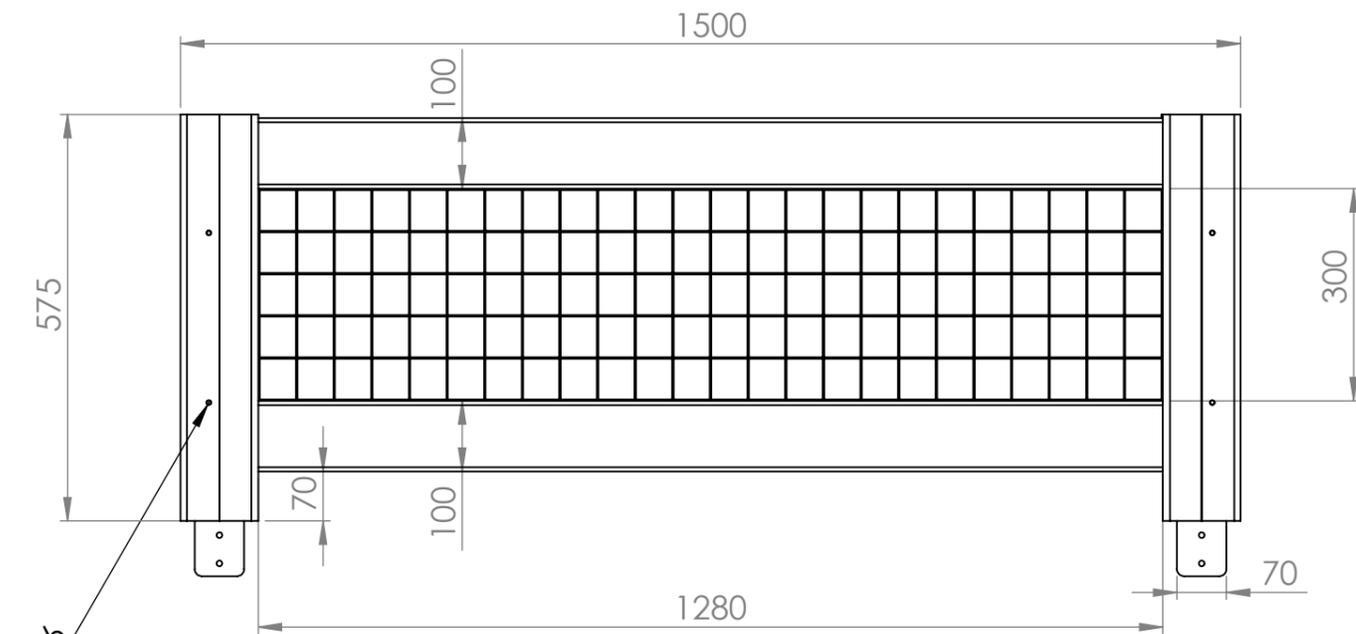
NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC	Hes-50 <small>HEALTHY ENVIRONMENTAL SOLUTIONS IN WATER TREATMENT Pretschhofstrasse 2 University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland</small>
AUTEUR	LS		
DATE	22.05.2015		
VERSION			
MATERIAU: Inox	No. DE PLAN Caissette	A3	
		FEUILLE 2 / 5	



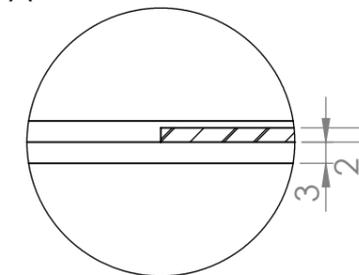
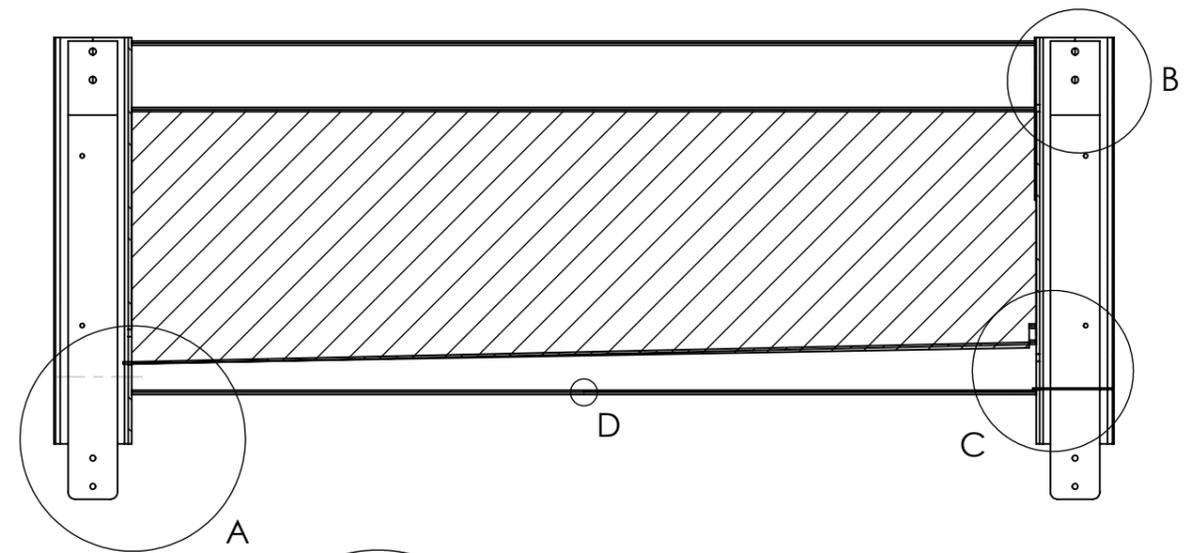
COUPE A-A



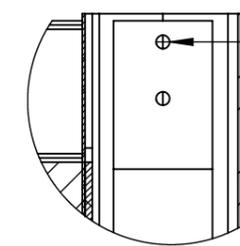
NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC  <small>Hes-50 est une marque déposée de l'Université de Caen Normandie</small> <small>University of Caen Normandie</small>	
AUTEUR	LS		
DATE	22.05.2015		
VERSION			
MATERIAU: Inox		No. DE PLAN Caissette	A3
		ECHELLE:1:20	FEUILLE 3 / 5



Mettre ces 2 trous les plus éloignés possible l'un de l'autre en fonction du soyage.
Attention à respecter la symétrie par rapport au milieu de la hauteur de la pièce "capot"

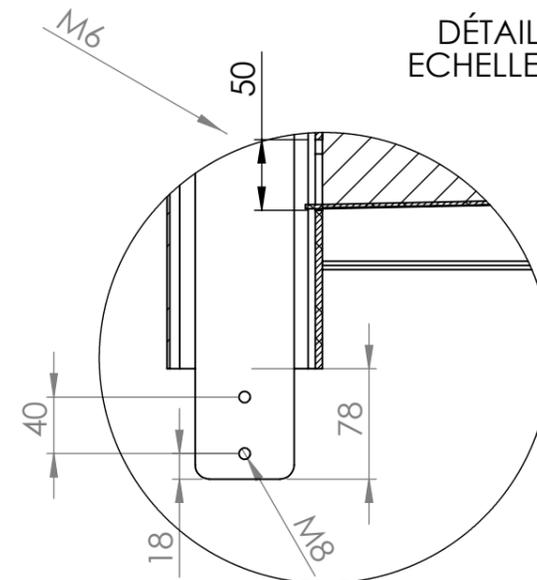


DÉTAIL D
ECHELLE 1 : 1

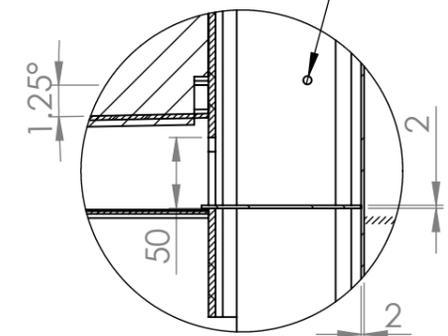


Volontairement plus grand pour avoir un peu de jeu

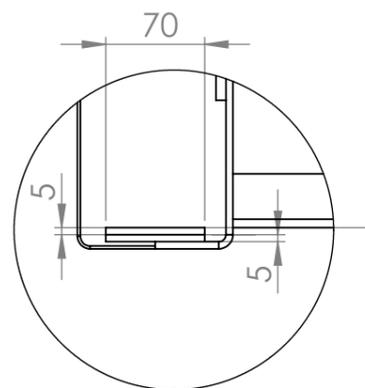
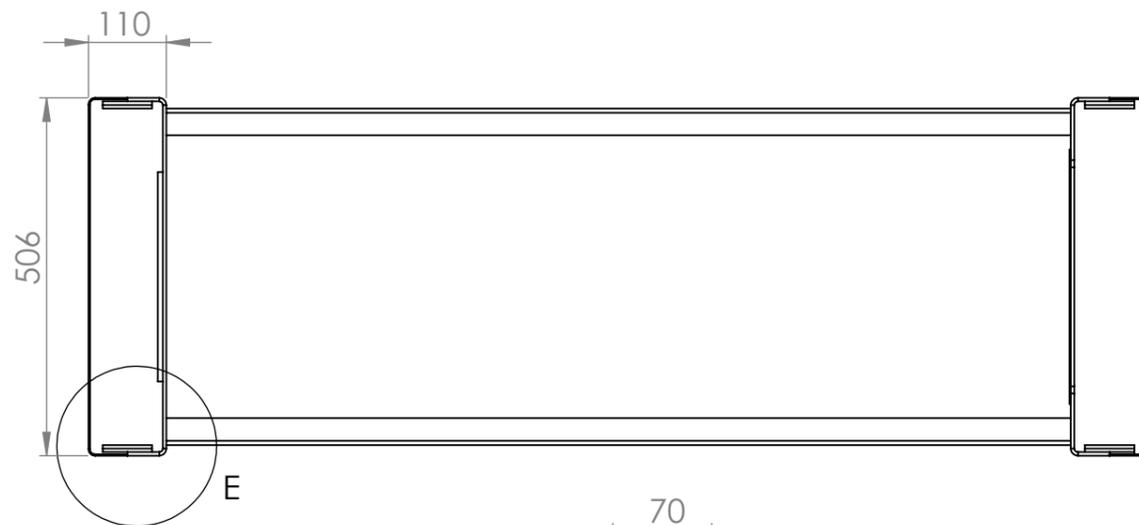
DÉTAIL B
ECHELLE 1 : 5



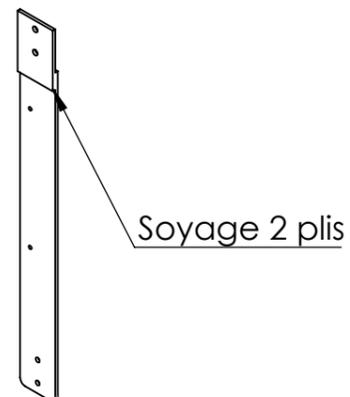
DÉTAIL A
ECHELLE 1 : 5



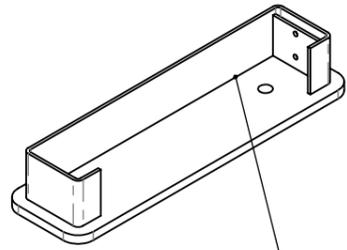
DÉTAIL C
ECHELLE 1 : 5



DÉTAIL E
ECHELLE 1 : 5

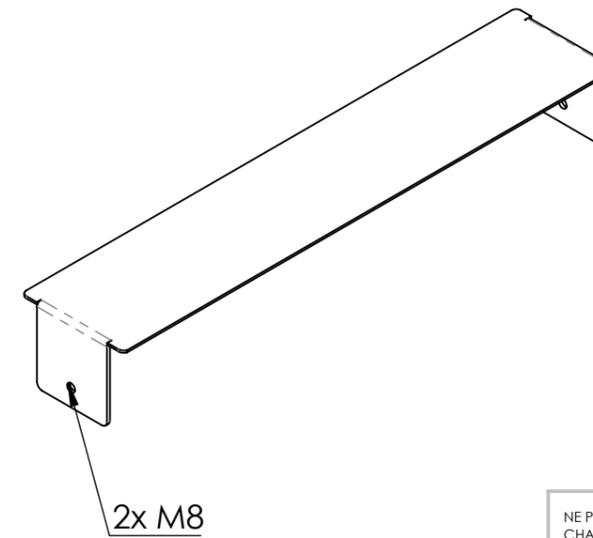
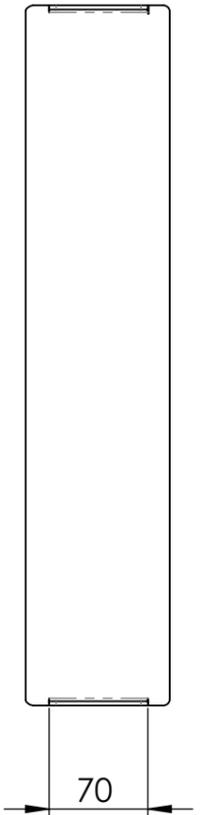
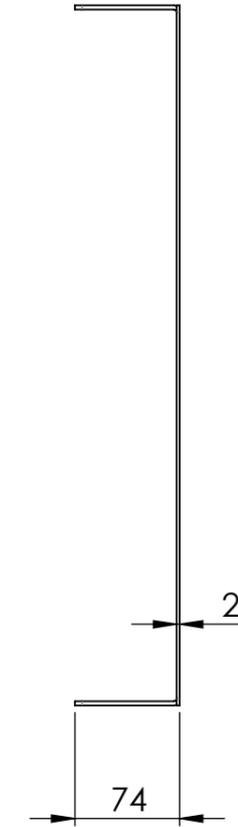
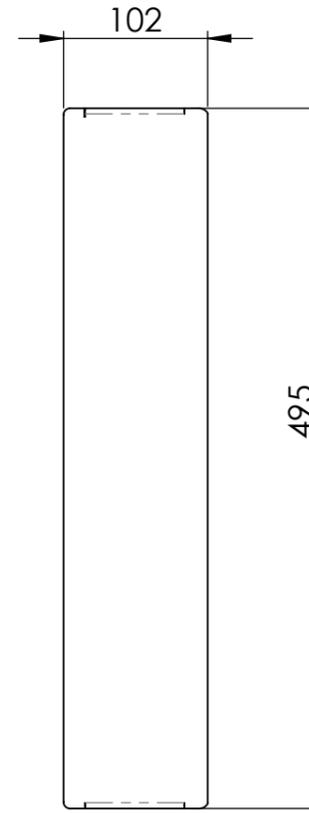
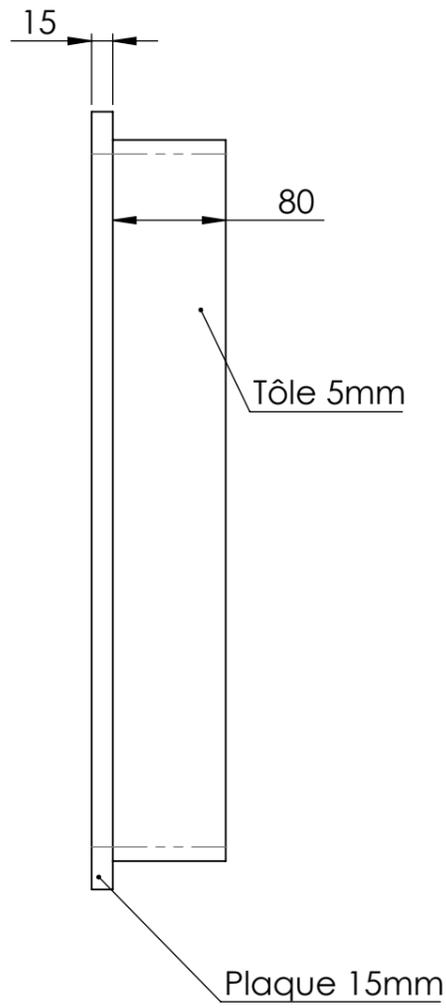
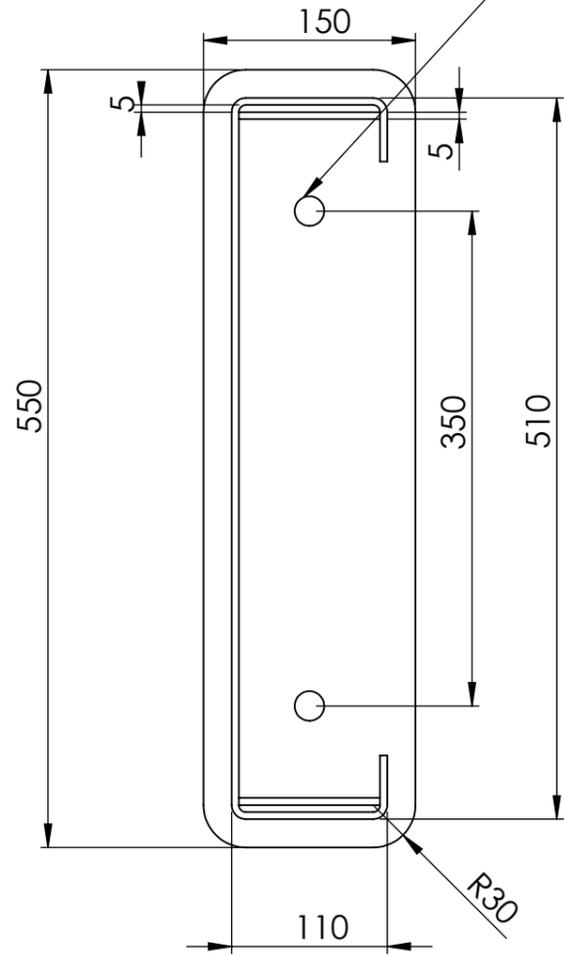


NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC 	
AUTEUR	LS		
DATE	22.05.2015		
VERSION		No. DE PLAN	A3
MATERIAU:	Inox	Caissette	
ECHELLE:1:10		FEUILLE 4 / 5	



Soudé

Trou ou taraudage, à définir



NE PAS CHANGER L'ECHELLE	CASSER LES ANGLES VIFS	Projet SMACC 	
AUTEUR	LS		
DATE	22.05.2015		
VERSION			
MATERIAU: Inox	No. DE PLAN Caissette_socle & couvercle		A3
ECHELLE:1:5		FEUILLE 5 / 5	

3.6 Flyer

Flyer réalisé pour l'inauguration du banc d'essai à Pérolles.

SMACC
smart clean city

Système de traitement des eaux de chaussées

Le système présenté résulte du projet Call "Smart Clean City" de la HES-SO. Il a été développé conjointement par la Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg, la Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève, la Haute école d'ingénierie et de gestion d'Yverdon et l'Ecole cantonale d'art de Lausanne.

Hes·SO
Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale
Fachhochschule Westschweiz
University of Applied Sciences
Western Switzerland

Description du système & points forts

Fonctionnement

L'eau de ruissellement de chaussée est débarrassée de ses polluants en s'écoulant au travers d'un substrat contenu dans des caissettes modulables. Les caissettes contiennent ce substrat novateur, constitué d'un mélange de biochars et de compost, qui permet aussi bien une bonne performance épurative qu'une forte capacité hydraulique.

Performance hydraulique

98% des événements pluvieux ont pu être traités par le banc d'essai (période printemps-été 2015).

Performance épurative

78% d'abattement de la matière en suspension (période printemps-été 2015).

Durabilité du système

- Substrat auto-entretenu par la végétation (apport de matière organique et maintien de la perméabilité).
- Perméabilité très rapide à la mise en place du système (supérieure à 2000 mm/h).
- Perte de la capacité d'infiltration en fonction de la charge épurée (volume et charge MES).
- Sollicitation des caissettes avalas plus fréquente au cours du temps.
- Pas d'évolution de la performance d'épuration et de la capacité hydraulique sur les 10 caissettes en ligne entre août 2014 et août 2015.

Entretien

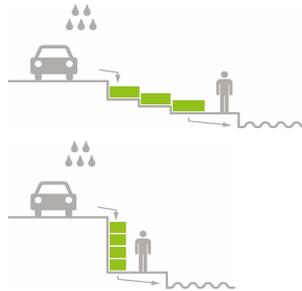
Aucun ou semblable à celui des plantes ornementales en fonction du choix de la couverture végétale.

Design

Plusieurs matériaux envisageables comme l'acier inoxydable (prototype), le bois imputrescible ou le béton.

Mise en œuvre

Sous forme de tour ou d'alignement, selon les besoins du site et l'approvisionnement en eau de ruissellement.



Contact

Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg.
Bruno Spahni > bruno.spahni@hefr.ch

Plus d'info sur

<https://project.eia-fr.ch/smacc>



En cas de faibles apports: sollicitation de la première caissette uniquement.



En cas de forts apports: débordement dans les caissettes inférieures.



3.7 Cassette inox - Note de calcul

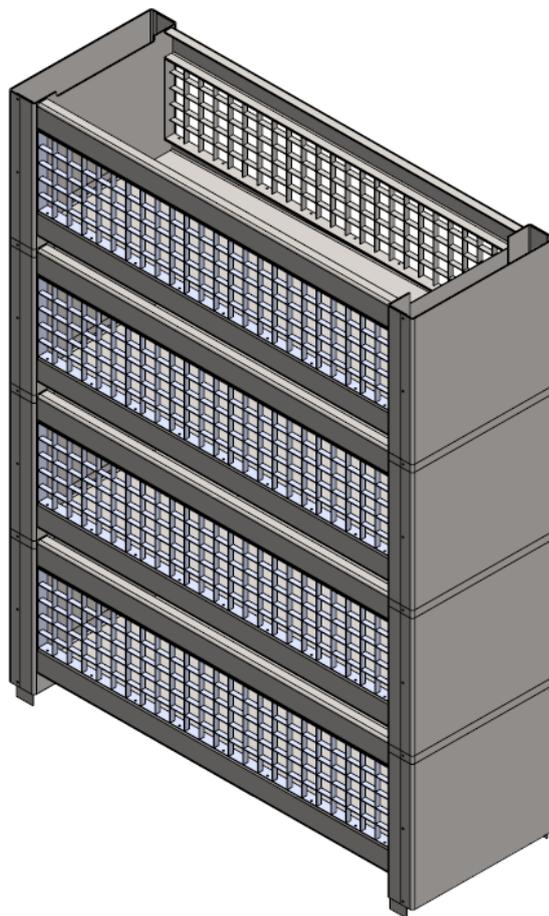
Note de calcul est de vérification de la résistance des éléments constituant les caissettes inox, des attaches et de la connexion au sol.

Elsy Saloumi, collaboratrice scientifique Heia-Fr

PROJET SMACC

Caissette Inox

NOTE DE CALCUL



Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg
Hochschule für Technik und Architektur Freiburg

Adresse: Boulevard de Pérolles 80 - 1700 Fribourg

Tel: +41 26 429 66 11

Fax: +41 26 429 66 00

Site: <http://www.heia-fr.ch>

NDC 02

CAS : 2

Révision : B

Date: 13 Mai 2015.

REVISIONS

Rév.	Date	Conçu par	Approuvé par	Commentaires	Statut
A	22-04-2015	.		Première issu	PRE
B	10-05-2015	.		Deuxième issu	PRE
B	13-05-2015	.		Deuxième issu	PRE

SOMMAIRE

	Pages
1 INTRODUCTION	4
2 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX.....	6
3 MODELISATION	6
4 CAS DE CHARGES	8
4.1 DEFINITION DES CAS DE CHARGES.....	8
5 COMBINAISONS	12
6 VERIFICATION DES ELEMENTS	13
7 VERIFICATION DES CONTRAINTES	46
8 VERIFICATION CONNECTION ENTRE CAISETTES	47
9 VERIFICATION DE LA FLECHE	51
10 REACTION D'APPUI.....	52
11 VERIFICATION DE LA CONNECTION AU SOL.....	53

1 INTRODUCTION

Le but de cette note de calcul est de vérifier la résistance des éléments constituant les **Caissettes Inox** ainsi que les attaches et la connexion au sol. La modélisation de la structure est faite sur **ROBOT AUTODESK ANALYSIS** et la vérification selon l'Eurocode. L'effort maximum dans les barres est directement pris du Modèle ROBOT.

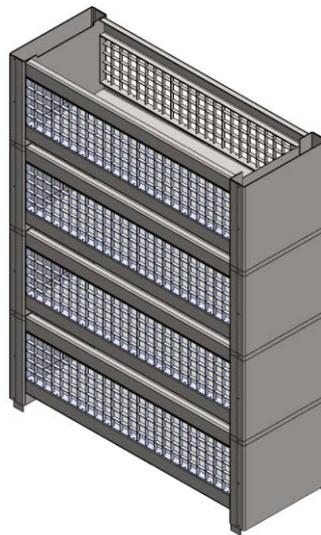


Figure 1 – Vue 3D de la tour de caissettes

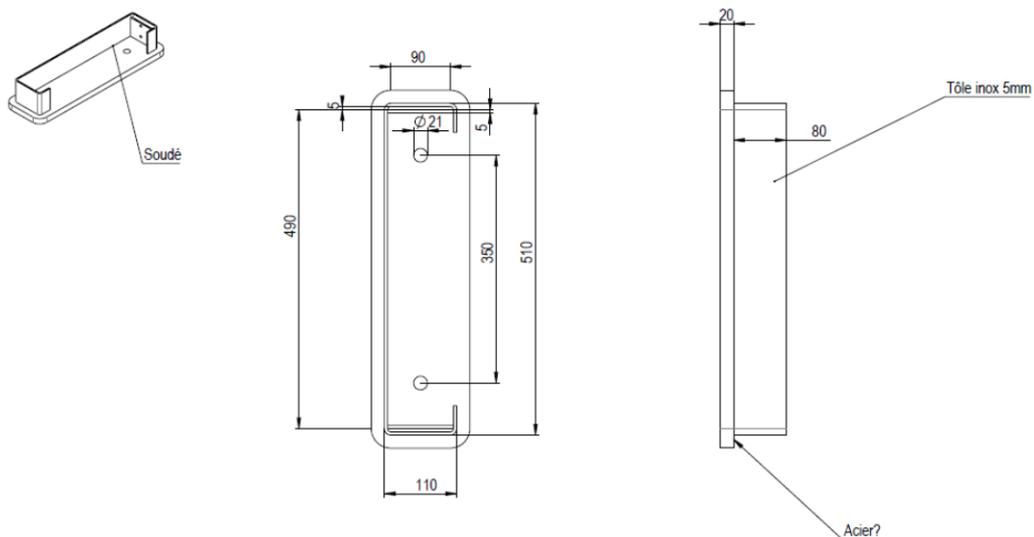


Figure 2 – connexion au sol de la tour de caissettes

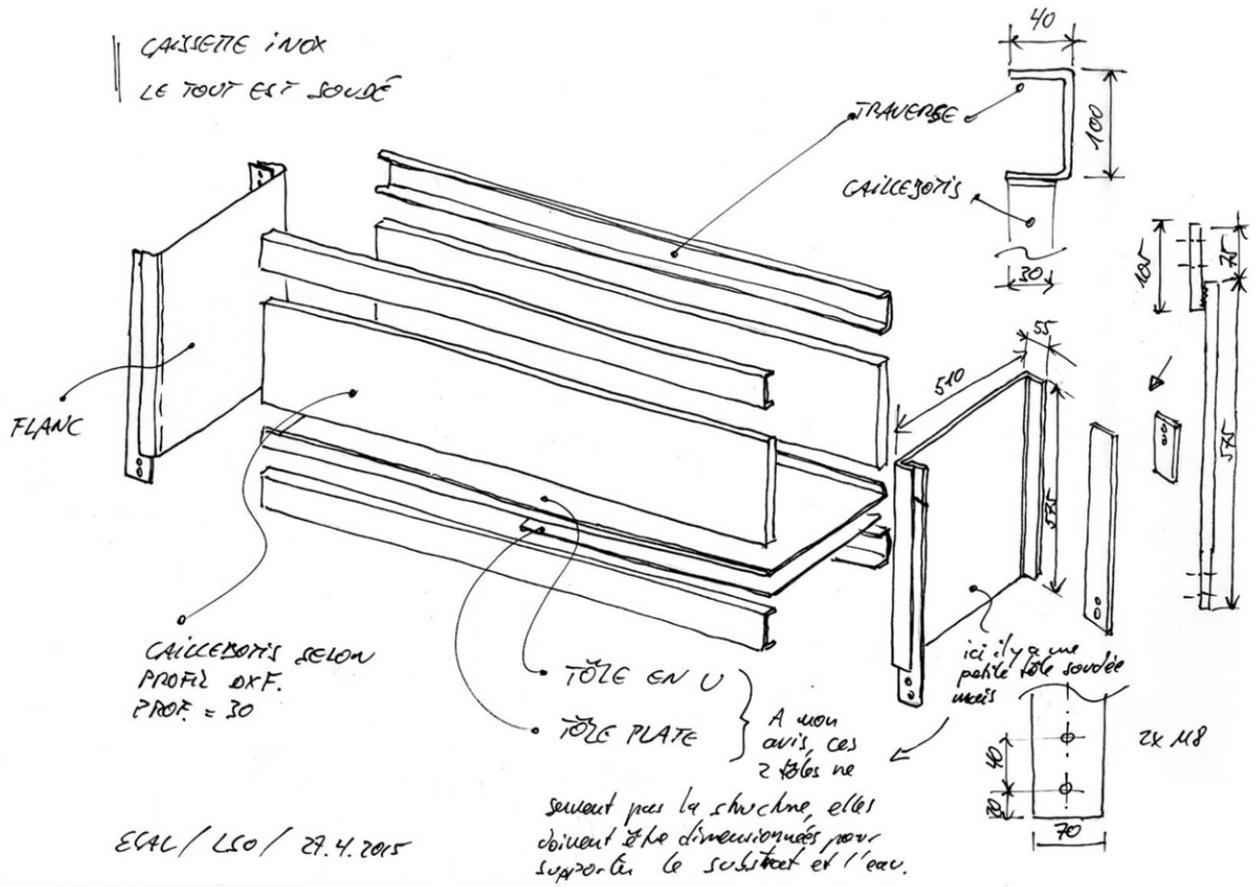


Figure 3 – Eléments constituant la caissette

2 CHARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Les caractéristiques de l'**INOX** considérés pour la vérification de la structure sont les suivantes:

- Module d'Young $E = 200000 \text{ MPa}$
- Limite élastique $f_y = 240 \text{ MPa}$
- Densité $\gamma = 7700 \text{ daN/m}^3$

3 MODELISATION

La structure de la tour de caissettes Inox a été modélisée dans le logiciel de modélisation 3D: "Autodesk ROBOT Structural Analysis".

La structure est simplement appuyée sur le sol et est composée des sections suivantes:

- Section en L 110*110*5
- Section en U 100*35*3
- Panneaux d'épaisseur 4mm pour le bas de la caissette
- Panneaux d'épaisseur 5mm pour les éléments latéraux
- Panneaux d'épaisseur 2mm qui représentent le caillebotis

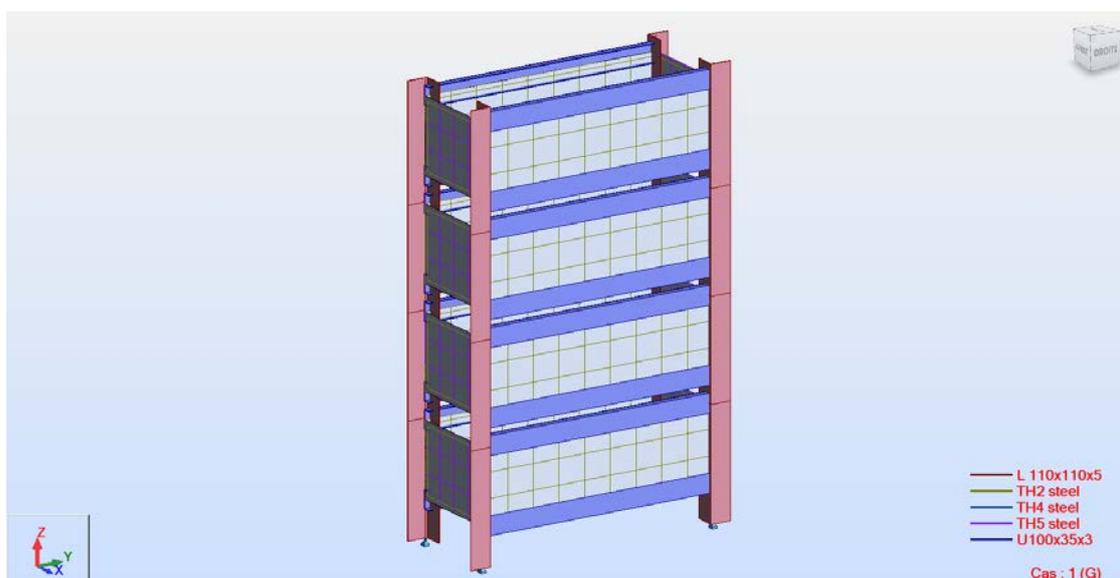


Figure 5 – Modèle 3D de la structure et sections correspondantes



Figure 5 – Relâchement considérées

Les degrés de libertés sont x y z θ_x θ_y θ_z

b = degré de liberté bloqué

l = degré de liberté libre

4 CAS DE CHARGES

Charge permanente (G) :

-Poids d'une caissette

$$G_k = \underline{282 \text{ daN/caissette}}$$

Surcharge personnes :

-Il est admis que deux personnes de 80daN chacun soit suspendus
 -50% de leur charge sera prise comme composante horizontale

$$Q_{p,v} = \underline{160 \text{ daN}}$$

$$Q_{p,h} = \underline{80 \text{ daN}}$$

Vent :

$$Q_{\text{vent}} = \underline{150 \text{ daN/m}^2}$$

Choc :

-On considéra l'impact d'un véhicule de masse < 3.5tonnes dans les cours d'immeuble
 et garages parkings avec accès pour des voitures

$$A_{\text{choc}} = \underline{5000 \text{ daN}}$$

4.1 DEFINITION DES CAS DE CHARGES

Charge permanente (G) : Case #1

-Poid-propre de la structure

$$G_k = \underline{282 \text{ daN/caissette}}$$

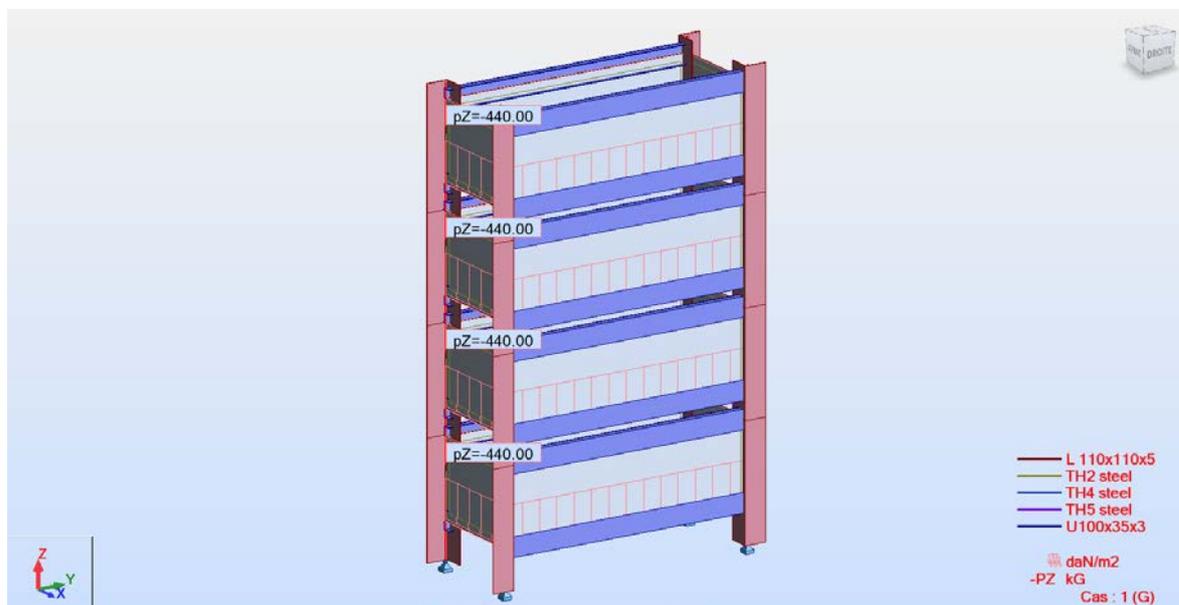


Figure 4 – Case #1, Charge permanente

Surcharge personnes :

Case #2

-Il est admis que deux personnes de 80daN chacun soit suspendus

$Q_{p,v} = \underline{160 \text{ daN}}$



Figure 5 – Case #2, Surcharge Q_p 1

Case #3

-50% de leur charge sera prise en plus comme composante horizontale

$Q_{p,h} = \underline{80 \text{ daN}}$

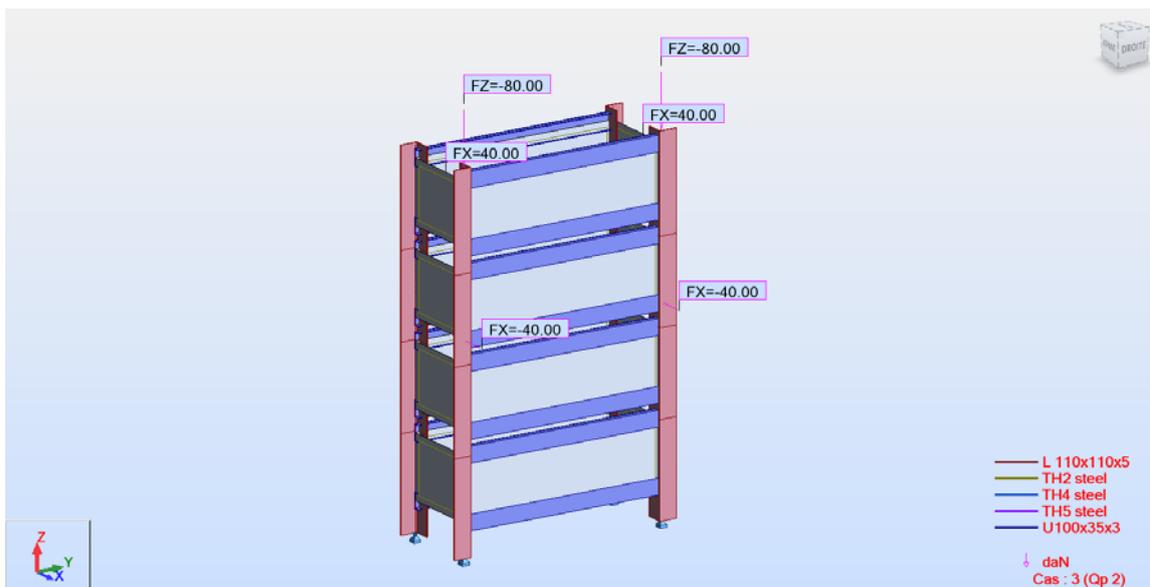


Figure 6 – Case #2, Surcharge Q_p 1

Vent :
Case #4 - Vent 1 direction x

$$Q_{\text{vent}} = 150 \text{ daN/m}^2$$

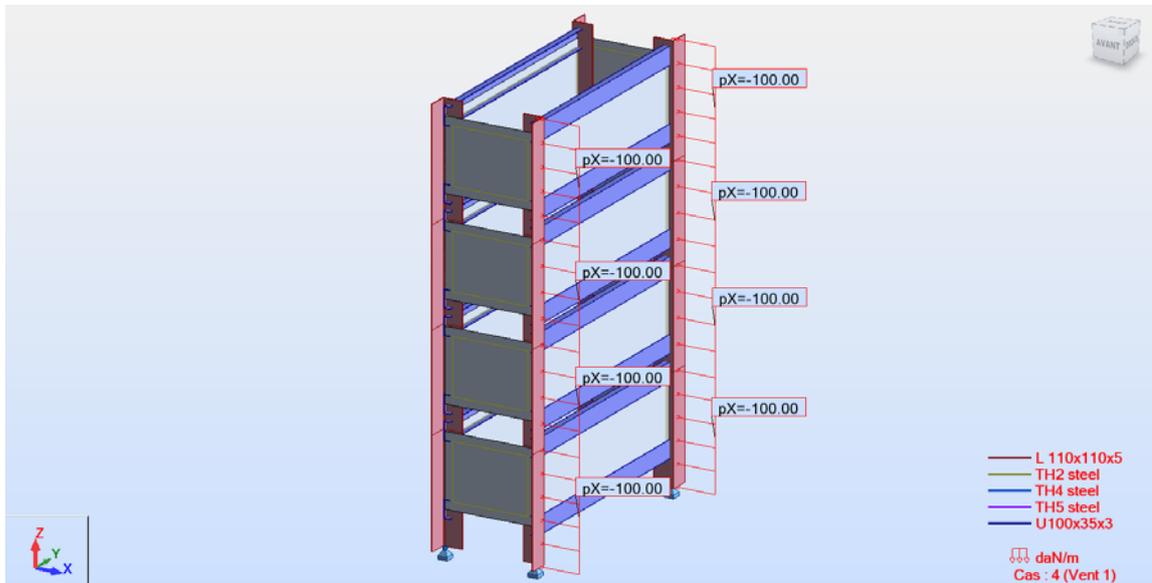


Figure 7 – Case #4, Vent 1

Case #5 - Vent 2 direction z

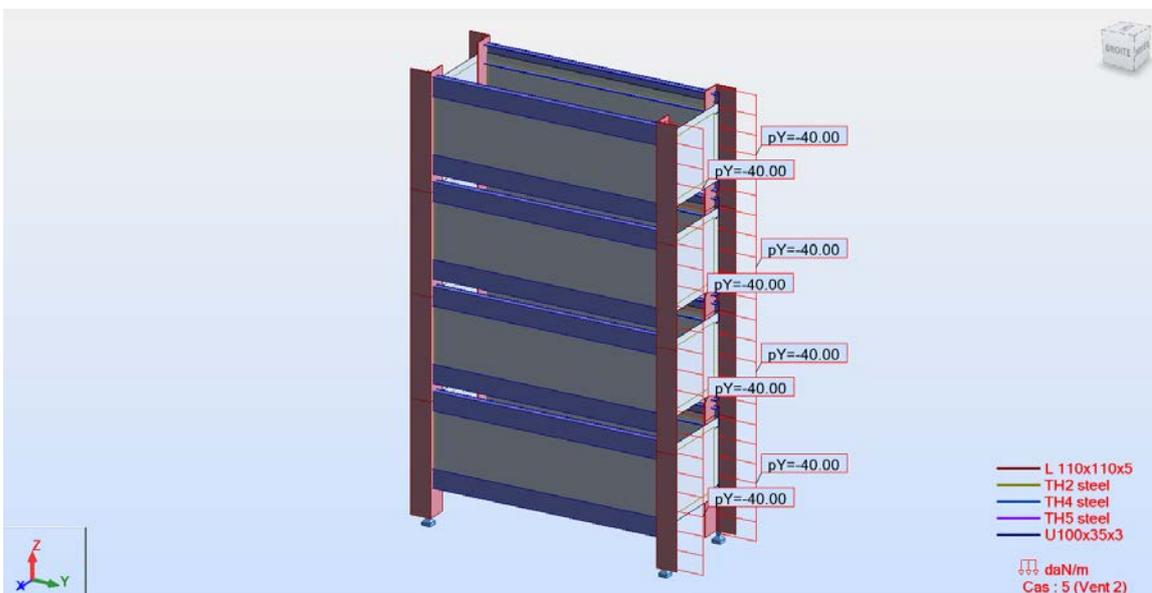


Figure 8 – Case #5, Vent 2

Choc : On considérait l'impact d'un véhicule de masse < 3.5tonnes

$A_{choc} = \underline{5000 \text{ daN}}$

Case #6 - Choc 1 direction x



Figure 9 – Case #6, Choc 1

Case #7 - Choc 2 direction y



Figure 10 – Case #6, Choc 2

5 COMBINAISONS

Combinaisons ultimes et accidentelles:

Case #8: ELU 1: $1.35 G + 1.5 Q_{p1}$

Case #9: ELU 2: $1.35 G + 1.5 Q_{p2}$

Case #10: ELU 3: $1.35 G + 1.5 Q_{Vent1}$

Case #11: ELU 4: $1.35 G + 1.5 Q_{Vent2}$

Case #12: ACC 1: $G + A_{choc1}$

Case #13: ACC 2: $G + A_{choc2}$

Combinaisons de service:

Case #14: SLS 1: $G + Q_{p1}$

Case #15: SLS 1: $G + Q_{p2}$

Case #16: SLS 2: $G + Q_{Vent1}$

Case #17: SLS 2: $G + Q_{Vent2}$

6 VERIFICATION DES ELEMENTS

La vérification a été faite selon Eurocode 3

Note: les Efforts sont donnés dans le repère global de des barres.

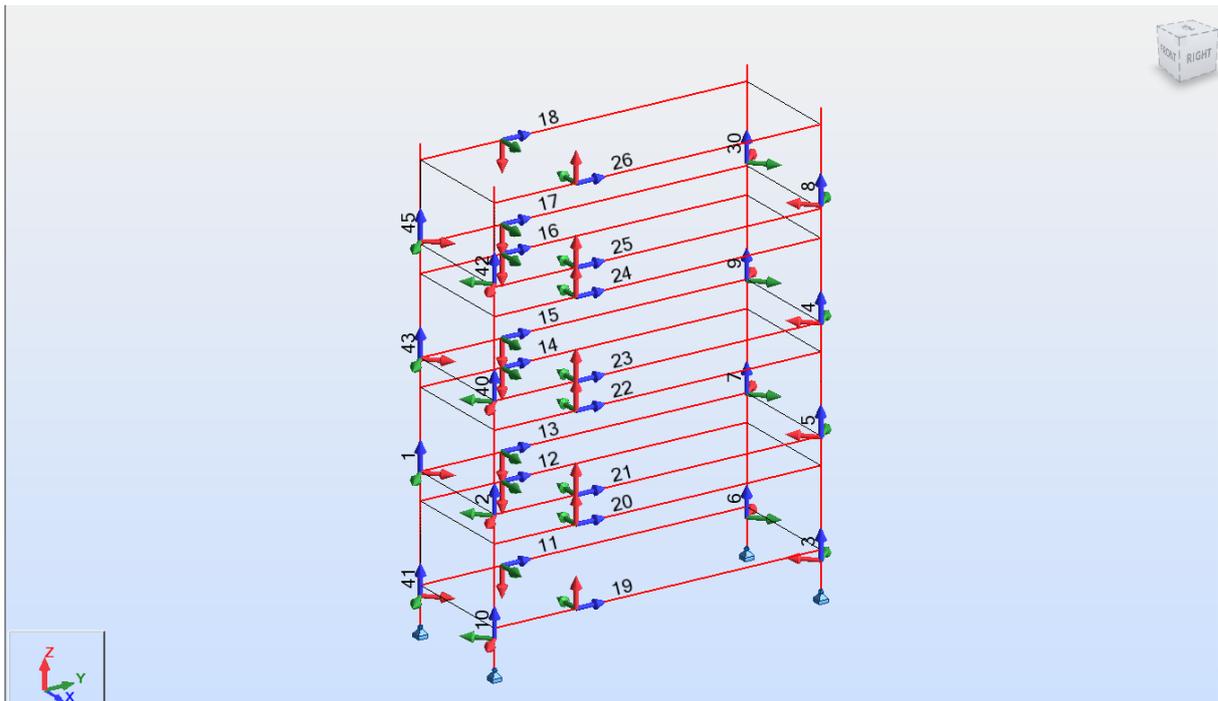


Figure 11 – repère local des barres

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 1

POINT : 3

COORDONNEE : $x = 0.26 L = 0.14 \text{ m}$

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif : 12 ACC1 (1+6)*1.00

MATERIAU :

INOX $f_y = 240.00 \text{ MPa}$



PARAMETRES DE LA SECTION : L 110x110x5

$h = 11.0 \text{ cm}$

$gM0 = 1.00$

$gM1 = 1.00$

$b = 11.0 \text{ cm}$

$A_y = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_z = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_x = 10.75 \text{ cm}^2$

$tw = 0.5 \text{ cm}$

$I_y = 207.16 \text{ cm}^4$

$I_z = 52.04 \text{ cm}^4$

$I_x = 0.75 \text{ cm}^4$

$tf = 0.5 \text{ cm}$

$W_{ely} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{elz} = 12.53 \text{ cm}^3$

$W_{eff,y} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{eff,z} = 12.53 \text{ cm}^3$

$A_{eff} = 10.75 \text{ cm}^2$

Attention : Profilé de classe 4 ! Le logiciel ne fait pas l'analyse complète de la classe 4 pour ce type de profilé, mais il les analyse comme les sections de classe 3.

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

$N_{,Ed} = 791.96 \text{ daN}$

$M_{y,Ed} = 79.42 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,Ed} = -32.67 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,Ed} = 348.41 \text{ daN}$

$N_{c,Rd} = 25800.00 \text{ daN}$

$M_{y,el,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,el,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,T,Rd} = 7594.61 \text{ daN}$

$N_{b,Rd} = 25149.71 \text{ daN}$

$M_{y,c,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,c,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{z,Ed} = 469.19 \text{ daN}$

$V_{z,T,Rd} = 7594.61 \text{ daN}$

$T_{t,Ed} = -0.14 \text{ daN}\cdot\text{m}$

Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

$L_y = 0.54 \text{ m}$

$\lambda_{m,y} = 0.14$

$L_{cr,y} = 0.54 \text{ m}$

$X_y = 1.00$

$\lambda_{my} = 12.30$

$k_{zy} = 1.00$



en z :

$L_z = 0.54 \text{ m}$

$\lambda_{m,z} = 0.27$

$L_{cr,z} = 0.54 \text{ m}$

$X_z = 0.97$

$\lambda_{mz} = 24.54$

$k_{zz} = 1.00$

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N_{,Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.26 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(1))$

$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.05 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.06 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$\tau_{ty,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6)$

$\tau_{tz,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6)$

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\lambda_{m,y} = 12.30 < \lambda_{m,max} = 210.00 \quad \lambda_{m,z} = 24.54 < \lambda_{m,max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$

$N_{,Ed}/(X_y \cdot N_{c,Rd}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rd}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rd}/gM1) = 0.26 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

$N_{,Ed}/(X_z \cdot N_{c,Rd}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rd}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rd}/gM1) = 0.26 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

Profil correct !!!

Conformément au point 5.5.2.(9), la section de la barre a été classifiée comme section de classe 3, bien que conformément au tableau 5.2, elle satisfasse les conditions de la classe 4. Le contrôle de la stabilité sera effectuée conformément au point 5.5.2.(10) comme pour les barres de classe 4.

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 2

POINT : 3

COORDONNEE : $x = 0.26 L = 0.14 \text{ m}$

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif: 12 ACC1 (1+6)*1.00

MATERIAU :

INOX $f_y = 240.00 \text{ MPa}$



PARAMETRES DE LA SECTION : L 110x110x5

$h=11.0 \text{ cm}$	$gM0=1.00$	$gM1=1.00$	
$b=11.0 \text{ cm}$	$A_y=5.50 \text{ cm}^2$	$A_z=5.50 \text{ cm}^2$	$A_x=10.75 \text{ cm}^2$
$tw=0.5 \text{ cm}$	$I_y=207.16 \text{ cm}^4$	$I_z=52.04 \text{ cm}^4$	$I_x=0.75 \text{ cm}^4$
$tf=0.5 \text{ cm}$	$W_{ely}=26.63 \text{ cm}^3$	$W_{elz}=12.53 \text{ cm}^3$	

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

$N_{,Ed} = -230.42 \text{ daN}$	$M_{y,Ed} = 72.26 \text{ daN}\cdot\text{m}$	$M_{z,Ed} = 35.70 \text{ daN}\cdot\text{m}$	$V_{y,Ed} = -380.13 \text{ daN}$
$N_{t,Rd} = 25800.00 \text{ daN}$	$M_{y,el,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$	$M_{z,el,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$	$V_{y,T,Rd} = 7620.25 \text{ daN}$
	$M_{y,c,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$	$M_{z,c,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$	$V_{z,Ed} = 428.62 \text{ daN}$
			$V_{z,T,Rd} = 7620.25 \text{ daN}$
			$T_{t,Ed} = 0.00 \text{ daN}\cdot\text{m}$
			Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :



en z :

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$$N_{,Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.22 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(1))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.05 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.06 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$\tau_{y,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

$$\tau_{z,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 3

POINT : 3

COORDONNEE : $x = 0.33 L = 0.20 \text{ m}$

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif : 13 ACC2 (1+7)*1.00

MATERIAU :

INOX $f_y = 240.00 \text{ MPa}$



PARAMETRES DE LA SECTION : L 110x110x5

$h = 11.0 \text{ cm}$

$gM_0 = 1.00$

$gM_1 = 1.00$

$b = 11.0 \text{ cm}$

$A_y = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_z = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_x = 10.75 \text{ cm}^2$

$tw = 0.5 \text{ cm}$

$I_y = 207.16 \text{ cm}^4$

$I_z = 52.04 \text{ cm}^4$

$I_x = 0.75 \text{ cm}^4$

$tf = 0.5 \text{ cm}$

$W_{ely} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{elz} = 12.53 \text{ cm}^3$

$W_{eff,y} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{eff,z} = 12.53 \text{ cm}^3$

Attention : Profilé de classe 4 ! Le logiciel ne fait pas l'analyse complète de la classe 4 pour ce type de profilé, mais il les analyse comme les sections de classe 3.

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

$N_{,Ed} = -530.22 \text{ daN}$

$M_{y,Ed} = -241.16 \text{ daN} \cdot \text{m}$

$M_{z,Ed} = -107.60 \text{ daN} \cdot \text{m}$

$V_{y,Ed} = 537.98 \text{ daN}$

$N_{t,Rd} = 25800.00 \text{ daN}$

$M_{y,el,Rd} = 639.21 \text{ daN} \cdot \text{m}$

$M_{z,el,Rd} = 300.81 \text{ daN} \cdot \text{m}$

$V_{y,c,Rd} = 7621.02 \text{ daN}$

$M_{y,c,Rd} = 639.21 \text{ daN} \cdot \text{m}$

$M_{z,c,Rd} = 300.81 \text{ daN} \cdot \text{m}$

$V_{z,Ed} = -1205.80 \text{ daN}$

$V_{z,c,Rd} = 7621.02 \text{ daN}$

Classe de la section = 4



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :



en z :

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N_{,Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.76 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(2))$

$V_{y,Ed}/V_{y,c,Rd} = 0.07 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$

$V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.16 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 4

POINT : 3

COORDONNEE : $x = 0.26 L = 0.14 \text{ m}$

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif : 9 ULS2 1*1.35+3*1.50

MATERIAU :

INOX $f_y = 240.00 \text{ MPa}$



PARAMETRES DE LA SECTION : L 110x110x5

$h = 11.0 \text{ cm}$

$gM0 = 1.00$

$gM1 = 1.00$

$b = 11.0 \text{ cm}$

$A_y = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_z = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_x = 10.75 \text{ cm}^2$

$tw = 0.5 \text{ cm}$

$I_y = 207.16 \text{ cm}^4$

$I_z = 52.04 \text{ cm}^4$

$I_x = 0.75 \text{ cm}^4$

$tf = 0.5 \text{ cm}$

$W_{ely} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{elz} = 12.53 \text{ cm}^3$

$W_{eff,y} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{eff,z} = 12.53 \text{ cm}^3$

$A_{eff} = 10.75 \text{ cm}^2$

Attention : Profilé de classe 4 ! Le logiciel ne fait pas l'analyse complète de la classe 4 pour ce type de profilé, mais il les analyse comme les sections de classe 3.

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

$N_{,Ed} = 485.92 \text{ daN}$

$M_{y,Ed} = 4.42 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,Ed} = 2.79 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,Ed} = -23.89 \text{ daN}$

$N_{c,Rd} = 25800.00 \text{ daN}$

$M_{y,el,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,el,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,T,Rd} = 7602.14 \text{ daN}$

$N_{b,Rd} = 25149.71 \text{ daN}$

$M_{y,c,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,c,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{z,Ed} = 22.53 \text{ daN}$

$V_{z,T,Rd} = 7602.14 \text{ daN}$

$T_{t,Ed} = -0.10 \text{ daN}\cdot\text{m}$

Classe de la section = 4



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

$L_y = 0.54 \text{ m}$

$\lambda_{m,y} = 0.14$

$L_{cr,y} = 0.54 \text{ m}$

$X_y = 1.00$

$\lambda_{my} = 12.30$

$k_{zy} = 1.00$



en z :

$L_z = 0.54 \text{ m}$

$\lambda_{m,z} = 0.27$

$L_{cr,z} = 0.54 \text{ m}$

$X_z = 0.97$

$\lambda_{mz} = 24.54$

$k_{zz} = 1.00$

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N_{,Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.04 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(2))$

$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$\tau_{ty,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6)$

$\tau_{tz,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6)$

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\lambda_{m,y} = 12.30 < \lambda_{m,max} = 210.00 \quad \lambda_{m,z} = 24.54 < \lambda_{m,max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$

$N_{,Ed}/(X_y \cdot N_{c,Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.03 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

$N_{,Ed}/(X_z \cdot N_{c,Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.03 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 5

POINT : 3

COORDONNEE : $x = 0.26 L = 0.14 \text{ m}$

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif: 12 ACC1 (1+6)*1.00

MATERIAU :

INOX $f_y = 240.00 \text{ MPa}$



PARAMETRES DE LA SECTION : L 110x110x5

$h = 11.0 \text{ cm}$

$gM0 = 1.00$

$gM1 = 1.00$

$b = 11.0 \text{ cm}$

$A_y = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_z = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_x = 10.75 \text{ cm}^2$

$tw = 0.5 \text{ cm}$

$I_y = 207.16 \text{ cm}^4$

$I_z = 52.04 \text{ cm}^4$

$I_x = 0.75 \text{ cm}^4$

$tf = 0.5 \text{ cm}$

$W_{ely} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{elz} = 12.53 \text{ cm}^3$

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

$N_{,Ed} = -230.42 \text{ daN}$

$M_{y,Ed} = -72.26 \text{ daN} \cdot \text{m}$

$M_{z,Ed} = 35.70 \text{ daN} \cdot \text{m}$

$V_{y,Ed} = -380.13 \text{ daN}$

$N_{t,Rd} = 25800.00 \text{ daN}$

$M_{y,el,Rd} = 639.21 \text{ daN} \cdot \text{m}$

$M_{z,el,Rd} = 300.81 \text{ daN} \cdot \text{m}$

$V_{y,T,Rd} = 7620.25 \text{ daN}$

$M_{y,c,Rd} = 639.21 \text{ daN} \cdot \text{m}$

$M_{z,c,Rd} = 300.81 \text{ daN} \cdot \text{m}$

$V_{z,Ed} = -428.62 \text{ daN}$

$V_{z,T,Rd} = 7620.25 \text{ daN}$

$T_{t,Ed} = -0.00 \text{ daN} \cdot \text{m}$

Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :



en z :

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N_{,Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.24 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(1))$

$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.05 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.06 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$\tau_{y,Ed}/(f_y/(\sqrt{3} \cdot gM0)) = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6)$

$\tau_{z,Ed}/(f_y/(\sqrt{3} \cdot gM0)) = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6)$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 6

POINT : 3

COORDONNEE : $x = 0.33 L = 0.20 \text{ m}$

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif: 12 ACC1 (1+6)*1.00

MATERIAU :

INOX $f_y = 240.00 \text{ MPa}$



PARAMETRES DE LA SECTION : L 110x110x5

$h = 11.0 \text{ cm}$

$gM0 = 1.00$

$gM1 = 1.00$

$b = 11.0 \text{ cm}$

$A_y = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_z = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_x = 10.75 \text{ cm}^2$

$tw = 0.5 \text{ cm}$

$I_y = 207.16 \text{ cm}^4$

$I_z = 52.04 \text{ cm}^4$

$I_x = 0.75 \text{ cm}^4$

$tf = 0.5 \text{ cm}$

$W_{ely} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{elz} = 12.53 \text{ cm}^3$

$W_{eff,y} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{eff,z} = 12.53 \text{ cm}^3$

$A_{eff} = 10.75 \text{ cm}^2$

Attention : Profilé de classe 4 ! Le logiciel ne fait pas l'analyse complète de la classe 4 pour ce type de profilé, mais il les analyse comme les sections de classe 3.

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

$N_{,Ed} = 2936.52 \text{ daN}$

$M_{y,Ed} = -243.07 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,Ed} = -85.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,Ed} = 426.03 \text{ daN}$

$N_{c,Rd} = 25800.00 \text{ daN}$

$M_{y,el,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,el,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,c,Rd} = 7621.02 \text{ daN}$

$N_{b,Rd} = 24867.41 \text{ daN}$

$M_{y,c,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,c,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{z,Ed} = -1215.34 \text{ daN}$

$V_{z,c,Rd} = 7621.02 \text{ daN}$

Classe de la section = 4



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

$L_y = 0.60 \text{ m}$

$\text{Lam}_y = 0.15$

$L_{cr,y} = 0.60 \text{ m}$

$X_y = 1.00$

$\text{Lam}_y = 13.67$

$k_{zy} = 1.00$



en z :

$L_z = 0.60 \text{ m}$

$\text{Lam}_z = 0.30$

$L_{cr,z} = 0.60 \text{ m}$

$X_z = 0.96$

$\text{Lam}_z = 27.27$

$k_{zz} = 1.01$

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N_{,Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.55 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(2))$

$V_{y,Ed}/V_{y,c,Rd} = 0.06 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$

$V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.16 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\text{Lambda}_y = 13.67 < \text{Lambda}_{max} = 210.00 \quad \text{Lambda}_z = 27.27 < \text{Lambda}_{max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$

$N_{,Ed}/(X_y \cdot N_{,Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.78 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

$N_{,Ed}/(X_z \cdot N_{,Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.79 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 7

POINT : 3

COORDONNEE : $x = 0.26 L = 0.14 \text{ m}$

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif : 12 ACC1 (1+6)*1.00

MATERIAU :

INOX $f_y = 240.00 \text{ MPa}$



PARAMETRES DE LA SECTION : L 110x110x5

$h = 11.0 \text{ cm}$

$gM0 = 1.00$

$gM1 = 1.00$

$b = 11.0 \text{ cm}$

$A_y = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_z = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_x = 10.75 \text{ cm}^2$

$tw = 0.5 \text{ cm}$

$I_y = 207.16 \text{ cm}^4$

$I_z = 52.04 \text{ cm}^4$

$I_x = 0.75 \text{ cm}^4$

$tf = 0.5 \text{ cm}$

$W_{ely} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{elz} = 12.53 \text{ cm}^3$

$W_{eff,y} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{eff,z} = 12.53 \text{ cm}^3$

$A_{eff} = 10.75 \text{ cm}^2$

Attention : Profilé de classe 4 ! Le logiciel ne fait pas l'analyse complète de la classe 4 pour ce type de profilé, mais il les analyse comme les sections de classe 3.

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

$N_{,Ed} = 791.96 \text{ daN}$

$M_{y,Ed} = -79.42 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,Ed} = -32.67 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,Ed} = 348.41 \text{ daN}$

$N_{c,Rd} = 25800.00 \text{ daN}$

$M_{y,el,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,el,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,T,Rd} = 7594.61 \text{ daN}$

$N_{b,Rd} = 25149.71 \text{ daN}$

$M_{y,c,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,c,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{z,Ed} = -469.19 \text{ daN}$

$V_{z,T,Rd} = 7594.61 \text{ daN}$

$T_{t,Ed} = 0.14 \text{ daN}\cdot\text{m}$

Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

$L_y = 0.54 \text{ m}$

$\text{Lam}_y = 0.14$

$L_{cr,y} = 0.54 \text{ m}$

$X_y = 1.00$

$\text{Lam}_y = 12.30$

$k_{zy} = 1.00$



en z :

$L_z = 0.54 \text{ m}$

$\text{Lam}_z = 0.27$

$L_{cr,z} = 0.54 \text{ m}$

$X_z = 0.97$

$\text{Lam}_z = 24.54$

$k_{zz} = 1.00$

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N_{,Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.20 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(1))$

$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.05 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.06 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$\text{Tau}_{,ty,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6)$

$\text{Tau}_{,tz,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6)$

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\text{Lambda}_y = 12.30 < \text{Lambda}_{max} = 210.00 \quad \text{Lambda}_z = 24.54 < \text{Lambda}_{max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$

$N_{,Ed}/(X_y \cdot N_{,Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.26 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

$N_{,Ed}/(X_z \cdot N_{,Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.26 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

Profil correct !!!

Conformément au point 5.5.2.(9), la section de la barre a été classifiée comme section de classe 3, bien que conformément au tableau 5.2, elle satisfasse les conditions de la classe 4. Le contrôle de la stabilité sera effectuée conformément au point 5.5.2.(10) comme pour les barres de classe 4.

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 8

POINT : 3

COORDONNEE : $x = 0.23 L = 0.14 \text{ m}$

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif : 9 ULS2 1*1.35+3*1.50

MATERIAU :

INOX $f_y = 240.00 \text{ MPa}$



PARAMETRES DE LA SECTION : L 110x110x5

$h = 11.0 \text{ cm}$

$gM0 = 1.00$

$gM1 = 1.00$

$b = 11.0 \text{ cm}$

$A_y = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_z = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_x = 10.75 \text{ cm}^2$

$tw = 0.5 \text{ cm}$

$I_y = 207.16 \text{ cm}^4$

$I_z = 52.04 \text{ cm}^4$

$I_x = 0.75 \text{ cm}^4$

$tf = 0.5 \text{ cm}$

$W_{ely} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{elz} = 12.53 \text{ cm}^3$

$W_{eff,y} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{eff,z} = 12.53 \text{ cm}^3$

$A_{eff} = 10.75 \text{ cm}^2$

Attention : Profilé de classe 4 ! Le logiciel ne fait pas l'analyse complète de la classe 4 pour ce type de profilé, mais il les analyse comme les sections de classe 3.

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

$N_{,Ed} = 310.09 \text{ daN}$

$M_{y,Ed} = 8.16 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,Ed} = 0.51 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,Ed} = -5.46 \text{ daN}$

$N_{c,Rd} = 25800.00 \text{ daN}$

$M_{y,el,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,el,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,T,Rd} = 7602.16 \text{ daN}$

$N_{b,Rd} = 24772.25 \text{ daN}$

$M_{y,c,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,c,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{z,Ed} = 53.70 \text{ daN}$

$V_{z,T,Rd} = 7602.16 \text{ daN}$

$T_{t,Ed} = -0.10 \text{ daN}\cdot\text{m}$

Classe de la section = 4



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

$L_y = 0.62 \text{ m}$

$L_{am,y} = 0.16$

$L_{cr,y} = 0.62 \text{ m}$

$X_y = 1.00$

$L_{am,y} = 14.12$

$k_{zy} = 1.00$



en z :

$L_z = 0.62 \text{ m}$

$L_{am,z} = 0.31$

$L_{cr,z} = 0.62 \text{ m}$

$X_z = 0.96$

$L_{am,z} = 28.18$

$k_{zz} = 1.00$

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N_{,Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.03 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(2))$

$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$\tau_{y,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6)$

$\tau_{z,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6)$

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\lambda_{y} = 14.12 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \lambda_{z} = 28.18 < \lambda_{max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$

$N_{,Ed}/(X_y \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.02 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

$N_{,Ed}/(X_z \cdot N_{Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.02 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 9

POINT : 3

COORDONNEE : $x = 0.26 L = 0.14 \text{ m}$

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif : 10 ULS3 1*1.35+4*1.50

MATERIAU :

INOX $f_y = 240.00 \text{ MPa}$



PARAMETRES DE LA SECTION : L 110x110x5

$h = 11.0 \text{ cm}$

$gM0 = 1.00$

$gM1 = 1.00$

$b = 11.0 \text{ cm}$

$A_y = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_z = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_x = 10.75 \text{ cm}^2$

$tw = 0.5 \text{ cm}$

$I_y = 207.16 \text{ cm}^4$

$I_z = 52.04 \text{ cm}^4$

$I_x = 0.75 \text{ cm}^4$

$tf = 0.5 \text{ cm}$

$W_{ely} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{elz} = 12.53 \text{ cm}^3$

$W_{eff,y} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{eff,z} = 12.53 \text{ cm}^3$

$A_{eff} = 10.75 \text{ cm}^2$

Attention : Profilé de classe 4 ! Le logiciel ne fait pas l'analyse complète de la classe 4 pour ce type de profilé, mais il les analyse comme les sections de classe 3.

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

$N_{,Ed} = 452.75 \text{ daN}$

$M_{y,Ed} = -14.83 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,Ed} = -3.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,Ed} = 33.06 \text{ daN}$

$N_{c,Rd} = 25800.00 \text{ daN}$

$M_{y,el,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,el,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,T,Rd} = 7601.25 \text{ daN}$

$N_{b,Rd} = 25149.71 \text{ daN}$

$M_{y,c,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,c,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{z,Ed} = -91.37 \text{ daN}$

$V_{z,T,Rd} = 7601.25 \text{ daN}$

$T_{t,Ed} = 0.11 \text{ daN}\cdot\text{m}$

Classe de la section = 4



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

$L_y = 0.54 \text{ m}$

$\text{Lam}_y = 0.14$

$L_{cr,y} = 0.54 \text{ m}$

$X_y = 1.00$

$\text{Lam}_y = 12.30$

$k_{zy} = 1.00$



en z :

$L_z = 0.54 \text{ m}$

$\text{Lam}_z = 0.27$

$L_{cr,z} = 0.54 \text{ m}$

$X_z = 0.97$

$\text{Lam}_z = 24.54$

$k_{zz} = 1.00$

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N_{,Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.02 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(2))$

$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$\text{Tau}_{,ty,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6)$

$\text{Tau}_{,tz,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6)$

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\text{Lambda}_y = 12.30 < \text{Lambda}_{,max} = 210.00 \quad \text{Lambda}_z = 24.54 < \text{Lambda}_{,max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$

$N_{,Ed}/(X_y \cdot N_{,Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.05 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

$N_{,Ed}/(X_z \cdot N_{,Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.05 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 10

POINT : 3

COORDONNEE : $x = 0.33 L = 0.20 \text{ m}$

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif : 13 ACC2 (1+7)*1.00

MATERIAU :

INOX $f_y = 240.00 \text{ MPa}$



PARAMETRES DE LA SECTION : L 110x110x5

$h = 11.0 \text{ cm}$

$gM0 = 1.00$

$gM1 = 1.00$

$b = 11.0 \text{ cm}$

$A_y = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_z = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_x = 10.75 \text{ cm}^2$

$tw = 0.5 \text{ cm}$

$I_y = 207.16 \text{ cm}^4$

$I_z = 52.04 \text{ cm}^4$

$I_x = 0.75 \text{ cm}^4$

$tf = 0.5 \text{ cm}$

$W_{ely} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{elz} = 12.53 \text{ cm}^3$

$W_{eff,y} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{eff,z} = 12.53 \text{ cm}^3$

$A_{eff} = 10.75 \text{ cm}^2$

Attention : Profilé de classe 4 ! Le logiciel ne fait pas l'analyse complète de la classe 4 pour ce type de profilé, mais il les analyse comme les sections de classe 3.

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

$N_{,Ed} = 1279.28 \text{ daN}$

$M_{y,Ed} = -249.32 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,Ed} = 109.74 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,Ed} = -548.71 \text{ daN}$

$N_{c,Rd} = 25800.00 \text{ daN}$

$M_{y,el,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,el,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,c,Rd} = 7621.02 \text{ daN}$

$N_{b,Rd} = 24867.41 \text{ daN}$

$M_{y,c,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,c,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{z,Ed} = -1246.58 \text{ daN}$

$V_{z,c,Rd} = 7621.02 \text{ daN}$

Classe de la section = 4



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

$L_y = 0.60 \text{ m}$

$\Lambda_{m,y} = 0.15$

$L_{cr,y} = 0.60 \text{ m}$

$X_y = 1.00$

$\Lambda_{m,y} = 13.67$

$k_{yy} = 1.00$



en z :

$L_z = 0.60 \text{ m}$

$\Lambda_{m,z} = 0.30$

$L_{cr,z} = 0.60 \text{ m}$

$X_z = 0.96$

$\Lambda_{m,z} = 27.27$

$k_{yz} = 1.00$

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N_{,Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.69 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(2))$

$V_{y,Ed}/V_{y,c,Rd} = 0.07 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$

$V_{z,Ed}/V_{z,c,Rd} = 0.16 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\Lambda_{m,y} = 13.67 < \Lambda_{m,max} = 210.00 \quad \Lambda_{m,z} = 27.27 < \Lambda_{m,max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$

$N_{,Ed}/(X_y \cdot N_{,Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.71 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

$N_{,Ed}/(X_z \cdot N_{,Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.71 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 11 Simple bar_11

POINT : 1

COORDONNEE : x = 0.00 L = 0.00 m

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif: 13 ACC2 (1+7)*1.00

MATERIAU :

Steel (S235) $f_y = 235.00$ MPa



PARAMETRES DE LA SECTION : U100x35x3

h=10.0 cm

$gM_0=1.00$

$gM_1=1.00$

b=3.5 cm

$A_y=2.17$ cm²

$A_z=3.00$ cm²

$A_x=4.92$ cm²

tw=0.3 cm

$I_y=70.18$ cm⁴

$I_z=5.25$ cm⁴

$I_x=0.14$ cm⁴

tf=0.3 cm

$W_{ely}=14.04$ cm³

$W_{elz}=1.97$ cm³

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

$N_{,Ed} = 1046.04$ daN

$M_{y,Ed} = 109.20$ daN*m

$M_{z,Ed} = 1.48$ daN*m

$V_{y,Ed} = 20.74$ daN

$N_{c,Rd} = 11562.00$ daN

$M_{y,el,Rd} = 329.83$ daN*m

$M_{z,el,Rd} = 46.23$ daN*m

$V_{y,T,Rd} = 2878.56$ daN

$N_{b,Rd} = 4302.75$ daN

$M_{y,c,Rd} = 329.83$ daN*m

$M_{z,c,Rd} = 46.23$ daN*m

$V_{z,Ed} = -664.52$ daN

$V_{z,T,Rd} = 3975.92$ daN

$T_{t,Ed} = -0.38$ daN*m

Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

$L_y = 1.30$ m

$\lambda_{m,y} = 0.37$

$L_{cr,y} = 1.30$ m

$\chi_y = 0.91$

$\lambda_{m,y} = 34.42$

$\chi_{zy} = 0.90$



en z :

$L_z = 1.30$ m

$\lambda_{m,z} = 1.34$

$L_{cr,z} = 1.30$ m

$\chi_z = 0.37$

$\lambda_{m,z} = 125.89$

$\chi_{zz} = 1.07$

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N_{,Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.43 < 1.00$ (6.2.9.3.(1))

$\sqrt{(\text{Sig}_{,x,Ed})^2 + 3 * (\text{Tau}_{,z,Ed} + \text{Tau}_{,tz,Ed})^2} / (f_y/gM_0) = 0.47 < 1.00$ (6.2.1.(5))

$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.01 < 1.00$ (6.2.6-7)

$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.17 < 1.00$ (6.2.6-7)

$\text{Tau}_{,ty,Ed} / (f_y / (\sqrt{3} * gM_0)) = 0.06 < 1.00$ (6.2.6)

$\text{Tau}_{,tz,Ed} / (f_y / (\sqrt{3} * gM_0)) = 0.06 < 1.00$ (6.2.6)

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\lambda_{m,y} = 34.42 < \lambda_{m,max} = 210.00$ $\lambda_{m,z} = 125.89 < \lambda_{m,max} = 210.00$ STABLE

$N_{,Ed} / (\chi_y * N_{,Rk} / gM_1) + \chi_{yy} * M_{y,Ed} / (\chi_{LT} * M_{y,Rk} / gM_1) + \chi_{yz} * M_{z,Ed} / (M_{z,Rk} / gM_1) = 0.45 < 1.00$ (6.3.3.(4))

$N_{,Ed} / (\chi_z * N_{,Rk} / gM_1) + \chi_{zy} * M_{y,Ed} / (\chi_{LT} * M_{y,Rk} / gM_1) + \chi_{zz} * M_{z,Ed} / (M_{z,Rk} / gM_1) = 0.55 < 1.00$ (6.3.3.(4))

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 12 Simple bar_12

POINT : 3

COORDONNEE : x = 1.00 L = 1.30 m

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif: 13 ACC2 (1+7)*1.00

MATERIAU :

Steel (S235) fy = 235.00 MPa



PARAMETRES DE LA SECTION : U100x35x3

h=10.0 cm

gM0=1.00

gM1=1.00

b=3.5 cm

Ay=2.17 cm²

Az=3.00 cm²

Ax=4.92 cm²

tw=0.3 cm

Iy=70.18 cm⁴

Iz=5.25 cm⁴

Ix=0.14 cm⁴

tf=0.3 cm

Wely=14.04 cm³

Welz=1.97 cm³

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

N,Ed = 564.97 daN

My,Ed = -29.01 daN*m

Mz,Ed = -0.17 daN*m

Vy,Ed = 1.54 daN

Nc,Rd = 11562.00 daN

My,el,Rd = 329.83 daN*m

Mz,el,Rd = 46.23 daN*m

Vy,T,Rd = 2930.35 daN

Nb,Rd = 4302.75 daN

My,c,Rd = 329.83 daN*m

Mz,c,Rd = 46.23 daN*m

Vz,Ed = -162.95 daN

Vz,T,Rd = 4047.44 daN

Tt,Ed = -0.09 daN*m

Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

Ly = 1.30 m

Lam_y = 0.37

Lcr,y = 1.30 m

Xy = 0.91

Lamy = 34.42

kzy = 0.95



en z :

Lz = 1.30 m

Lam_z = 1.34

Lcr,z = 1.30 m

Xz = 0.37

Lamz = 125.89

kzz = 1.04

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N,Ed/Nc,Rd + My,Ed/My,c,Rd + Mz,Ed/Mz,c,Rd = 0.14 < 1.00$ (6.2.9.3.(1))

$\sqrt{(\text{Sig}_x,Ed)^2 + 3 * (\text{Tau}_{z,Ed} + \text{Tau}_{tz,Ed})^2} / (fy/gM0) = 0.15 < 1.00$ (6.2.1.(5))

$Vy,Ed/Vy,T,Rd = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)

$Vz,Ed/Vz,T,Rd = 0.04 < 1.00$ (6.2.6-7)

$\text{Tau}_{ty,Ed} / (fy / (\sqrt{3} * gM0)) = 0.01 < 1.00$ (6.2.6)

$\text{Tau}_{tz,Ed} / (fy / (\sqrt{3} * gM0)) = 0.01 < 1.00$ (6.2.6)

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\text{Lambda}_y = 34.42 < \text{Lambda}_{max} = 210.00$ $\text{Lambda}_z = 125.89 < \text{Lambda}_{max} = 210.00$ STABLE

$N,Ed / (Xy * N,Rk/gM1) + kyy * My,Ed / (XLT * My,Rk/gM1) + kyz * Mz,Ed / (Mz,Rk/gM1) = 0.15 < 1.00$ (6.3.3.(4))

$N,Ed / (Xz * N,Rk/gM1) + kzy * My,Ed / (XLT * My,Rk/gM1) + kzz * Mz,Ed / (Mz,Rk/gM1) = 0.22 < 1.00$ (6.3.3.(4))

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 13 Simple bar_13

POINT : 1

COORDONNEE : x = 0.00 L = 0.00 m

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif : 13 ACC2 (1+7)*1.00

MATERIAU :

Steel (S235) fy = 235.00 MPa



PARAMETRES DE LA SECTION : U100x35x3

h=10.0 cm

gM0=1.00

gM1=1.00

b=3.5 cm

Ay=2.17 cm²

Az=3.00 cm²

Ax=4.92 cm²

tw=0.3 cm

Iy=70.18 cm⁴

Iz=5.25 cm⁴

Ix=0.14 cm⁴

tf=0.3 cm

Wely=14.04 cm³

Welz=1.97 cm³

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

N,Ed = 439.31 daN

My,Ed = 30.23 daN*m

Mz,Ed = 0.88 daN*m

Vy,Ed = 6.62 daN

Nc,Rd = 11562.00 daN

My,el,Rd = 329.83 daN*m

Mz,el,Rd = 46.23 daN*m

Vy,T,Rd = 2881.22 daN

Nb,Rd = 4302.75 daN

My,c,Rd = 329.83 daN*m

Mz,c,Rd = 46.23 daN*m

Vz,Ed = -188.65 daN

Vz,T,Rd = 3979.59 daN

Tt,Ed = -0.37 daN*m

Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

Ly = 1.30 m

Lam_y = 0.37

Lcr,y = 1.30 m

Xy = 0.91

Lamy = 34.42

kzy = 0.96



en z :

Lz = 1.30 m

Lam_z = 1.34

Lcr,z = 1.30 m

Xz = 0.37

Lamz = 125.89

kzz = 1.03

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N,Ed/Nc,Rd + My,Ed/My,c,Rd + Mz,Ed/Mz,c,Rd = 0.14 < 1.00$ (6.2.9.3.(1))

$\sqrt{(\text{Sig},x,Ed)^2 + 3*(\text{Tau},z,Ed + \text{Tau},tz,Ed)^2}/(fy/gM0) = 0.16 < 1.00$ (6.2.1.(5))

$Vy,Ed/Vy,T,Rd = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)

$Vz,Ed/Vz,T,Rd = 0.05 < 1.00$ (6.2.6-7)

$\text{Tau},ty,Ed/(fy/(\sqrt{3}*gM0)) = 0.06 < 1.00$ (6.2.6)

$\text{Tau},tz,Ed/(fy/(\sqrt{3}*gM0)) = 0.06 < 1.00$ (6.2.6)

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\text{Lambda},y = 34.42 < \text{Lambda},max = 210.00$ $\text{Lambda},z = 125.89 < \text{Lambda},max = 210.00$ STABLE

$N,Ed/(Xy*N,Rk/gM1) + kyy*My,Ed/(XLT*My,Rk/gM1) + kyz*Mz,Ed/(Mz,Rk/gM1) = 0.14 < 1.00$ (6.3.3.(4))

$N,Ed/(Xz*N,Rk/gM1) + kzy*My,Ed/(XLT*My,Rk/gM1) + kzz*Mz,Ed/(Mz,Rk/gM1) = 0.20 < 1.00$ (6.3.3.(4))

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 14 Simple bar_14

POINT : 3

COORDONNEE : x = 0.11 L = 0.14 m

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif : 10 ULS3 1*1.35+4*1.50

MATERIAU :

Steel (S235) fy = 235.00 MPa



PARAMETRES DE LA SECTION : U100x35x3

h=10.0 cm

gM0=1.00

gM1=1.00

b=3.5 cm

Ay=2.17 cm²

Az=3.00 cm²

Ax=4.92 cm²

tw=0.3 cm

Iy=70.18 cm⁴

Iz=5.25 cm⁴

Ix=0.14 cm⁴

tf=0.3 cm

Wely=14.04 cm³

Welz=1.97 cm³

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

N,Ed = -28.30 daN

My,Ed = 1.83 daN*m

Mz,Ed = 0.08 daN*m

Vy,Ed = -2.01 daN

Nt,Rd = 11562.00 daN

My,el,Rd = 329.83 daN*m

Mz,el,Rd = 46.23 daN*m

Vy,T,Rd = 2924.92 daN

My,c,Rd = 329.83 daN*m

Mz,c,Rd = 46.23 daN*m

Vz,Ed = 23.71 daN

Vz,T,Rd = 4039.94 daN

Tt,Ed = 0.12 daN*m

Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :



en z :

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$$N_{Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(1))$$

$$\sqrt{(\text{Sig}_{x,Ed})^2 + 3 * (\text{Tau}_{z,Ed} + \text{Tau}_{tz,Ed})^2} / (f_y / g_{M0}) = 0.03 < 1.00 \quad (6.2.1.(5))$$

$$V_{y,Ed} / V_{y,T,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$V_{z,Ed} / V_{z,T,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$\text{Tau}_{ty,Ed} / (f_y / (\sqrt{3} * g_{M0})) = 0.02 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

$$\text{Tau}_{tz,Ed} / (f_y / (\sqrt{3} * g_{M0})) = 0.02 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 15 Simple bar_15

POINT : 1

COORDONNEE : x = 0.00 L = 0.00 m

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif : 11 ULS4 1*1.35+5*1.50

MATERIAU :

Steel (S235) $f_y = 235.00$ MPa



PARAMETRES DE LA SECTION : U100x35x3

h=10.0 cm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=3.5 cm	Ay=2.17 cm ²	Az=3.00 cm ²	Ax=4.92 cm ²
tw=0.3 cm	Iy=70.18 cm ⁴	Iz=5.25 cm ⁴	Ix=0.14 cm ⁴
tf=0.3 cm	Wely=14.04 cm ³	Welz=1.97 cm ³	

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

N,Ed = 40.54 daN	My,Ed = 5.59 daN*m	Mz,Ed = 0.00 daN*m	Vy,Ed = -0.35 daN
Nc,Rd = 11562.00 daN	My,el,Rd = 329.83 daN*m	Mz,el,Rd = 46.23 daN*m	Vy,T,Rd = 2858.16 daN
Nb,Rd = 4302.75 daN	My,c,Rd = 329.83 daN*m	Mz,c,Rd = 46.23 daN*m	Vz,Ed = -42.69 daN
			Vz,T,Rd = 3947.73 daN
			Tt,Ed = -0.50 daN*m
			Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

L _y = 1.30 m	Lam _y = 0.37
L _{cr,y} = 1.30 m	X _y = 0.91
Lam _y = 34.42	k _{zy} = 1.00



en z :

L _z = 1.30 m	Lam _z = 1.34
L _{cr,z} = 1.30 m	X _z = 0.37
Lam _z = 125.89	k _{zz} = 1.00

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N,Ed/N_{c,Rd} + My,Ed/My,c,Rd + Mz,Ed/Mz,c,Rd = 0.02 < 1.00$ (6.2.9.3.(1))
 $\sqrt{(\text{Sig}_{x,Ed})^2 + 3 * (\text{Tau}_{z,Ed} + \text{Tau}_{tz,Ed})^2} / (f_y/gM0) = 0.09 < 1.00$ (6.2.1.(5))
 $Vy,Ed/Vy,T,Rd = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)
 $Vz,Ed/Vz,T,Rd = 0.01 < 1.00$ (6.2.6-7)
 $\text{Tau}_{ty,Ed} / (f_y / (\sqrt{3} * gM0)) = 0.07 < 1.00$ (6.2.6)
 $\text{Tau}_{tz,Ed} / (f_y / (\sqrt{3} * gM0)) = 0.07 < 1.00$ (6.2.6)

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\lambda_{y} = 34.42 < \lambda_{y,max} = 210.00$ $\lambda_{z} = 125.89 < \lambda_{z,max} = 210.00$ STABLE
 $N,Ed / (X_y * N_{Rk} / gM1) + k_{yy} * My,Ed / (XLT * My_{Rk} / gM1) + k_{yz} * Mz,Ed / (Mz_{Rk} / gM1) = 0.02 < 1.00$ (6.3.3.(4))
 $N,Ed / (X_z * N_{Rk} / gM1) + k_{zy} * My,Ed / (XLT * My_{Rk} / gM1) + k_{zz} * Mz,Ed / (Mz_{Rk} / gM1) = 0.03 < 1.00$ (6.3.3.(4))

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 16 Simple bar_16

POINT : 1

COORDONNEE : x = 0.00 L = 0.00 m

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif: 9 ULS2 1*1.35+3*1.50

MATERIAU :

Steel (S235) fy = 235.00 MPa



PARAMETRES DE LA SECTION : U100x35x3

h=10.0 cm

gM0=1.00

gM1=1.00

b=3.5 cm

Ay=2.17 cm²

Az=3.00 cm²

Ax=4.92 cm²

tw=0.3 cm

Iy=70.18 cm⁴

Iz=5.25 cm⁴

Ix=0.14 cm⁴

tf=0.3 cm

Wely=14.04 cm³

Welz=1.97 cm³

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

N,Ed = -22.78 daN

My,Ed = 2.32 daN*m

Mz,Ed = -0.20 daN*m

Vy,Ed = -2.03 daN

Nt,Rd = 11562.00 daN

My,el,Rd = 329.83 daN*m

Mz,el,Rd = 46.23 daN*m

Vy,T,Rd = 2924.34 daN

My,c,Rd = 329.83 daN*m

Mz,c,Rd = 46.23 daN*m

Vz,Ed = -13.97 daN

Vz,T,Rd = 4039.14 daN

Tt,Ed = 0.13 daN*m

Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :



en z :

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N_{Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.01 < 1.00$ (6.2.9.3.(1))

$\sqrt{(\sigma_{x,Ed})^2 + 3 \cdot (\tau_{z,Ed} + \tau_{t,Ed})^2} / (f_y/g_{M0}) = 0.02 < 1.00$ (6.2.1.(5))

$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)

$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)

$\tau_{t,Ed}/(f_y/(\sqrt{3} \cdot g_{M0})) = 0.02 < 1.00$ (6.2.6)

$\tau_{z,Ed}/(f_y/(\sqrt{3} \cdot g_{M0})) = 0.02 < 1.00$ (6.2.6)

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 17 Simple bar_17

POINT : 1

COORDONNEE : x = 0.00 L = 0.00 m

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif: 8 ULS1 1*1.35+2*1.50

MATERIAU :

Steel (S235) $f_y = 235.00$ MPa



PARAMETRES DE LA SECTION : U100x35x3

h=10.0 cm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=3.5 cm	Ay=2.17 cm ²	Az=3.00 cm ²	Ax=4.92 cm ²
tw=0.3 cm	Iy=70.18 cm ⁴	Iz=5.25 cm ⁴	Ix=0.14 cm ⁴
tf=0.3 cm	Wely=14.04 cm ³	Welz=1.97 cm ³	

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

N,Ed = 23.12 daN	My,Ed = 5.34 daN*m	Mz,Ed = -0.09 daN*m	Vy,Ed = -1.22 daN
Nc,Rd = 11562.00 daN	My,el,Rd = 329.83 daN*m	Mz,el,Rd = 46.23 daN*m	Vy,T,Rd = 2804.88 daN
Nb,Rd = 4302.75 daN	My,c,Rd = 329.83 daN*m	Mz,c,Rd = 46.23 daN*m	Vz,Ed = -41.25 daN
			Vz,T,Rd = 3874.14 daN
			Tt,Ed = -0.78 daN*m
			Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

Ly = 1.30 m	Lam_y = 0.37
Lcr,y = 1.30 m	Xy = 0.91
Lamy = 34.42	kzy = 1.00



en z :

Lz = 1.30 m	Lam_z = 1.34
Lcr,z = 1.30 m	Xz = 0.37
Lamz = 125.89	kzz = 1.00

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$$N_{Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.02 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(1))$$

$$\sqrt{(\text{Sig}_{x,Ed})^2 + 3 * (\text{Tau}_{z,Ed} + \text{Tau}_{tz,Ed})^2} / (f_y/gM0) = 0.13 < 1.00 \quad (6.2.1.(5))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$\text{Tau}_{ty,Ed} / (f_y / (\sqrt{3} * gM0)) = 0.12 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

$$\text{Tau}_{tz,Ed} / (f_y / (\sqrt{3} * gM0)) = 0.12 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$$\lambda_{y} = 34.42 < \lambda_{y,max} = 210.00 \quad \lambda_{z} = 125.89 < \lambda_{z,max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N_{Ed} / (X_y * N_{Rk} / gM1) + k_{yy} * M_{y,Ed} / (XLT * M_{y,Rk} / gM1) + k_{yz} * M_{z,Ed} / (M_{z,Rk} / gM1) = 0.02 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N_{Ed} / (X_z * N_{Rk} / gM1) + k_{zy} * M_{y,Ed} / (XLT * M_{y,Rk} / gM1) + k_{zz} * M_{z,Ed} / (M_{z,Rk} / gM1) = 0.02 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 18 Simple bar_18

POINT : 3

COORDONNEE : x = 1.00 L = 1.30 m

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif: 8 ULS1 1*1.35+2*1.50

MATERIAU :

Steel (S235) fy = 235.00 MPa



PARAMETRES DE LA SECTION : U100x35x3

h=10.0 cm

gM0=1.00

gM1=1.00

b=3.5 cm

Ay=2.17 cm²

Az=3.00 cm²

Ax=4.92 cm²

tw=0.3 cm

Iy=70.18 cm⁴

Iz=5.25 cm⁴

Ix=0.14 cm⁴

tf=0.3 cm

Wely=14.04 cm³

Welz=1.97 cm³

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

N,Ed = 16.81 daN

My,Ed = 1.48 daN*m

Mz,Ed = -0.44 daN*m

Vy,Ed = 3.33 daN

Nc,Rd = 11562.00 daN

My,el,Rd = 329.83 daN*m

Mz,el,Rd = 46.23 daN*m

Vy,T,Rd = 2910.45 daN

Nb,Rd = 4302.75 daN

My,c,Rd = 329.83 daN*m

Mz,c,Rd = 46.23 daN*m

Vz,Ed = 10.39 daN

Vz,T,Rd = 4019.96 daN

Tt,Ed = -0.21 daN*m

Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

Ly = 1.30 m

Lam_y = 0.37

Lcr,y = 1.30 m

Xy = 0.91

Lamy = 34.42

kzy = 1.00



en z :

Lz = 1.30 m

Lam_z = 1.34

Lcr,z = 1.30 m

Xz = 0.37

Lamz = 125.89

kzz = 1.00

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N,Ed/Nc,Rd + My,Ed/My,c,Rd + Mz,Ed/Mz,c,Rd = 0.02 < 1.00$ (6.2.9.3.(1))

$\sqrt{(\text{Sig}_x,Ed)^2 + 3*(\text{Tau}_{z,Ed} + \text{Tau}_{tz,Ed})^2}/(fy/gM0) = 0.04 < 1.00$ (6.2.1.(5))

$Vy,Ed/Vy,T,Rd = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)

$Vz,Ed/Vz,T,Rd = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)

$\text{Tau}_{ty,Ed}/(fy/(\sqrt{3}*gM0)) = 0.03 < 1.00$ (6.2.6)

$\text{Tau}_{tz,Ed}/(fy/(\sqrt{3}*gM0)) = 0.03 < 1.00$ (6.2.6)

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\text{Lambda}_y = 34.42 < \text{Lambda}_{max} = 210.00$ $\text{Lambda}_z = 125.89 < \text{Lambda}_{max} = 210.00$ STABLE

$N,Ed/(Xy*N,Rk/gM1) + kyy*My,Ed/(XLT*My,Rk/gM1) + kyz*Mz,Ed/(Mz,Rk/gM1) = 0.02 < 1.00$ (6.3.3.(4))

$N,Ed/(Xz*N,Rk/gM1) + kzy*My,Ed/(XLT*My,Rk/gM1) + kzz*Mz,Ed/(Mz,Rk/gM1) = 0.02 < 1.00$ (6.3.3.(4))

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 19 Simple bar_19

POINT : 1

COORDONNEE : x = 0.00 L = 0.00 m

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif : 13 ACC2 (1+7)*1.00

MATERIAU :

Steel (S235) fy = 235.00 MPa



PARAMETRES DE LA SECTION : U100x35x3

h=10.0 cm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=3.5 cm	Ay=2.17 cm ²	Az=3.00 cm ²	Ax=4.92 cm ²
tw=0.3 cm	Iy=70.18 cm ⁴	Iz=5.25 cm ⁴	Ix=0.14 cm ⁴
tf=0.3 cm	Wely=14.04 cm ³	Welz=1.97 cm ³	

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

N,Ed = 1046.04 daN	My,Ed = -109.20 daN*m	Mz,Ed = 1.48 daN*m	Vy,Ed = 20.74 daN
Nc,Rd = 11562.00 daN	My,el,Rd = 329.83 daN*m	Mz,el,Rd = 46.23 daN*m	Vy,T,Rd = 2878.56 daN
Nb,Rd = 4302.75 daN	My,c,Rd = 329.83 daN*m	Mz,c,Rd = 46.23 daN*m	Vz,Ed = 664.52 daN
			Vz,T,Rd = 3975.92 daN
			Tt,Ed = 0.38 daN*m
			Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

Ly = 1.30 m	Lam_y = 0.37
Lcr,y = 1.30 m	Xy = 0.91
Lamy = 34.42	kzy = 0.90



en z :

Lz = 1.30 m	Lam_z = 1.34
Lcr,z = 1.30 m	Xz = 0.37
Lamz = 125.89	kzz = 1.07

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$$N,Ed/Nc,Rd + My,Ed/My,c,Rd + Mz,Ed/Mz,c,Rd = 0.43 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(1))$$

$$\sqrt{(\text{Sig},x,Ed)^2 + 3*(\text{Tau},z,Ed + \text{Tau},tz,Ed)^2} / (fy/gM0) = 0.47 < 1.00 \quad (6.2.1.(5))$$

$$Vy,Ed/Vy,T,Rd = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$Vz,Ed/Vz,T,Rd = 0.17 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$\text{Tau},ty,Ed / (fy / (\sqrt{3} * gM0)) = 0.06 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

$$\text{Tau},tz,Ed / (fy / (\sqrt{3} * gM0)) = 0.06 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$$\text{Lambda},y = 34.42 < \text{Lambda},\text{max} = 210.00 \quad \text{Lambda},z = 125.89 < \text{Lambda},\text{max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N,Ed / (Xy * N,Rk / gM1) + kyy * My,Ed / (XLT * My,Rk / gM1) + kyz * Mz,Ed / (Mz,Rk / gM1) = 0.45 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N,Ed / (Xz * N,Rk / gM1) + kzy * My,Ed / (XLT * My,Rk / gM1) + kzz * Mz,Ed / (Mz,Rk / gM1) = 0.55 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 20 Simple bar_20

POINT : 3

COORDONNEE : x = 1.00 L = 1.30 m

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif: 13 ACC2 (1+7)*1.00

MATERIAU :

Steel (S235) fy = 235.00 MPa



PARAMETRES DE LA SECTION : U100x35x3

h=10.0 cm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=3.5 cm	Ay=2.17 cm ²	Az=3.00 cm ²	Ax=4.92 cm ²
tw=0.3 cm	Iy=70.18 cm ⁴	Iz=5.25 cm ⁴	Ix=0.14 cm ⁴
tf=0.3 cm	Wely=14.04 cm ³	Welz=1.97 cm ³	

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

N,Ed = 564.97 daN	My,Ed = 29.01 daN*m	Mz,Ed = -0.17 daN*m	Vy,Ed = 1.54 daN
Nc,Rd = 11562.00 daN	My,el,Rd = 329.83 daN*m	Mz,el,Rd = 46.23 daN*m	Vy,T,Rd = 2930.35 daN
Nb,Rd = 4302.75 daN	My,c,Rd = 329.83 daN*m	Mz,c,Rd = 46.23 daN*m	Vz,Ed = 162.95 daN
			Vz,T,Rd = 4047.44 daN
			Tt,Ed = 0.09 daN*m
			Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

Ly = 1.30 m	Lam_y = 0.37
Lcr,y = 1.30 m	Xy = 0.91
Lamy = 34.42	kzy = 0.95



en z :

Lz = 1.30 m	Lam_z = 1.34
Lcr,z = 1.30 m	Xz = 0.37
Lamz = 125.89	kzz = 1.04

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N,Ed/Nc,Rd + My,Ed/My,c,Rd + Mz,Ed/Mz,c,Rd = 0.14 < 1.00$ (6.2.9.3.(1))
 $\sqrt{(\text{Sig},x,Ed)^2 + 3*(\text{Tau},z,Ed + \text{Tau},tz,Ed)^2}/(fy/gM0) = 0.15 < 1.00$ (6.2.1.(5))
 $Vy,Ed/Vy,T,Rd = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)
 $Vz,Ed/Vz,T,Rd = 0.04 < 1.00$ (6.2.6-7)
 $\text{Tau},ty,Ed/(fy/(\sqrt{3}*gM0)) = 0.01 < 1.00$ (6.2.6)
 $\text{Tau},tz,Ed/(fy/(\sqrt{3}*gM0)) = 0.01 < 1.00$ (6.2.6)

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\text{Lambda},y = 34.42 < \text{Lambda},\text{max} = 210.00$ $\text{Lambda},z = 125.89 < \text{Lambda},\text{max} = 210.00$ STABLE
 $N,Ed/(Xy*N,Rk/gM1) + kyy*My,Ed/(XLT*My,Rk/gM1) + kyz*Mz,Ed/(Mz,Rk/gM1) = 0.15 < 1.00$ (6.3.3.(4))
 $N,Ed/(Xz*N,Rk/gM1) + kzy*My,Ed/(XLT*My,Rk/gM1) + kzz*Mz,Ed/(Mz,Rk/gM1) = 0.22 < 1.00$ (6.3.3.(4))

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 21 Simple bar_21

POINT : 1

COORDONNEE : x = 0.00 L = 0.00 m

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif: 13 ACC2 (1+7)*1.00

MATERIAU :

Steel (S235) fy = 235.00 MPa



PARAMETRES DE LA SECTION : U100x35x3

h=10.0 cm

gM0=1.00

gM1=1.00

b=3.5 cm

Ay=2.17 cm²

Az=3.00 cm²

Ax=4.92 cm²

tw=0.3 cm

Iy=70.18 cm⁴

Iz=5.25 cm⁴

Ix=0.14 cm⁴

tf=0.3 cm

Wely=14.04 cm³

Welz=1.97 cm³

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

N,Ed = 439.31 daN

My,Ed = -30.23 daN*m

Mz,Ed = 0.88 daN*m

Vy,Ed = 6.62 daN

Nc,Rd = 11562.00 daN

My,el,Rd = 329.83 daN*m

Mz,el,Rd = 46.23 daN*m

Vy,T,Rd = 2881.22 daN

Nb,Rd = 4302.75 daN

My,c,Rd = 329.83 daN*m

Mz,c,Rd = 46.23 daN*m

Vz,Ed = 188.65 daN

Vz,T,Rd = 3979.59 daN

Tt,Ed = 0.37 daN*m

Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

Ly = 1.30 m

Lam_y = 0.37

Lcr,y = 1.30 m

Xy = 0.91

Lamy = 34.42

kzy = 0.96



en z :

Lz = 1.30 m

Lam_z = 1.34

Lcr,z = 1.30 m

Xz = 0.37

Lamz = 125.89

kzz = 1.03

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N,Ed/Nc,Rd + My,Ed/My,c,Rd + Mz,Ed/Mz,c,Rd = 0.14 < 1.00$ (6.2.9.3.(1))

$\sqrt{(\text{Sig},x,Ed)^2 + 3*(\text{Tau},z,Ed + \text{Tau},tz,Ed)^2} / (fy/gM0) = 0.16 < 1.00$ (6.2.1.(5))

$Vy,Ed/Vy,T,Rd = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)

$Vz,Ed/Vz,T,Rd = 0.05 < 1.00$ (6.2.6-7)

$\text{Tau},ty,Ed / (fy / (\sqrt{3} * gM0)) = 0.06 < 1.00$ (6.2.6)

$\text{Tau},tz,Ed / (fy / (\sqrt{3} * gM0)) = 0.06 < 1.00$ (6.2.6)

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\text{Lambda},y = 34.42 < \text{Lambda},\text{max} = 210.00$ $\text{Lambda},z = 125.89 < \text{Lambda},\text{max} = 210.00$ STABLE

$N,Ed / (Xy * N,Rk / gM1) + kyy * My,Ed / (XLT * My,Rk / gM1) + kyz * Mz,Ed / (Mz,Rk / gM1) = 0.14 < 1.00$ (6.3.3.(4))

$N,Ed / (Xz * N,Rk / gM1) + kzy * My,Ed / (XLT * My,Rk / gM1) + kzz * Mz,Ed / (Mz,Rk / gM1) = 0.20 < 1.00$ (6.3.3.(4))

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 22 Simple bar_22

POINT : 3

COORDONNEE : x = 1.00 L = 1.30 m

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif: 10 ULS3 1*1.35+4*1.50

MATERIAU :

Steel (S235) fy = 235.00 MPa



PARAMETRES DE LA SECTION : U100x35x3

h=10.0 cm

gM0=1.00

gM1=1.00

b=3.5 cm

Ay=2.17 cm²

Az=3.00 cm²

Ax=4.92 cm²

tw=0.3 cm

Iy=70.18 cm⁴

Iz=5.25 cm⁴

Ix=0.14 cm⁴

tf=0.3 cm

Wely=14.04 cm³

Welz=1.97 cm³

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

N,Ed = -15.24 daN

My,Ed = -3.57 daN*m

Mz,Ed = -0.20 daN*m

Vy,Ed = 2.03 daN

Nt,Rd = 11562.00 daN

My,el,Rd = 329.83 daN*m

Mz,el,Rd = 46.23 daN*m

Vy,T,Rd = 2924.09 daN

My,c,Rd = 329.83 daN*m

Mz,c,Rd = 46.23 daN*m

Vz,Ed = -23.16 daN

Vz,T,Rd = 4038.80 daN

Tt,Ed = 0.13 daN*m

Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :



en z :

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$$N_{Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(1))$$

$$\sqrt{(\text{Sig}_{x,Ed})^2 + 3 * (\text{Tau}_{z,Ed} + \text{Tau}_{tz,Ed})^2} / (f_y / g_{M0}) = 0.03 < 1.00 \quad (6.2.1.(5))$$

$$V_{y,Ed} / V_{y,T,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$V_{z,Ed} / V_{z,T,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$\text{Tau}_{ty,Ed} / (f_y / (\sqrt{3} * g_{M0})) = 0.02 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

$$\text{Tau}_{tz,Ed} / (f_y / (\sqrt{3} * g_{M0})) = 0.02 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 23 Simple bar_23

POINT : 1

COORDONNEE : x = 0.00 L = 0.00 m

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif: 9 ULS2 1*1.35+3*1.50

MATERIAU :

Steel (S235) fy = 235.00 MPa



PARAMETRES DE LA SECTION : U100x35x3

h=10.0 cm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=3.5 cm	Ay=2.17 cm ²	Az=3.00 cm ²	Ax=4.92 cm ²
tw=0.3 cm	Iy=70.18 cm ⁴	Iz=5.25 cm ⁴	Ix=0.14 cm ⁴
tf=0.3 cm	Wely=14.04 cm ³	Welz=1.97 cm ³	

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

N,Ed = 9.80 daN	My,Ed = -5.13 daN*m	Mz,Ed = -0.10 daN*m	Vy,Ed = -0.76 daN
Nc,Rd = 11562.00 daN	My,el,Rd = 329.83 daN*m	Mz,el,Rd = 46.23 daN*m	Vy,T,Rd = 2858.08 daN
Nb,Rd = 4302.75 daN	My,c,Rd = 329.83 daN*m	Mz,c,Rd = 46.23 daN*m	Vz,Ed = 45.89 daN
			Vz,T,Rd = 3947.63 daN
			Tt,Ed = 0.50 daN*m
			Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

Ly = 1.30 m	Lam_y = 0.37
Lcr,y = 1.30 m	Xy = 0.91
Lamy = 34.42	kzy = 1.00



en z :

Lz = 1.30 m	Lam_z = 1.34
Lcr,z = 1.30 m	Xz = 0.37
Lamz = 125.89	kzz = 1.00

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N,Ed/Nc,Rd + My,Ed/My,c,Rd + Mz,Ed/Mz,c,Rd = 0.02 < 1.00$ (6.2.9.3.(1))
 $\sqrt{(\text{Sig},x,Ed)^2 + 3*(\text{Tau},z,Ed + \text{Tau},tz,Ed)^2}/(fy/gM0) = 0.09 < 1.00$ (6.2.1.(5))
 $Vy,Ed/Vy,T,Rd = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)
 $Vz,Ed/Vz,T,Rd = 0.01 < 1.00$ (6.2.6-7)
 $\text{Tau},ty,Ed/(fy/(\sqrt{3}*gM0)) = 0.07 < 1.00$ (6.2.6)
 $\text{Tau},tz,Ed/(fy/(\sqrt{3}*gM0)) = 0.07 < 1.00$ (6.2.6)

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\text{Lambda},y = 34.42 < \text{Lambda},\text{max} = 210.00$ $\text{Lambda},z = 125.89 < \text{Lambda},\text{max} = 210.00$ STABLE
 $N,Ed/(Xy*N,Rk/gM1) + kyy*My,Ed/(XLT*My,Rk/gM1) + kyz*Mz,Ed/(Mz,Rk/gM1) = 0.02 < 1.00$ (6.3.3.(4))
 $N,Ed/(Xz*N,Rk/gM1) + kzy*My,Ed/(XLT*My,Rk/gM1) + kzz*Mz,Ed/(Mz,Rk/gM1) = 0.02 < 1.00$ (6.3.3.(4))

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.
TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 24 Simple bar_24

POINT : 3

COORDONNEE : x = 1.00 L = 1.30 m

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif: 10 ULS3 1*1.35+4*1.50

MATERIAU :

Steel (S235) fy = 235.00 MPa



PARAMETRES DE LA SECTION : U100x35x3

h=10.0 cm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=3.5 cm	Ay=2.17 cm ²	Az=3.00 cm ²	Ax=4.92 cm ²
tw=0.3 cm	Iy=70.18 cm ⁴	Iz=5.25 cm ⁴	Ix=0.14 cm ⁴
tf=0.3 cm	Wely=14.04 cm ³	Welz=1.97 cm ³	

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

N,Ed = -21.27 daN	My,Ed = -2.86 daN*m	Mz,Ed = -0.20 daN*m	Vy,Ed = 2.03 daN
Nt,Rd = 11562.00 daN	My,el,Rd = 329.83 daN*m	Mz,el,Rd = 46.23 daN*m	Vy,T,Rd = 2924.33 daN
	My,c,Rd = 329.83 daN*m	Mz,c,Rd = 46.23 daN*m	Vz,Ed = -17.36 daN
			Vz,T,Rd = 4039.13 daN
			Tt,Ed = 0.13 daN*m
			Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :



en z :

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N_{Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.01 < 1.00$ (6.2.9.3.(1))
 $\sqrt{(\sigma_{x,Ed})^2 + 3 \cdot (\tau_{z,Ed} + \tau_{t,Ed})^2} / (f_y/gM_0) = 0.03 < 1.00$ (6.2.1.(5))
 $V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)
 $V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)
 $\tau_{t,Ed}/(f_y/(\sqrt{3} \cdot gM_0)) = 0.02 < 1.00$ (6.2.6)
 $\tau_{z,Ed}/(f_y/(\sqrt{3} \cdot gM_0)) = 0.02 < 1.00$ (6.2.6)

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 25 Simple bar_25

POINT : 1

COORDONNEE : x = 0.00 L = 0.00 m

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif: 8 ULS1 1*1.35+2*1.50

MATERIAU :

Steel (S235) fy = 235.00 MPa



PARAMETRES DE LA SECTION : U100x35x3

h=10.0 cm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=3.5 cm	Ay=2.17 cm ²	Az=3.00 cm ²	Ax=4.92 cm ²
tw=0.3 cm	Iy=70.18 cm ⁴	Iz=5.25 cm ⁴	Ix=0.14 cm ⁴
tf=0.3 cm	Wely=14.04 cm ³	Welz=1.97 cm ³	

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

N,Ed = 23.12 daN	My,Ed = -5.34 daN*m	Mz,Ed = -0.09 daN*m	Vy,Ed = -1.22 daN
Nc,Rd = 11562.00 daN	My,el,Rd = 329.83 daN*m	Mz,el,Rd = 46.23 daN*m	Vy,T,Rd = 2804.88 daN
Nb,Rd = 4302.75 daN	My,c,Rd = 329.83 daN*m	Mz,c,Rd = 46.23 daN*m	Vz,Ed = 41.25 daN
			Vz,T,Rd = 3874.14 daN
			Tt,Ed = 0.78 daN*m
			Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

Ly = 1.30 m	Lam_y = 0.37
Lcr,y = 1.30 m	Xy = 0.91
Lamy = 34.42	kzy = 1.00



en z :

Lz = 1.30 m	Lam_z = 1.34
Lcr,z = 1.30 m	Xz = 0.37
Lamz = 125.89	kzz = 1.00

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$$N_{Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.02 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(1))$$

$$\sqrt{(\text{Sig}_{x,Ed})^2 + 3 * (\text{Tau}_{z,Ed} + \text{Tau}_{tz,Ed})^2} / (f_y/gM0) = 0.13 < 1.00 \quad (6.2.1.(5))$$

$$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$\text{Tau}_{ty,Ed} / (f_y / (\sqrt{3} * gM0)) = 0.12 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

$$\text{Tau}_{tz,Ed} / (f_y / (\sqrt{3} * gM0)) = 0.12 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$$\lambda_{y} = 34.42 < \lambda_{y,max} = 210.00 \quad \lambda_{z} = 125.89 < \lambda_{z,max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N_{Ed} / (X_y * N_{Rk} / gM1) + k_{yy} * M_{y,Ed} / (XLT * M_{y,Rk} / gM1) + k_{yz} * M_{z,Ed} / (M_{z,Rk} / gM1) = 0.02 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N_{Ed} / (X_z * N_{Rk} / gM1) + k_{zy} * M_{y,Ed} / (XLT * M_{y,Rk} / gM1) + k_{zz} * M_{z,Ed} / (M_{z,Rk} / gM1) = 0.02 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 26 Simple bar_26

POINT : 3

COORDONNEE : x = 1.00 L = 1.30 m

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif: 8 ULS1 1*1.35+2*1.50

MATERIAU :

Steel (S235) fy = 235.00 MPa



PARAMETRES DE LA SECTION : U100x35x3

h=10.0 cm

gM0=1.00

gM1=1.00

b=3.5 cm

Ay=2.17 cm²

Az=3.00 cm²

Ax=4.92 cm²

tw=0.3 cm

Iy=70.18 cm⁴

Iz=5.25 cm⁴

Ix=0.14 cm⁴

tf=0.3 cm

Wely=14.04 cm³

Welz=1.97 cm³

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

N,Ed = 16.81 daN

My,Ed = -1.48 daN*m

Mz,Ed = -0.44 daN*m

Vy,Ed = 3.33 daN

Nc,Rd = 11562.00 daN

My,el,Rd = 329.83 daN*m

Mz,el,Rd = 46.23 daN*m

Vy,T,Rd = 2910.45 daN

Nb,Rd = 4302.75 daN

My,c,Rd = 329.83 daN*m

Mz,c,Rd = 46.23 daN*m

Vz,Ed = -10.39 daN

Vz,T,Rd = 4019.96 daN

Tt,Ed = 0.21 daN*m

Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

Ly = 1.30 m

Lam_y = 0.37

Lcr,y = 1.30 m

Xy = 0.91

Lamy = 34.42

kzy = 1.00



en z :

Lz = 1.30 m

Lam_z = 1.34

Lcr,z = 1.30 m

Xz = 0.37

Lamz = 125.89

kzz = 1.00

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N,Ed/Nc,Rd + My,Ed/My,c,Rd + Mz,Ed/Mz,c,Rd = 0.02 < 1.00$ (6.2.9.3.(1))

$\sqrt{(\text{Sig},x,Ed)^2 + 3*(\text{Tau},z,Ed + \text{Tau},tz,Ed)^2}/(fy/gM0) = 0.04 < 1.00$ (6.2.1.(5))

$Vy,Ed/Vy,T,Rd = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)

$Vz,Ed/Vz,T,Rd = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)

$\text{Tau},ty,Ed/(fy/(\sqrt{3}*gM0)) = 0.03 < 1.00$ (6.2.6)

$\text{Tau},tz,Ed/(fy/(\sqrt{3}*gM0)) = 0.03 < 1.00$ (6.2.6)

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\text{Lambda},y = 34.42 < \text{Lambda},\text{max} = 210.00$ $\text{Lambda},z = 125.89 < \text{Lambda},\text{max} = 210.00$ STABLE

$N,Ed/(Xy*N,Rk/gM1) + kyy*My,Ed/(XLT*My,Rk/gM1) + kyz*Mz,Ed/(Mz,Rk/gM1) = 0.02 < 1.00$ (6.3.3.(4))

$N,Ed/(Xz*N,Rk/gM1) + kzy*My,Ed/(XLT*My,Rk/gM1) + kzz*Mz,Ed/(Mz,Rk/gM1) = 0.02 < 1.00$ (6.3.3.(4))

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 30

POINT : 3

COORDONNEE : $x = 0.23 L = 0.14 m$

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif : 10 ULS3 1*1.35+4*1.50

MATERIAU :

INOX $f_y = 240.00 MPa$



PARAMETRES DE LA SECTION : L 110x110x5

$h = 11.0 cm$

$gM0 = 1.00$

$gM1 = 1.00$

$b = 11.0 cm$

$A_y = 5.50 cm^2$

$A_z = 5.50 cm^2$

$A_x = 10.75 cm^2$

$tw = 0.5 cm$

$I_y = 207.16 cm^4$

$I_z = 52.04 cm^4$

$I_x = 0.75 cm^4$

$tf = 0.5 cm$

$W_{ely} = 26.63 cm^3$

$W_{elz} = 12.53 cm^3$

$W_{eff,y} = 26.63 cm^3$

$W_{eff,z} = 12.53 cm^3$

$A_{eff} = 10.75 cm^2$

Attention : Profilé de classe 4 ! Le logiciel ne fait pas l'analyse complète de la classe 4 pour ce type de profilé, mais il les analyse comme les sections de classe 3.

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

$N_{,Ed} = 182.89 daN$

$M_{y,Ed} = -9.32 daN*m$

$M_{z,Ed} = -0.73 daN*m$

$V_{y,Ed} = 4.47 daN$

$N_{c,Rd} = 25800.00 daN$

$M_{y,el,Rd} = 639.21 daN*m$

$M_{z,el,Rd} = 300.81 daN*m$

$V_{y,T,Rd} = 7601.87 daN$

$N_{b,Rd} = 24772.25 daN$

$M_{y,c,Rd} = 639.21 daN*m$

$M_{z,c,Rd} = 300.81 daN*m$

$V_{z,Ed} = -64.59 daN$

$V_{z,T,Rd} = 7601.87 daN$

$T_{t,Ed} = 0.10 daN*m$

Classe de la section = 4



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

$L_y = 0.62 m$

$Lam_y = 0.16$

$L_{cr,y} = 0.62 m$

$X_y = 1.00$

$L_{amy} = 14.12$

$k_{zy} = 1.00$



en z :

$L_z = 0.62 m$

$Lam_z = 0.31$

$L_{cr,z} = 0.62 m$

$X_z = 0.96$

$Lam_z = 28.18$

$k_{zz} = 1.00$

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N_{,Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.01 < 1.00$ (6.2.9.3.(2))

$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)

$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.01 < 1.00$ (6.2.6-7)

$Tau_{,ty,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}*gM0)) = 0.01 < 1.00$ (6.2.6)

$Tau_{,tz,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}*gM0)) = 0.01 < 1.00$ (6.2.6)

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$Lambda_y = 14.12 < Lambda_{max} = 210.00$ $Lambda_z = 28.18 < Lambda_{max} = 210.00$ STABLE

$N_{,Ed}/(X_y*N_{c,Rk}/gM1) + k_{yy}*M_{y,Ed}/(XLT*M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz}*M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.02 < 1.00$ (6.3.3.(4))

$N_{,Ed}/(X_z*N_{c,Rk}/gM1) + k_{zy}*M_{y,Ed}/(XLT*M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz}*M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.02 < 1.00$ (6.3.3.(4))

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 40

POINT : 3

COORDONNEE : $x = 0.26 L = 0.14 \text{ m}$

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif : 10 ULS3 1*1.35+4*1.50

MATERIAU :

INOX $f_y = 240.00 \text{ MPa}$



PARAMETRES DE LA SECTION : L 110x110x5

h=11.0 cm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=11.0 cm	Ay=5.50 cm ²	Az=5.50 cm ²	Ax=10.75 cm ²
tw=0.5 cm	Iy=207.16 cm ⁴	Iz=52.04 cm ⁴	Ix=0.75 cm ⁴
tf=0.5 cm	Wely=26.63 cm ³	Welz=12.53 cm ³	

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

N,Ed = 52.19 daN	My,Ed = 6.50 daN*m	Mz,Ed = 6.74 daN*m	Vy,Ed = -66.10 daN
Nc,Rd = 25800.00 daN	My,eI,Rd = 639.21 daN*m	Mz,eI,Rd = 300.81 daN*m	Vy,T,Rd = 7603.64 daN
Nb,Rd = 25149.71 daN	My,c,Rd = 639.21 daN*m	Mz,c,Rd = 300.81 daN*m	Vz,Ed = 25.85 daN
			Vz,T,Rd = 7603.64 daN
			Tt,Ed = 0.09 daN*m
			Classe de la section = 3



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

Ly = 0.54 m	Lam_y = 0.14
Lcr,y = 0.54 m	Xy = 1.00
Lamy = 12.30	kyy = 1.00



en z :

Lz = 0.54 m	Lam_z = 0.27
Lcr,z = 0.54 m	Xz = 0.97
Lamz = 24.54	kzy = 1.00

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$$N,Ed/Nc,Rd + My,Ed/My,c,Rd + Mz,Ed/Mz,c,Rd = 0.03 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(1))$$

$$Vy,Ed/Vy,T,Rd = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$Vz,Ed/Vz,T,Rd = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$$

$$\tau_{xy},Ed/(f_y/(\sqrt{3})gM0) = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

$$\tau_{xz},Ed/(f_y/(\sqrt{3})gM0) = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6)$$

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$$\lambda_{y} = 12.30 < \lambda_{y,max} = 210.00 \quad \lambda_{z} = 24.54 < \lambda_{z,max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N,Ed/(X_y * N,Rk/gM1) + k_{yy} * My,Ed/(XLT * My,Rk/gM1) + k_{yz} * Mz,Ed/(Mz,Rk/gM1) = 0.03 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N,Ed/(X_z * N,Rk/gM1) + k_{zy} * My,Ed/(XLT * My,Rk/gM1) + k_{zz} * Mz,Ed/(Mz,Rk/gM1) = 0.03 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 41

POINT : 3

COORDONNEE : $x = 0.33 L = 0.20 \text{ m}$

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif: 13 ACC2 (1+7)*1.00

MATERIAU :

INOX $f_y = 240.00 \text{ MPa}$



PARAMETRES DE LA SECTION : L 110x110x5

$h = 11.0 \text{ cm}$	$gM0 = 1.00$	$gM1 = 1.00$	
$b = 11.0 \text{ cm}$	$A_y = 5.50 \text{ cm}^2$	$A_z = 5.50 \text{ cm}^2$	$A_x = 10.75 \text{ cm}^2$
$tw = 0.5 \text{ cm}$	$I_y = 207.16 \text{ cm}^4$	$I_z = 52.04 \text{ cm}^4$	$I_x = 0.75 \text{ cm}^4$
$tf = 0.5 \text{ cm}$	$W_{ely} = 26.63 \text{ cm}^3$	$W_{elz} = 12.53 \text{ cm}^3$	
	$W_{eff,y} = 26.63 \text{ cm}^3$	$W_{eff,z} = 12.53 \text{ cm}^3$	$A_{eff} = 10.75 \text{ cm}^2$

Attention : Profilé de classe 4 ! Le logiciel ne fait pas l'analyse complète de la classe 4 pour ce type de profilé, mais il les analyse comme les sections de classe 3.

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

$N, Ed = 1279.28 \text{ daN}$	$My, Ed = 249.32 \text{ daN} \cdot \text{m}$	$Mz, Ed = 109.74 \text{ daN} \cdot \text{m}$	$Vy, Ed = -548.71 \text{ daN}$
$Nc, Rd = 25800.00 \text{ daN}$	$My, el, Rd = 639.21 \text{ daN} \cdot \text{m}$	$Mz, el, Rd = 300.81 \text{ daN} \cdot \text{m}$	$Vy, c, Rd = 7621.02 \text{ daN}$
$Nb, Rd = 24867.41 \text{ daN}$	$My, c, Rd = 639.21 \text{ daN} \cdot \text{m}$	$Mz, c, Rd = 300.81 \text{ daN} \cdot \text{m}$	$Vz, Ed = 1246.58 \text{ daN}$
			$Vz, c, Rd = 7621.02 \text{ daN}$
			Classe de la section = 4



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

$L_y = 0.60 \text{ m}$	$\text{Lam}_y = 0.15$
$L_{cr,y} = 0.60 \text{ m}$	$X_y = 1.00$
$\text{Lam}_y = 13.67$	$k_{yy} = 1.00$



en z :

$L_z = 0.60 \text{ m}$	$\text{Lam}_z = 0.30$
$L_{cr,z} = 0.60 \text{ m}$	$X_z = 0.96$
$\text{Lam}_z = 27.27$	$k_{yz} = 1.00$

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$$N, Ed / Nc, Rd + My, Ed / My, c, Rd + Mz, Ed / Mz, c, Rd = 0.80 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(2))$$

$$Vy, Ed / Vy, c, Rd = 0.07 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

$$Vz, Ed / Vz, c, Rd = 0.16 < 1.00 \quad (6.2.6.(1))$$

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$$\text{Lambda}_y = 13.67 < \text{Lambda}_{max} = 210.00 \quad \text{Lambda}_z = 27.27 < \text{Lambda}_{max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$$

$$N, Ed / (X_y * N, Rk / gM1) + k_{yy} * My, Ed / (XLT * My, Rk / gM1) + k_{yz} * Mz, Ed / (Mz, Rk / gM1) = 0.71 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

$$N, Ed / (X_z * N, Rk / gM1) + k_{zy} * My, Ed / (XLT * My, Rk / gM1) + k_{zz} * Mz, Ed / (Mz, Rk / gM1) = 0.71 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 42

POINT : 3

COORDONNEE : $x = 0.23 L = 0.14 \text{ m}$

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif : 9 ULS2 1*1.35+3*1.50

MATERIAU :

INOX $f_y = 240.00 \text{ MPa}$



PARAMETRES DE LA SECTION : L 110x110x5

$h = 11.0 \text{ cm}$

$gM0 = 1.00$

$gM1 = 1.00$

$b = 11.0 \text{ cm}$

$A_y = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_z = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_x = 10.75 \text{ cm}^2$

$tw = 0.5 \text{ cm}$

$I_y = 207.16 \text{ cm}^4$

$I_z = 52.04 \text{ cm}^4$

$I_x = 0.75 \text{ cm}^4$

$tf = 0.5 \text{ cm}$

$W_{ely} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{elz} = 12.53 \text{ cm}^3$

$W_{eff,y} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{eff,z} = 12.53 \text{ cm}^3$

$A_{eff} = 10.75 \text{ cm}^2$

Attention : Profilé de classe 4 ! Le logiciel ne fait pas l'analyse complète de la classe 4 pour ce type de profilé, mais il les analyse comme les sections de classe 3.

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

$N_{,Ed} = 310.09 \text{ daN}$

$M_{y,Ed} = -8.16 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,Ed} = 0.51 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,Ed} = -5.46 \text{ daN}$

$N_{c,Rd} = 25800.00 \text{ daN}$

$M_{y,el,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,el,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,T,Rd} = 7602.16 \text{ daN}$

$N_{b,Rd} = 24772.25 \text{ daN}$

$M_{y,c,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,c,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{z,Ed} = -53.70 \text{ daN}$

$V_{z,T,Rd} = 7602.16 \text{ daN}$

$T_{t,Ed} = 0.10 \text{ daN}\cdot\text{m}$

Classe de la section = 4



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

$L_y = 0.62 \text{ m}$

$\lambda_{m,y} = 0.16$

$L_{cr,y} = 0.62 \text{ m}$

$X_y = 1.00$

$\lambda_{m,y} = 14.12$

$k_{zy} = 1.00$



en z :

$L_z = 0.62 \text{ m}$

$\lambda_{m,z} = 0.31$

$L_{cr,z} = 0.62 \text{ m}$

$X_z = 0.96$

$\lambda_{m,z} = 28.18$

$k_{zz} = 1.00$

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N_{,Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(2))$

$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$\tau_{ty,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6)$

$\tau_{tz,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6)$

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\lambda_{m,y} = 14.12 < \lambda_{m,max} = 210.00 \quad \lambda_{m,z} = 28.18 < \lambda_{m,max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$

$N_{,Ed}/(X_y \cdot N_{c,Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.02 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

$N_{,Ed}/(X_z \cdot N_{c,Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.02 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 43

POINT : 3

COORDONNEE : $x = 0.26 L = 0.14 \text{ m}$

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif : 10 ULS3 1*1.35+4*1.50

MATERIAU :

INOX $f_y = 240.00 \text{ MPa}$



PARAMETRES DE LA SECTION : L 110x110x5

$h = 11.0 \text{ cm}$

$gM0 = 1.00$

$gM1 = 1.00$

$b = 11.0 \text{ cm}$

$A_y = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_z = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_x = 10.75 \text{ cm}^2$

$tw = 0.5 \text{ cm}$

$I_y = 207.16 \text{ cm}^4$

$I_z = 52.04 \text{ cm}^4$

$I_x = 0.75 \text{ cm}^4$

$tf = 0.5 \text{ cm}$

$W_{ely} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{elz} = 12.53 \text{ cm}^3$

$W_{eff,y} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{eff,z} = 12.53 \text{ cm}^3$

$A_{eff} = 10.75 \text{ cm}^2$

Attention : Profilé de classe 4 ! Le logiciel ne fait pas l'analyse complète de la classe 4 pour ce type de profilé, mais il les analyse comme les sections de classe 3.

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

$N_{,Ed} = 452.75 \text{ daN}$

$M_{y,Ed} = 14.83 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,Ed} = -3.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,Ed} = 33.06 \text{ daN}$

$N_{c,Rd} = 25800.00 \text{ daN}$

$M_{y,el,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,el,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,T,Rd} = 7601.25 \text{ daN}$

$N_{b,Rd} = 25149.71 \text{ daN}$

$M_{y,c,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,c,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{z,Ed} = 91.37 \text{ daN}$

$V_{z,T,Rd} = 7601.25 \text{ daN}$

$T_{t,Ed} = -0.11 \text{ daN}\cdot\text{m}$

Classe de la section = 4



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

$L_y = 0.54 \text{ m}$

$\lambda_{m,y} = 0.14$

$L_{cr,y} = 0.54 \text{ m}$

$X_y = 1.00$

$\lambda_{m,y} = 12.30$

$k_{zy} = 1.00$



en z :

$L_z = 0.54 \text{ m}$

$\lambda_{m,z} = 0.27$

$L_{cr,z} = 0.54 \text{ m}$

$X_z = 0.97$

$\lambda_{m,z} = 24.54$

$k_{zz} = 1.00$

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N_{,Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.05 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(2))$

$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$\tau_{ty,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6)$

$\tau_{tz,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6)$

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\lambda_{m,y} = 12.30 < \lambda_{m,max} = 210.00 \quad \lambda_{m,z} = 24.54 < \lambda_{m,max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$

$N_{,Ed}/(X_y \cdot N_{c,Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.05 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

$N_{,Ed}/(X_z \cdot N_{c,Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.05 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME : EN 1993-1:2005/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures.

TYPE D'ANALYSE : Vérification des pièces

FAMILLE :

PIECE : 45

POINT : 3

COORDONNEE : $x = 0.23 L = 0.14 \text{ m}$

CHARGEMENTS :

Cas de charge décisif : 8 ULS1 1*1.35+2*1.50

MATERIAU :

INOX $f_y = 240.00 \text{ MPa}$



PARAMETRES DE LA SECTION : L 110x110x5

$h = 11.0 \text{ cm}$

$gM0 = 1.00$

$gM1 = 1.00$

$b = 11.0 \text{ cm}$

$A_y = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_z = 5.50 \text{ cm}^2$

$A_x = 10.75 \text{ cm}^2$

$tw = 0.5 \text{ cm}$

$I_y = 207.16 \text{ cm}^4$

$I_z = 52.04 \text{ cm}^4$

$I_x = 0.75 \text{ cm}^4$

$tf = 0.5 \text{ cm}$

$W_{ely} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{elz} = 12.53 \text{ cm}^3$

$W_{eff,y} = 26.63 \text{ cm}^3$

$W_{eff,z} = 12.53 \text{ cm}^3$

$A_{eff} = 10.75 \text{ cm}^2$

Attention : Profilé de classe 4 ! Le logiciel ne fait pas l'analyse complète de la classe 4 pour ce type de profilé, mais il les analyse comme les sections de classe 3.

EFFORTS INTERNES ET RESISTANCES ULTIMES :

$N_{,Ed} = 186.84 \text{ daN}$

$M_{y,Ed} = 5.57 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,Ed} = 2.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,Ed} = -29.04 \text{ daN}$

$N_{c,Rd} = 25800.00 \text{ daN}$

$M_{y,el,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,el,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{y,T,Rd} = 7602.48 \text{ daN}$

$N_{b,Rd} = 24772.25 \text{ daN}$

$M_{y,c,Rd} = 639.21 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$M_{z,c,Rd} = 300.81 \text{ daN}\cdot\text{m}$

$V_{z,Ed} = 40.51 \text{ daN}$

$V_{z,T,Rd} = 7602.48 \text{ daN}$

$T_{t,Ed} = -0.10 \text{ daN}\cdot\text{m}$

Classe de la section = 4



PARAMETRES DE DEVERSEMENT :

PARAMETRES DE FLAMBEMENT :



en y :

$L_y = 0.62 \text{ m}$

$\lambda_{m,y} = 0.16$

$L_{cr,y} = 0.62 \text{ m}$

$X_y = 1.00$

$\lambda_{my} = 14.12$

$k_{zy} = 1.00$



en z :

$L_z = 0.62 \text{ m}$

$\lambda_{m,z} = 0.31$

$L_{cr,z} = 0.62 \text{ m}$

$X_z = 0.96$

$\lambda_{mz} = 28.18$

$k_{zz} = 1.00$

FORMULES DE VERIFICATION :

Contrôle de la résistance de la section :

$N_{,Ed}/N_{c,Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,c,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,c,Rd} = 0.03 < 1.00 \quad (6.2.9.3.(2))$

$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.01 < 1.00 \quad (6.2.6-7)$

$\tau_{ty,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6)$

$\tau_{tz,Ed}/(f_y/(\sqrt{3}\cdot gM0)) = 0.00 < 1.00 \quad (6.2.6)$

Contrôle de la stabilité globale de la barre :

$\lambda_{m,y} = 14.12 < \lambda_{m,max} = 210.00 \quad \lambda_{m,z} = 28.18 < \lambda_{m,max} = 210.00 \quad \text{STABLE}$

$N_{,Ed}/(X_y \cdot N_{c,Rk}/gM1) + k_{yy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{yz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.02 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

$N_{,Ed}/(X_z \cdot N_{c,Rk}/gM1) + k_{zy} \cdot M_{y,Ed}/(XLT \cdot M_{y,Rk}/gM1) + k_{zz} \cdot M_{z,Ed}/(M_{z,Rk}/gM1) = 0.02 < 1.00 \quad (6.3.3.(4))$

Profil correct !!!

7 VERIFICATION DES CONTRAINTES

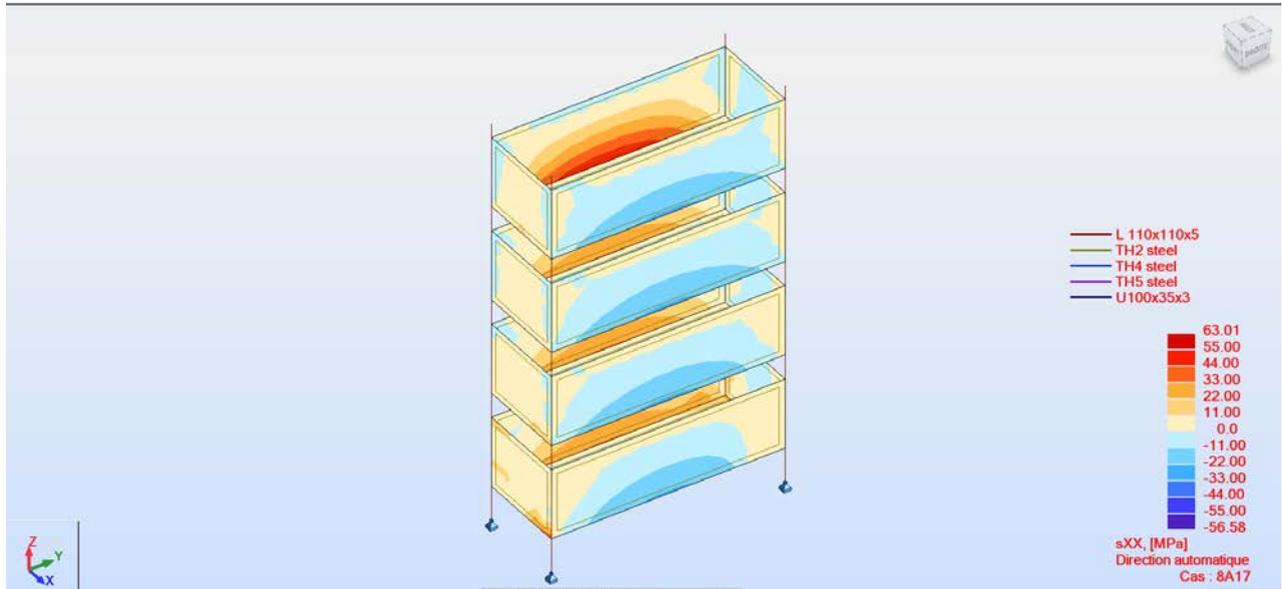


Figure 12 – Contraintes σ_x

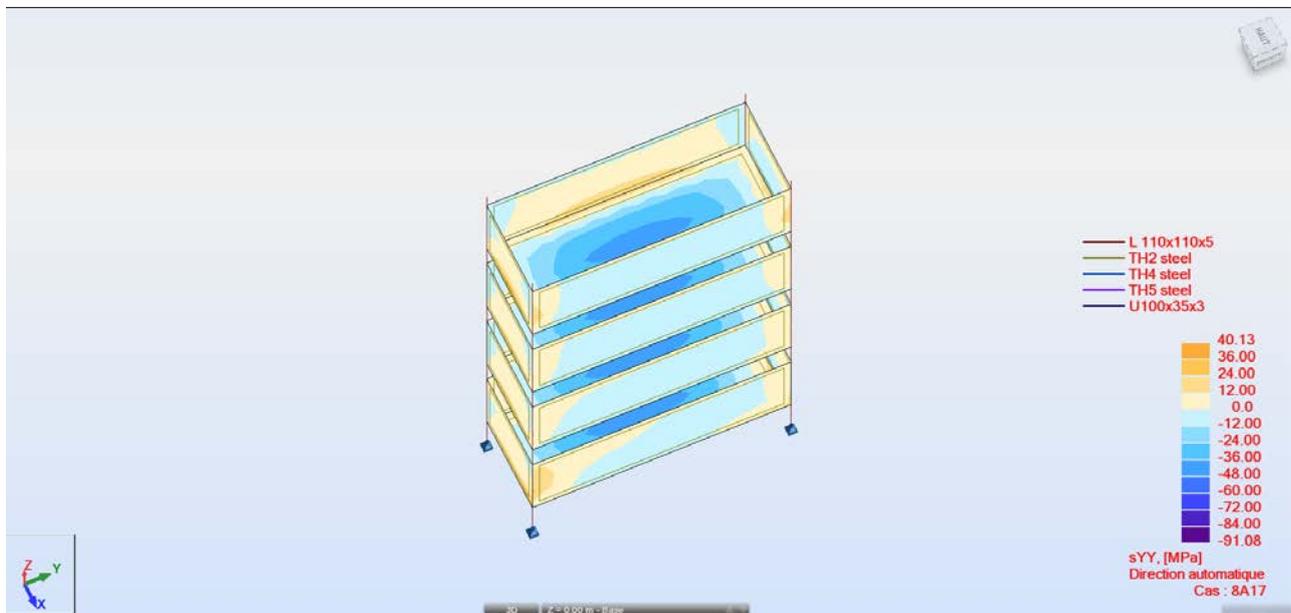


Figure 13 – Contraintes σ_y

Contrainte maximale $\sigma = 91\text{Mpa} < 240\text{ Mpa} \rightarrow$ **vérifiée**

8 VERIFICATION CONNEXION ENTRE CAISETTES

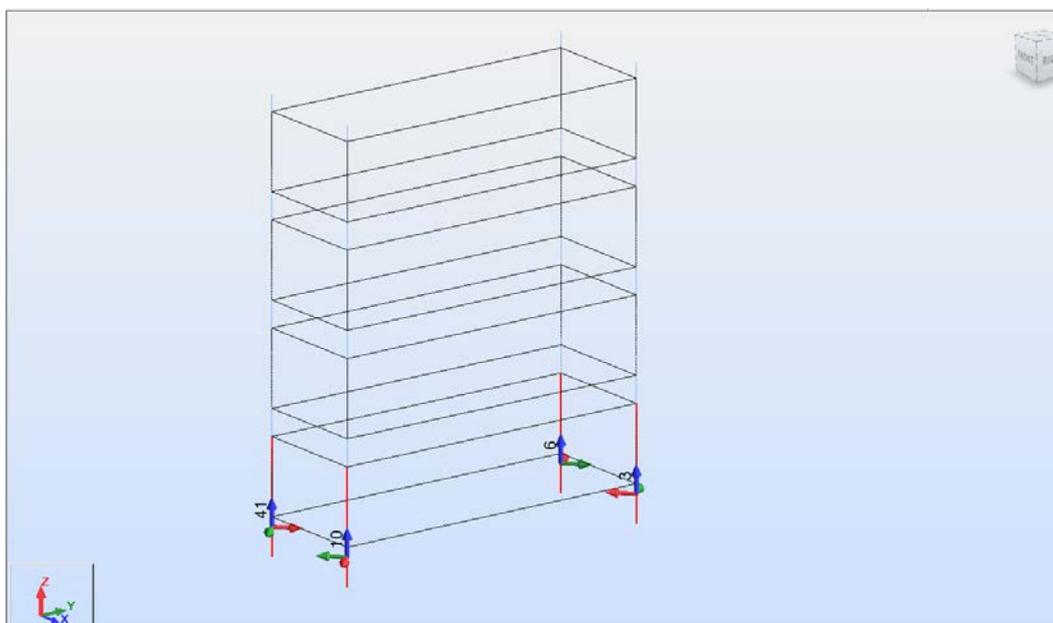


Figure 14 – Barres sélectionnées pour la vérification des connexions entre caissettes

- Verification de la plaque 70x5 :

L'élément connecteur des caissettes est une plaque de section 70x5mm (b=70mm ; t=5mm) ; les barres les plus sollicitées sont celles représentées dans la figures ci-dessus et elles serviront à la validation de l'élément connecteur.

La résistance ultime de l'INOX est $f_u=530\text{Mpa}$

Cette plaque reprend l'effort tranchant (F_y et F_z) et l'effort de traction ($F_x < 0$) puisque les pieds des caissettes sont supposés être articulés; l'effort de compression est repris par contact des caissettes.

L'effort tranchant résistant $V_{Rd}=0.9 \cdot f_y \cdot b \cdot t / \sqrt{3} = 4849.7 \text{ daN}$

L'effort de traction résistant en section nette : $N_{Rd}=0.9 \cdot f_y \cdot b_{net} \cdot t = 6588 \text{ daN} > 2193\text{daN}$

		Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
		[daN]	[daN]	[daN]	[daN.m]	[daN.m]	[daN.m]
Element 3	Max	732.27	543.12	45.96	0.00	0.00	0.00
	Min	-2192.01	-445.43	-1200.73	0.00	0.00	0.00

		Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
		[daN]	[daN]	[daN]	[daN.m]	[daN.m]	[daN.m]
Element 6	Max	2931.97	543.12	1200.73	0.00	0.00	0.00
	Min	-534.77	-6.68	-1206.60	0.00	0.00	0.00

		Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
		[daN]	[daN]	[daN]	[daN.m]	[daN.m]	[daN.m]
Element 7	Max	1274.73	10.85	1164.91	0.00	0.00	0.00
	Min	-2192.01	-552.79	-1242.43	0.00	0.00	-0.00

		Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
		[daN]	[daN]	[daN]	[daN.m]	[daN.m]	[daN.m]
Element 8	Max	2931.97	435.75	1242.43	0.00	0.00	0.00
	Min	145.31	-552.79	-19.74	0.00	0.00	-0.00

L'effort tranchant maximal est $V = 1242 \text{ daN} < V_{pl,Rd} = 4849.7 \text{ daN}$

→ Les dimensions de cette plaque sont suffisantes

- **Verification du cordon de soudure :**

Un cordon de soudure d'épaisseur $a_{min} = 4\text{mm}$ et $f_y = 240 \text{ Mpa}$ est supposé être performé sur tout le pourtour de la plaque (sa longueur $l = 210\text{mm}$) ; d'après la table C5 (donnée par le SZS) ce cordon pourrait supportait un effort $F_{Rd} = 175\text{kN} = 17500\text{daN}$ → vérifié

- **Verification des 2 boulons M8 :**

Les efforts sollicitantes sont :

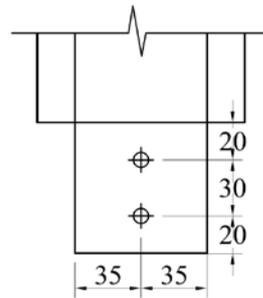
Effort de tranchant

$F_x = 2193$ daN (Effort tranchant du a la présence de traction entre caissettes)

$F_y = 552$ daN (Effort tranchant)

$F_z = 1242$ daN (traction des boulons)

Input Values		
Bolts		
d =	8	mm
d0=	9	mm
As=	50.3	mm ²
Grade=	70	[-]
fub=	700	MPa
Slotted hole	No	
Number of bolts "n"=	2	
Number of shear plane "m"=	1	
γ_{M2} =	1.25	
e1=	20	mm
p1=	30	mm
e2=	35	mm
p2=	35	mm
Plate:		
f _u =	240	MPa
t=	5	mm



Shear verification of bolts Q10.9			
$F_{v,Rd} = m \times 0.5 \times f_{ub} \times A_s / \gamma_{M2} =$	1408.4 daN		
$F_{v,Ed} = (F_x^2 + F_z^2)^{0.5} / n =$	1131 daN	< $F_{v,Rd}$	OK
Bearing resistance verification			
In the direction of the effort:			
- For outermost bolts	$\alpha_d = e_1 / (3d_0) =$	0.74	
- For intermediate bolts	$\alpha_d = p_1 / (3d_0 - 1/4) =$	0.86	
In the perpendicular direction of the effort :			
For outermost bolts:	$k_1 = \min((2.8e_2/d_0 - 1.7) ; 2.5) =$	2.50	
For intermediate bolts:	$k_1 = \min((1.4p_2/d_0 - 1.7) ; 2.5) =$	2.50	
$F_{b,Rd} = k_1 \alpha_b f_u d t / \gamma_{M2} =$	1422 daN		
$F_{v,Ed} = (F_x^2 + F_z^2)^{0.5} / n =$	1131 daN	< $F_{b,Rd}$	OK
Tension verification of bolts Q10.9			
$F_{t,Rd} = 0.9 \times f_{ub} \times A_s / \gamma_{M2} =$	2535.12 daN		
$F_{t,Ed} = F_{y,tension} / n =$	621 daN	< $F_{t,Rd}$	OK
Combined shear & tension verification:			
$R = \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 F_{t,Rd}} =$			
	0.98	< 1	OK
MAXIMUM RATIO = max ($F_{v,Ed} / \min(F_{v,Rd}, F_{b,Rd}) ; F_{t,Ed} / F_{t,Rd} ; R) =$			0.98

9 VERIFICATION DE LA FLECHE

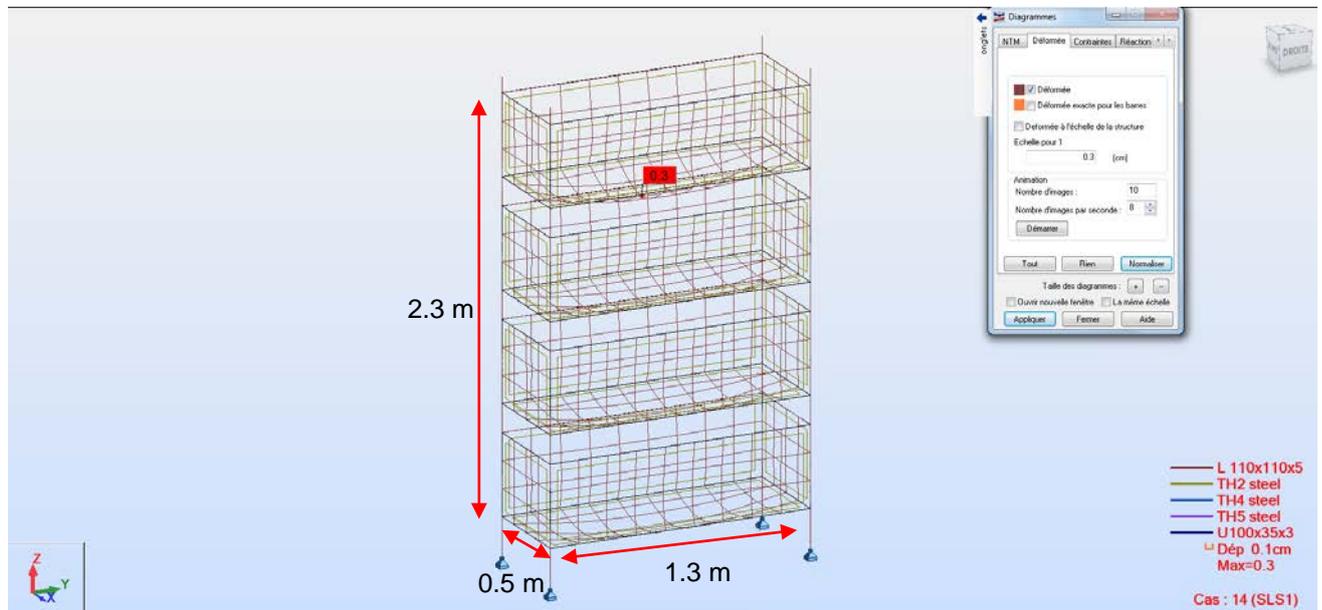


Figure 15 – Déformation de la structure

Fleche maximale : $f=3\text{mm}$

$L/150 = 1300/200 = 6.5\text{mm} > 3\text{mm} \rightarrow$ **vérifiée**

10 REACTION D'APPUIS

Le tableau ci-dessous reporte les charges maximales des réactions d'appuis sous toutes les combinaisons de charges

Note: les Efforts sont donnés dans le repère global de la structure (voir figure ci-dessous).

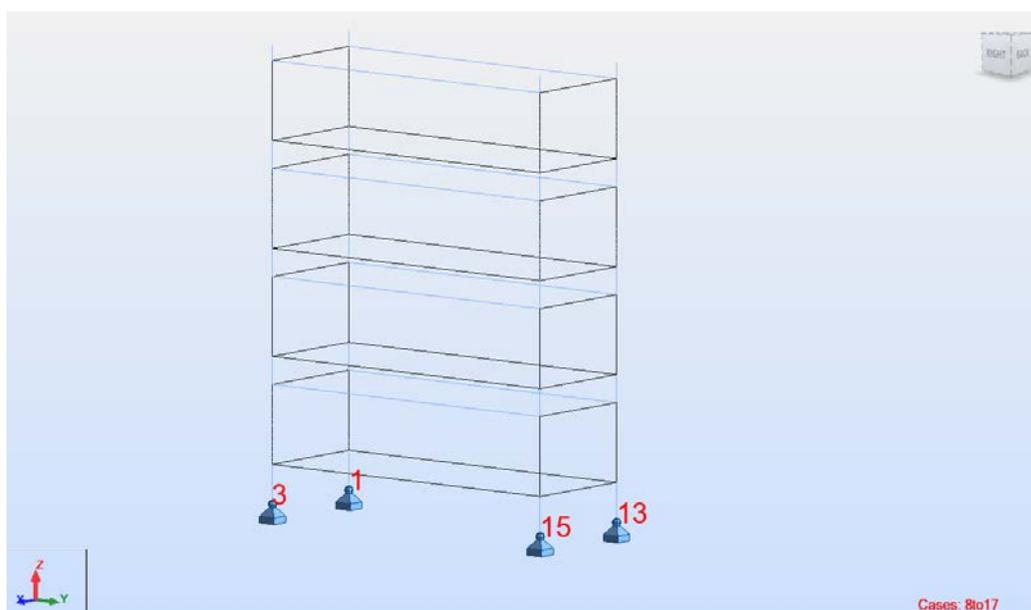


Figure 16 – Représentation des réactions

Node		FX (daN)	FY (daN)	FZ (daN)
1	Max	1161.32	1269.41	2931.97
1	min	12.14	17.30	294.78
3	Max	1138.68	1269.41	1274.73
3	min	-487.64	-508.75	-2192.01
13	Max	1161.32	1233.09	2931.97
13	min	-465.00	-545.08	-534.77
15	Max	1138.68	1233.09	525.18
15	min	-12.16	-20.96	-2192.01

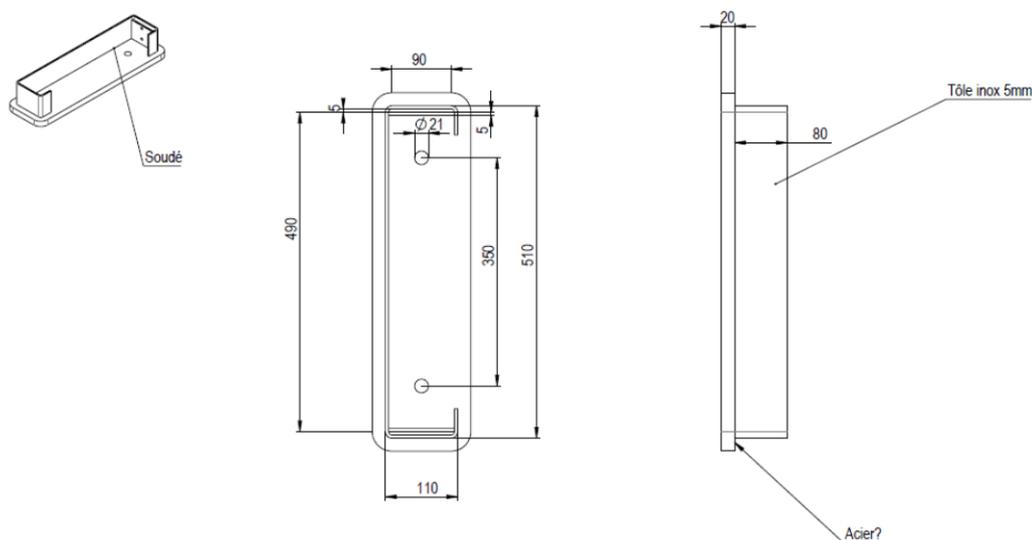
11 VERIFICATION DE LA CONNEXION AU SOL

La somme des composantes des poteaux 1 et 3 sera retenue pour le dimensionnement de la connexion au sol puisqu'ils sont les plus sollicités

$$F_x = 1161 + 1139 = 2305 \text{ daN}$$

$$F_y = 1270 + 1270 = 2540 \text{ daN}$$

$$\text{Effort de traction } F_z = 2192 \text{ daN}$$



Vérification de la contrainte au sol:

$$\text{Efforts de compression sur le sol: } N = 2932 + 1274 = 4206 \text{ daN}$$

On considère une dalle de résistante 15 Mpa

$$\text{Contrainte au sol } \sigma = 4206 / (130 \cdot 110) \cdot 10 = 2.9 < 15 \text{ Mpa} \rightarrow \text{vérifiée}$$

Cordon de soudure :

Un cordon de soudure d'épaisseur $a_{\min} = 4 \text{ mm}$ et $f_y = 240 \text{ Mpa}$ est supposé être performé sur tout le pourtour du socle pour permettre une transmission uniforme des efforts des caissettes vers la plaque de base.

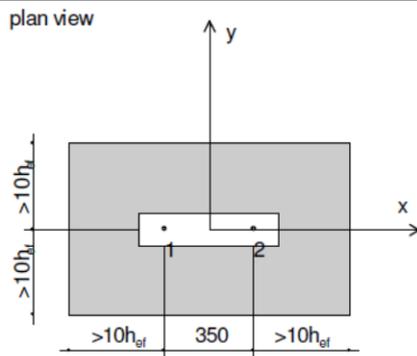
HILTY HST-R-M20 est nécessaire pour assurer la connexion au sol:

 User application PROFIS Anchor 1.11.20 http://www.hilti.com/	Company:	Page 1 of 1
	Specifier:	Project:
	Address:	Contract No.:
	Phone/Fax: - / -	Responsible:
	E-Mail:	Location/Date: - / 12.05.2015

Specifier's comments:

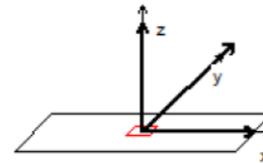
Anchor type and size: HST-R-M20
Effective embedment depth: $h_{ef} = 101$ mm
Material: A4
Approval No.:
Issued/Valid: - / -
Proof: Engineering judgement SOFA - after ETAG testing
Stand-off installation: $e_c = 0$ mm (no stand-off); $t = 20$ mm
Anchor plate: S235 (ST37); $l_x \times l_y \times t = 550 \times 130 \times 20$ mm
Base material: cracked concrete C12/15, $f_{cc} = 15.00$ N/mm²; $h = 150$ mm
Reinforcement: reinforcement spacing ≥ 150 mm
 no longitudinal edge reinforcement

Geometry [mm]



Loading [N]

Resulting loads [N, Nm]
 $N = 21920$
 $M_x = 0.00$
 $V_y = 25400$
 $M_y = 0.00$



Eccentricity (structural section) [mm]
 $e_x = 0$
 $e_y = 0$
 $V_x = 21920$
 $M_x = 0.00$

Proof / Utilisation (Governing Cases)

Loading	Proof	Design values [N]		Utilisation [%]	Status
		Load	Capacity	β_N/β_V	
Tension	Splitting failure	21920	30947	71 / -	OK
Shear	Pryout failure	16775	37740	- / 44	OK

Loading	β_N	β_V	α	Utilisation $\beta_{N,V}$ [%]	Status
Combined tension and shear loads	0.708	0.445	1.5	89	OK

Warnings

An even load distribution of the shear load is assumed, e.g. by using the Hilti Dynamic Set.
 The compliance with current standards (e.g. EC3) is the responsibility of the user
 Dry hole and standard cleaning are assumed! Temperature influence is neglected!

Fastening meets the design criteria!

3.8 Démonstrateurs



Figure 1 Exposition du prototype au salon Aquapro à Bulle, le salon des professionnels de l'eau en 2014.



Figure 2 Démonstrateur en inox sur le site du parking de la Heia-Fr.

Annexe 4

WP 5 :

Développement et test in situ de la performance du nouveau système végétalisé de traitement des eaux de chaussées (SMACC).

Fabienne Favre Boivin, professeure HEIA-FR

Ana Slijepcevic, collaboratrice scientifique HEIA-FR

Bruno Spahni, collaborateur scientifique HEIA-FR

Jean-Marc Ribl, professeur HEIA-FR



Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg
Hochschule für Technik und Architektur Freiburg

INSTITUT ITEC

**WP5 : DÉVELOPPEMENT ET TEST IN SITU DE LA
PERFORMANCE DU NOUVEAU SYSTÈME VÉGÉTALISÉ DE
TRAITEMENT DES EAUX DE CHAUSSÉES (SMACC).**

N° SAGE-X : 12906 30700

Partenariat : Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg
Ville de Fribourg
Etat de Fribourg
Service de l'environnement du canton de Fribourg

Bruno Spahni, collaborateur scientifique HEIA-FR

Ana Slijepcevic, collaboratrice scientifique HEIA-FR

Fabienne Favre Boivin, professeure HEIA-FR

Jean-Marc Ribi, professeur HEIA-FR

RAPPORT FINAL



Hes·so // **FRIBOURG
FREIBURG**
Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale
Fachhochschule Westschweiz



Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg HEIA-FR

Institut des Technologies de l'Environnement Construit iTEC

Bd de Pérolles 80

CP 32

CH-1705 Fribourg

Table des matières

TABLE DES MATIÈRES	3
1 RÉSUMÉ	4
2 NOTATIONS	5
3 INTRODUCTION	6
3.1 PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE	6
3.1.1 <i>Technosols et déchets verts</i>	6
3.1.2 <i>Les eaux urbaines</i>	6
3.2 OBJECTIFS DU WP5	7
4 DESCRIPTION DU SYSTÈME	8
4.1 SITE EXPÉRIMENTAL.....	8
4.2 SYSTÈME EXPÉRIMENTAL (BANC D’ESSAI)	9
4.2.1 <i>Les cassettes</i>	10
4.2.2 <i>Le substrat</i>	10
4.2.3 <i>La végétation</i>	11
5 DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME	13
6 MÉTHODOLOGIE ET INSTRUMENTS DE MESURE	15
6.1 PLUVIOMÉTRIE	15
6.2 HAUTEURS D’EAU ET DÉBITS	15
6.3 TURBIDIMÉTRIE ET POLLUANTS.....	17
6.4 COUPLAGE TURBIDITÉS ET DÉBITS.....	18
6.5 CAPACITÉ DE RÉTENTION	18
7 CALCUL DES PERFORMANCES DE TRAITEMENT	20
7.1 CALCUL DE LA PERFORMANCE HYDRAULIQUE.....	20
7.2 CALCUL DE LA PERFORMANCE DE DÉPOLLUTION.....	20
8 RÉSULTATS	21
8.1 PLUVIOMÉTRIE	21
8.2 RUISSELLEMENTS ANALYSÉS.....	23
8.3 EFFICACITÉ HYDRAULIQUE.....	23
8.4 EFFICACITÉ DE DÉPOLLUTION.....	24
8.5 FONCTIONNEMENT AU COURS DU TEMPS	26
8.6 LA VÉGÉTATION	27
9 DISCUSSIONS DES RÉSULTATS ET REMARQUES	28
9.1 CRITÈRE D’APPRÉCIATION DE LA PERFORMANCE DU SYSTÈME.....	28
9.2 APPRÉCIATION DU SUBSTRAT	29
9.3 UTILISATION DU GÉOTEXTILE.....	29
10 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	31
11 RÉFÉRENCES	32
12 ANNEXE A : COURBES DE RÉGRESSION LINÉAIRE	33
12.1 LOI TURBIDITÉ TU VS MATIÈRES EN SUSPENSION MES	33
12.1 LOIS TURBIDITÉ TU VS CUIVRE CU.....	33
13 ANNEXE B : EXEMPLES DE MESURE D’UNE PLUIE	34

1 Résumé

La densification des zones urbaines pousse à optimiser les éco-fonctions de l'espace disponible. Un nouveau système de traitement des eaux de chaussée sous forme de mur végétalisé modulable, appelé SMACC, formé de 10 cassettes installées en série, a été développé dans cet esprit. En plus d'épurer les eaux de ruissellement de chaussée, il contribue à l'amélioration du climat urbain, à l'ornementation de la ville et à la rétention des eaux. Son substrat épurateur est réalisé avec des déchets verts pyrolysés (biochars).

L'objectif de cette étude est de réaliser un suivi des performances du système *in situ* et en grandeur réelle sur une année sur 300m² d'une chaussée au trafic important (16'000 véhicules par jour en moyenne). Les capacités épuratives (f_{abat}) et hydrauliques (η_{hyd}), la résistance de la végétation et l'évolution des performances au cours du temps sont mesurées. η_{hyd} est quantifiée par des mesures de débits et de stockage d'eau alors que f_{abat} l'est par turbidimétrie et prélèvements ponctuels. Les polluants analysés sont les matières en suspension (MES), le cuivre total (Cu). L'évolution des performances au cours du temps est analysée, en particulier par les mesures de perméabilité du substrat.

Au total, 112 événements pluvieux ont été enregistrés. L'efficacité hydraulique et de dépollution du système a été évaluée à partir de l'analyse de 101 de ces événements. Le lot d'échantillons couvre une gamme complète d'intensité et de durée de pluie, sur quatre saisons.

Il apparait que les résultats tant hydrauliques qu'épuratifs sont proches des valeurs limites légales et que les performances du système de traitement sont conservées au cours du temps, bien que la perméabilité à saturation du substrat diminue dans les modules en tête de série. L'abattement des matières en suspension est de 57% et celle du cuivre de 48% alors que la capacité hydraulique du système est de plus de 99.9%.

2 Notations

BV		Bassin versant
Cu		Cuivre
C _{Poll}	[ML ⁻³]	Charge polluive
DOC	[ML ⁻³]	Carbone organique dissous
d _{pl}	[T]	Durée d'un événement pluvieux
η _{hyd}	[-]	Capacité hydraulique du système
f _{abat}	[-]	Coefficient d'abattement de la pollution
F _{poll}	[MT ⁻¹]	Flux de pollution
h	[L]	Hauteur d'eau
HAP	[ML ⁻³]	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
I	[L ³ T ⁻¹]	Intensité d'un événement pluvieux
in		Valeur entrante
MES	[ML ⁻³]	Matière en suspension
OFEV		Office fédéral de l'environnement
OFROU		Office fédéral des routes
Oeaux		Ordonnance sur la protection des eaux
out		Valeur sortante
PAS	[T]	Période antécédente sèche
Q	[L ³ T ⁻¹]	Débit
SEn		Service de l'environnement - Etat de Fribourg
SMACC		Smart Clean City
TU	[FNU]	Turbidité
V _{PL}	[L ³ L ⁻²]	Volume d'eau du pluviographe par unité de surface
VSA		Association suisse des professionnels de la protection des eaux
WP5		Work Package n°5

3 Introduction

3.1 Problématique générale

La ville peut être vue comme un organisme vivant qui consomme des ressources et rejette des déchets. L'énergie, l'eau et le sol font partie des ressources peu ou non renouvelables qui alimentent cet organisme. Les eaux de ruissellement, avec leur cortège de polluants, les débris végétaux provenant de l'entretien des pelouses, des haies, des bordures de route ou d'origine domestique font partie des déchets produits. Le projet SMACC tend à valoriser les déchets verts pour permettre de traiter les eaux de ruissellement de chaussée.

3.1.1 Technosols et déchets verts

Les technosols (largement utilisés en ville) sont généralement constitués d'un mélange terre-pierres permettant une bonne capacité de portance. Ils n'ont aucune capacité épurative particulière, étant donné leur composition et l'élargissement de leur utilisation aux fonctions épuratrices n'a jamais été réalisé.

Le projet SMACC tend à réaliser un technosol aux propriétés épuratrices démultipliées ayant comme qualité, une grande perméabilité, une grande stabilité dans le temps et une forte propriété d'adsorption. Son squelette minéral doit assurer la portance et la perméabilité, tandis que la phase microporeuse chargée de la réactivité est constituée de biochars.

Les biochars sont des charbons granulaires réalisés à partir de déchets organiques ayant subi une combustion dans une atmosphère pauvre ou sans oxygène. La pyrolyse est un processus autonome en énergie ayant un bon bilan CO₂.

Les propriétés des biochars (grande capacité de sorption, bilan écologique favorable, revalorisation des déchets urbains, puits de gaz à effet de serre) font d'eux le candidat idéal pour le traitement des eaux de chaussée. Ils offrent ainsi aux villes un moyen de traitement de la pollution par le recyclage de ses déchets.

3.1.2 Les eaux urbaines

L'imperméabilisation des sols dans les agglomérations urbaines pose de nombreux problèmes aux gestionnaires communaux. Les eaux de ruissellement de chaussées, longtemps considérées comme propres et sans impact sur les milieux récepteurs, contiennent en réalité de nombreux polluants organiques et inorganiques issus du trafic routier et des émissions urbaines. Ces substances polluantes sont entre autre des métaux lourds, des hydrocarbures aromatiques polycycliques et du carbone organique. Elles proviennent principalement de l'usure des composants des véhicules (freins, pneumatiques, pots catalytiques...), des revêtements bitumineux, de la maintenance de la chaussée, ainsi que de résidus de combustion des moteurs. Ces substances s'accumulent sur la chaussée et sont mobilisées en cas de ruissellement. Le rejet de ces polluants nocifs a un impact plus ou moins grand sur le milieu récepteur suivant leur concentration. La relation entre les flux polluants et les paramètres climatiques est difficile à établir, mais on constate un lien étroit entre la charge polluante et le trafic (Branchu *et al* 2013).

La politique suisse en matière de protection des eaux vise la mise en place d'un réseau séparatif destiné à séparer les eaux usées des eaux de pluie. Cependant, en raison de la pollution des eaux de ruissellement

des axes de trafic importants, ces eaux doivent subir un traitement avant d'être rejetées. La norme recommande l'infiltration comme première solution qui requière beaucoup d'espace. La densification importante des zones urbaines rend l'implantation de tels systèmes de traitement difficile. Ce projet a pour but d'offrir une solution à cette difficulté. Dans un souci d'optimisation les éco-fonctions de l'espace disponible, le nouveau système de traitement des eaux de chaussée testé est compact et modulable. Il permet d'une part d'épurer les eaux de ruissellement de chaussée, de contribuer à l'amélioration du climat urbain, à l'ornementation de la ville et à la rétention des eaux.

3.2 Objectifs du WP5

Les objectifs du WP5 sont les suivants :

1. Installer *in situ* un système fonctionnel.
2. Evaluer l'efficacité et la durabilité du système de filtration selon le bilan chimique global (entrées, stocks, sorties) et le fonctionnement hydraulique au cours des événements pluvieux.
3. Tester le comportement du substrat.
4. Monitorer le comportement de la végétation et sélectionner les plantes les plus adéquates.
5. Suivre la durabilité du système et de son efficacité.

4 Description du système

4.1 Site expérimental

Le site expérimental se situe sur la route de Marly, dans la commune de Fribourg en amont du pont de Pérolles traversant la Sarine. Cette route est l'un des principaux accès de la ville de Fribourg par le Sud. Le trafic journalier moyen (TJM) est d'environ 16'800 véhicules par jour dont 8'570 en direction de Fribourg et 8'230 en direction de Marly avec un taux de poids lourds de 7.2% (Figure 4-1). La route possède une pente de 0.1% et se situant à la sortie d'un virage, le profil de la chaussée a un dévers vers l'intérieur du virage de 2%. La largeur de la chaussée est de 13.40 m et la distance entre deux caniveaux est de 21 m, la chambre draine ainsi un bassin versant théorique de 281 m² (Figure 4-2).



Figure 4-1 : Définition du bassin versant théorique (image Etat de Fribourg).



Figure 4-2 : Bassin versant théorique (noir) et caniveau de collecte (rouge).

La route est bordée d'arbres, induisant une certaine quantité de matière organique sous forme de pollens au printemps et de feuilles mortes en hiver. Un nettoyage mécanique de la chaussée est effectué 16 fois par année à l'aide d'une balayeuse sur camion avec brosse et adduction d'eau.

Les eaux de ruissellement sont collectées dans une chambre dépotoir de 85 cm de profond via un caniveau à grille en bordure de chaussée (46°47'24.1"N 7°09'28.2"E). Elles s'écoulent ensuite sur un plateau demi-circulaire fixé dans la chambre pour finir dans un tuyau ouvert sur le dessus et être acheminées gravitairement dans le système. A ces fins, un trou a été percé au travers du mur de soutènement de la route entre la chambre et le système SMACC pour y insérer le tuyau acheminant l'eau (Figure 4-3).

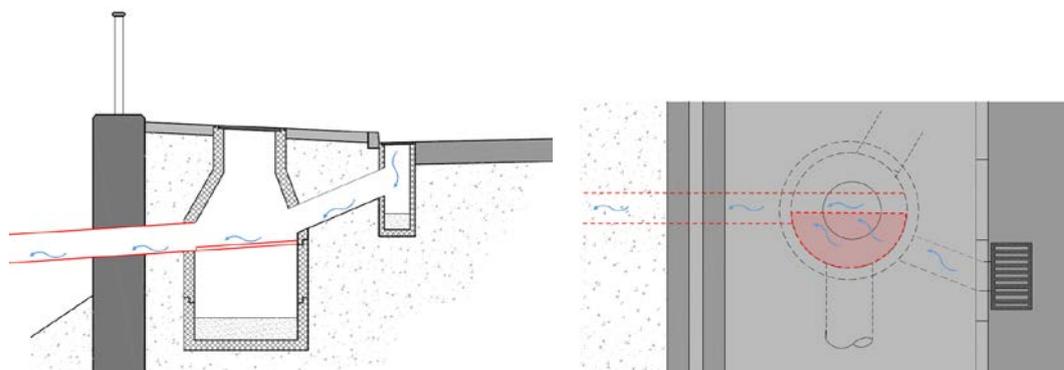


Figure 4-3 : Vue en coupe de la chambre de collecte et du tuyau de distribution (gauche). Plan du caniveau et du tuyau de distribution (droite)

Selon les critères d'évaluation de l'OFEV (OFEV, 2002), les eaux de ruissellement sur le tronçon étudié obtiennent un score de 18 points, alors qu'à partir de 14 points, la pollution des eaux est déjà considérée comme élevée.

Ce site expérimental représente les conditions type des milieux urbains en Suisse de par ses caractéristiques (trafic important, petites surfaces collectées, faible espace à disposition...)

4.2 Système expérimental (banc d'essai)

Le système est composé de dix cassettes végétalisées, remplies d'un substrat filtrant et épurateur, disposées en cascade (Figure 4-4).

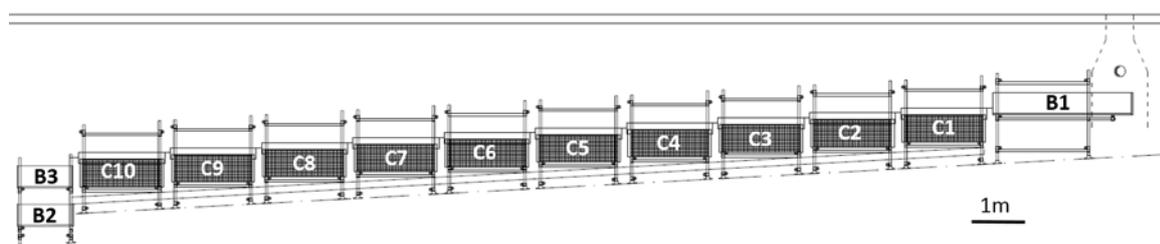


Figure 4-4 : Schéma de l'installation, cassettes en cascade.

L'eau en provenance du caniveau traverse un bassin de sédimentation en bois *B1* (Figure 4-5) muni d'un déversoir triangulaire où sont installés les différents instruments de mesure. Ce bassin est composé d'une paroi plongeante destinée à retenir les flottants et à calmer le plan d'eau, suivi d'un plateau de sédimentation d'un mètre de long. Ce plateau situé au même niveau que le déversoir permet d'éliminer les particules minérales de granulométrie supérieure à 200 μm (Degrémont, 2005).

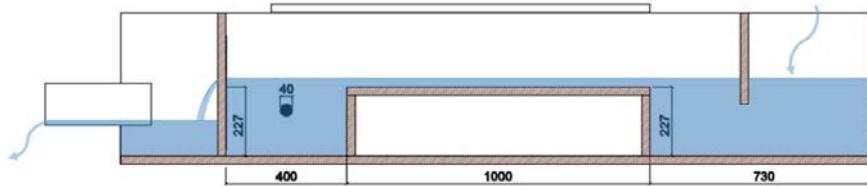


Figure 4-5 : Représentation schématique du bassin de sédimentation (B1) (Slijepcevic 2014).

L'eau est ensuite déversée à la surface de la première cassette (C1). Si le débit entrant est supérieur à la capacité d'infiltration de celle-ci, l'eau monte en charge puis déborde dans la seconde (C2), et ainsi de suite avec un débit croissant. Si le débit est supérieur à la capacité totale d'infiltration des cassettes, l'eau est déversée sans être traitée dans un bac de mesure en aval (B3). L'eau infiltrée à travers les cassettes s'écoule quant à elle dans un demi-tuyau longeant toute la partie inférieure de l'installation se déversant dans un bac de mesure (B2) (Figure 4-4). Les trois bacs où sont réalisées les mesures sont munis d'une paroi plongeante permettant de retenir les éventuels flottants et diminuer les turbulences.

Les dix cassettes décrites plus en détail dans le chapitre 4.2.1 contiennent une végétation et un substrat différents afin de tester plusieurs configurations pour atteindre l'optimum des différentes fonctions. Le substrat est composé à 30% de biochars dans les cassettes impaires (C1, C3, C5, C7, C9) et à 50% dans celles paires (C2, C4, C6, C8, C10). Les détails de la composition du substrat sont donnés dans le chapitre WP4.

4.2.1 Les cassettes

Les cassettes aux dimensions intérieures de 150x20x50cm sont réalisées en tôle zinguée et caillebotis d'une épaisseur de 2 mm. Elles sont végétalisées sur leurs deux grandes faces latérales et du gravier recouvre leur surface afin d'éviter la mise en suspension du substrat. Les petites faces (amont et aval) sont étanches alors que les grandes faces (latérales) sont réalisées en caillebotis doublé d'un géotextile (voile de forçage P17) destiné à retenir le substrat tout en étant traversé par la végétation. La surface d'infiltration est de 0.3m² par cassette (3m² au total). Le fond est recouvert d'une couche de 2cm de billes d'argile expansée. Une couronne en panneau de coffrage est fixée autour du bord supérieur de la cassette pour assurer l'étanchéité et permettre une mise en charge de 16 cm d'eau. Un seuil rectangulaire en aluminium permet à l'eau de s'écouler dans la cassette suivante dès que la mise en charge dépasse 4.5 cm (Figure 4-6).

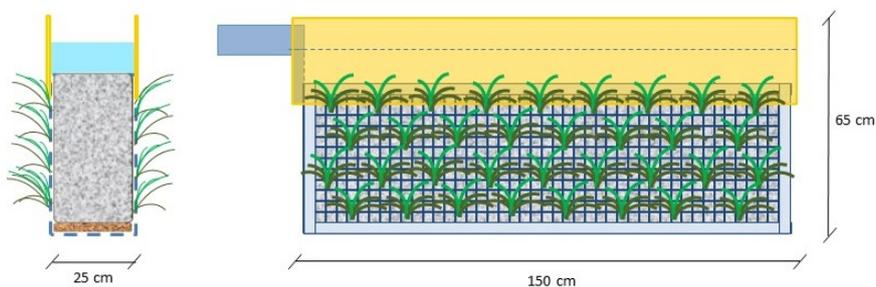


Figure 4-6 : Schéma d'une cassette, en coupe transversale (gauche) et profil (droite) (Slijepcevic 2014).

4.2.2 Le substrat

Les substrats ont été développés afin d'offrir plusieurs caractéristiques : être végétalisables, autoporteurs, à forte perméabilité, à forte réactivité, à grande stabilité temporelle et être recyclables. Ils

ont été élaborés (en collaboration avec Swiss-biochar, Institut Ithaka et Bionika) uniquement à partir de déchets, selon les proportions indiquées au Tableau 4-1.

Tableau 4-1 : Composition des différents substrats élaborés

Constituants des substrats	Terra Preta 30 Composition en (%)	Terra Preta 30 Composition en (%)
Biochars (déchets de bois pyrolysés)	30	50
Déchets verts variés et pré-compostés	30.8	22
Déchets verts frais	7.7	5.5
Compost immature d'un andain précédent (inoculum bactérien)	7.7	5.5
Fumier de vache	15.4	11
Déchets fins de gravière (structure minérale)	8.4	6

4.2.3 La végétation

Les critères appliqués à la sélection d'espèces végétales capables de colonisées et de maintenir le substrat dans le temps, fonctionnelles d'un point de vue hydrodynamique et épuratif sont les suivants :

- Un fort enracinement de façon à :
 - stabiliser mécaniquement le substrat,
 - favoriser une perméabilité optimale
 - permettre à la matière organique de se « régénérer » au fil du temps de façon à garantir la passivité et l'efficacité du système sur le long terme.
- Une robustesse et une résistance à la sécheresse, les substrats souhaités étant avant tout très drainant (texture sableuse) ceux-ci vont connaître des périodes de sécheresse importantes tant en été qu'en hiver mais aussi sur les structures situées en bout de ligne dans une organisation en série des systèmes épurateurs.
- Un entretien réduit : pas de taille ou de débroussaillage à prévoir.
- Un aspect esthétique et ornemental dans la mesure du possible en toute saison.

Il est important de noter que la sélection des plantes ne favorise pas en soit l'élimination des polluants, il ne s'agit pas de plantes phyto-accumulatrices ou phyto-stabilisatrices. Elles ont le rôle de maintenir et d'entretenir le substrat épurateur au cours du temps.

Les quinze différentes espèces plantées utilisées ainsi que leur exposition sont présentées dans le Tableau 4-2. Les plantes situées dans les premières cassettes (C1, C2...) reçoivent proportionnellement beaucoup plus d'eau que les cassettes situées dans les dernières (C10, C9...)

Tableau 4-2 : Données sur l'infiltration dans une cassette utilisées pour le dimensionnement

Espèce	Exposition et position sur les cassettes
<i>Aster alpinus</i> 'Dunkle Schöne'	Sud – C1 et C2
<i>Carex sylvatica</i>	Nord - C1 et C2
<i>Geranium sanguineum</i>	Sud – C3 et C4

<i>Millium effusum</i>	Nord – C3 et C4
<i>Bromus sterilis</i>	Nord – C3 et C4
<i>Briza media</i>	Sud – C5 et C6
<i>Deschampia cespitosa</i>	Nord – C5 et C6
<i>Liriope muscarii</i>	Sud – C7 et C8
<i>Sedum kamschaticum</i>	Sud – C7 et C8, Nord – C9
<i>Luzula silvatica, Luzula pilosa</i>	Nord – C7 et C8
<i>Koaleria glauca</i>	Sud – C9 et C10
<i>Dianthus gratianopolitanus</i>	Sud – C9, Nord – C10
<i>Carex morowii</i>	Nord – C9 et C10
<i>Tradescantia</i>	Nord – C9

5 Dimensionnement du système

Le banc d'essai a été dimensionné selon les recommandations de l'office fédéral des routes, soit pour avoir la capacité de traiter 90% du volume annuel ruisselé (OFROU, 2013). Le dimensionnement se base sur la pluviométrie d'une période de vingt ans (1993-2012) d'une station installée sur le toit de la chocolaterie Villars (à 500 m du banc d'essai). Le volume des pluies avec une intensité de 1 mm / 10 minutes (6mm/h) et moins correspond à 90% du volume de précipitation annuel moyen (Figure 5-1).

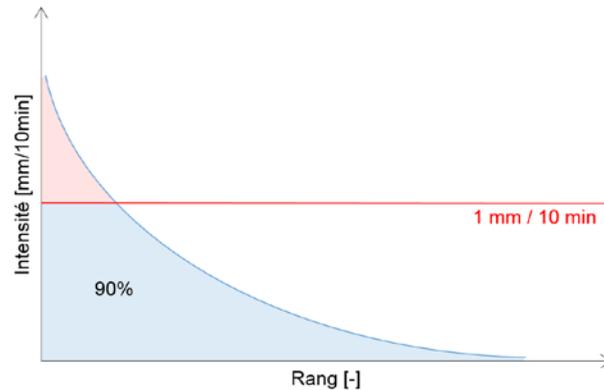


Figure 5-1 : Représentation schématique des intensités classées et limite de 90% du volume total.

Les calculs de dimensionnement sont basés sur :

- L'hypothèse d'une perméabilité moyenne du substrat de 300 mm/h.
- L'hypothèse que l'eau s'écoule verticalement dans le substrat, et donc que l'écoulement a lieu comme si les parois verticales des cassettes étaient fermées.

On peut ainsi utiliser le théorème de Bernouilli (5.1) et la loi de Darcy (5.2):

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H \quad (5.1)$$

$$Q = K \cdot S \cdot \frac{\Delta H}{H} \quad (5.2)$$

On connaît les valeurs résumées dans le Tableau 5-1 et illustrées dans la Figure 5-2 :

Tableau 5-1 : Données sur l'infiltration dans une cassette utilisées pour le dimensionnement

Perméabilité du substrat	K	300	$mm \ h^{-1}$
		$8.34 \cdot 10^{-5} \ m/s$	$m \ s^{-1}$
Dimensions	L	1.5	m
	B	0.3	m
	$H (=h_2)$	0.5	m
Surface	$S = L \cdot B$	0.45	m^2
Hauteur de rétention	h_1	0.1	m

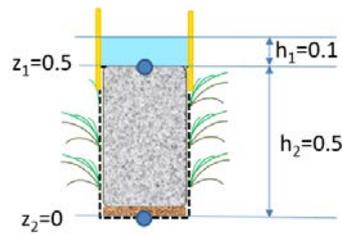


Figure 5-2 : Représentation d'une cassette en coupe

Comme la vitesse est la même en entrée (V_1) et en sortie du substrat (V_2) et que la pression est nulle en bas de la cassette (p_2) car celle-ci est ouverte, on a :

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H$$

=

On peut donc trouver la perte de charge sur la hauteur du substrat :

$$\Delta H = z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g}$$

$$\Delta H = 0.5 + 0.1 \text{ [m]}$$

En intégrant la perte de charge dans l'équation de Darcy, avec la perméabilité du substrat estimée et la surface connue du substrat, on a:

$$Q = K \cdot S \cdot \frac{\Delta H}{H}$$

$$Q = 8.34 \cdot 10^{-5} \cdot 0.45 \cdot \frac{0.6}{0.5} \text{ [m}^3\text{s}^{-1}\text{]}$$

Soit $4.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ou 0.045 l/s par cassette.

Avec un bassin versant réduit de 270 m^2 et une pluie maximum à traiter de 6 mm/h , le débit devant être traité est de 0.45 l/s . L'installation doit donc être composée de 10 cassettes ou plus pour pouvoir traiter 90 % du volume de pluie annuel.

Le Tableau 5-2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** résume les différentes données utilisées pour ce dimensionnement.

Tableau 5-2 : Données sur l'infiltration dans une cassette utilisées pour le dimensionnement

Pente d'énergie	$I = \Delta H/H$	1.2	-
Débit sortant par cassette	Q	0.045	l s^{-1}
Volume de rétention par cassette	V_{disp}	45	l
Intensité de pluie à traiter		6.0	mm h^{-1}
Bassin versant réduit	S_{red}	270	m^2
Débit issu de la S_{red}	q_{ab}	0.45	l s^{-1}
Nombre de cassettes nécessaires		10	-

6 Méthodologie et instruments de mesure

La méthodologie de mesure a été mise en place à partir des méthodes proposées par Bertrand-Krajewski *et al.* 2000. Elle a été adaptée pour le bassin versant et le site étudié.

6.1 Pluviométrie

Les événements pluvieux sont mesurés à l'aide d'un pluviomètre à augets situé directement sur le banc d'essai. Un basculement de l'auget correspond à 0.2 mm de précipitation. Selon le fabricant *MADD Technologies* sa précision de mesure de $\pm 1\%$ jusqu'à une intensité de 90 mm/h. L'intensité I est calculée par intervalle de 10 minutes selon la formule (Figure 6-1).

$$I = \frac{\text{volume auget}}{\text{intervalle entre 2 basculements}} = \frac{0.2}{\Delta t \text{ basculements}} \left[\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right] \quad (6.1)$$



Figure 6-1 : Pluviomètre installé sur le site du banc d'essai.

La somme des précipitations, relative au nombre de basculements est ensuite enregistrée à une fréquence de 10 secondes par le système d'acquisition de données *Campbell Cr1000*.

6.2 Hauteurs d'eau et débits

Les débits entrants, sortants et surversés sont calculés à l'aide des hauteurs d'eau mesurées par des sondes à ultrason (PiL P43) en amont de déversoirs triangulaires à paroi mince (Figure 6-2 et Figure 6-3).



Figure 6-2 : Bac d'entrée avec le déversoir et les différents instruments de mesures installés.



Figure 6-3 : Bacs de sortie avec le déversoir et les différents instruments de mesures installés.

Le constructeur des sondes ultrason indique une précision de mesure de $\pm 0,5 \%$ de la pleine échelle (distance entre le capteur et le plan d'eau). Cette distance étant de 380 mm maximum, la précision théorique est de ± 1.9 mm. Une analyse du signal en période de faible pluviosité sur le terrain (plan d'eau à niveau constant) montre un écart type de 1.52 mm.

La mesure est enregistrée toutes les 10 secondes et enregistré sur le *Campbell Cr1000*. Afin d'atténuer le bruit de la mesure dû aux mouvements du plan d'eau et la précision des capteurs, une moyenne glissante est appliquée sur 5 minutes, basé sur la méthode décrite par Lepot 2012.

Le débit instantané (Q) est ensuite calculé en fonction de la hauteur d'eau sur le déversoir triangulaire (h) selon la formule de Kindsvater et Carter (6.2) . Le déversoir possède un angle d'ouverture de 45° .

$$Q = \mu \cdot \frac{8}{15} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \sqrt{2g} \cdot (h + K_h)^{5/2} \quad (6.2)$$

Avec $\mu = 0.7552$ et $K_h = 1.775$ mm (Selon NF X 10-311. 1983).

6.3 Turbidimétrie et polluants

La concentration en polluants est mesurée au moyen d'un indicateur indirect, la turbidité (TU). La mesure de la turbidité pour déterminer en continu la concentration en MES et en métaux est de plus en plus utilisée et peut être considérée comme fiable selon Lacour *et al.* (2010). Elle est ici mesurée avec des sondes (*Turbimax CUS51D Endress+Hauser*) placées en entrée, sortie et surverse du système selon la méthodologie présentée par Bertrand-Krajewski *et al.* (2010) et Favre Boivin *et al.* (2013).

Les sondes turbidité mesurent la teneur en particules par néphélométrie à l'aide d'un rayonnement à 860 nm selon la norme EN ISO 7027. Le fabricant donne une imprécision de mesure inférieure à 2% de la valeur mesurée ou 0.1 FNU. Elles sont placées horizontalement, perpendiculaire à l'écoulement et maintenues en permanence dans la lame d'eau (Figure 6-2 et Figure 6-3). Une valeur est enregistrée toutes les dix secondes sur le *Campbell CR1000* par l'intermédiaire du transmetteur (*Liquiline Endress+Hauser*). Afin d'amenuiser leur encrassement, et de retarder la formation d'un biofilm, de l'air est soufflé 5 secondes devant les capteurs toutes les 20 minutes à l'aide d'une pompe d'aquarium. Durant la période d'acquisition, les sondes de turbidité ont été vérifiées à deux reprises avec des solutions étalon *Amco Clear* de 0 NTU, 10 NTU, 100 NTU et 1000 NTU. Aucun écart important n'a été relevé.

Une maintenance est effectuée toutes les deux semaines sur le matériel. Les sondes sont nettoyées manuellement. On procède à ce moment au mesurage de l'encrassement de la sonde. Les capteurs sont plongés une première fois sales dans de l'eau distillée durant 3 minutes et on enregistre la turbidité moyenne mesurée (TU_a). Elles sont ensuite nettoyées et on procède à la même manipulation (TU_b). On obtient l'encrassement à l'instant du nettoyage Equation (6.3).

$$\text{Encrassement} = (TU_b - TU_a) \quad (6.3)$$

Le suivi ne permet de connaître l'encrassement des sondes en temps réel et celui-ci est largement dépendant des conditions environnementales et des saisons (température de l'eau, présence de matière organique...). Lors du traitement des données, l'hypothèse est faite d'un encrassement linéaire dans le temps. Les valeurs acquises sont corrigées selon cette hypothèse.

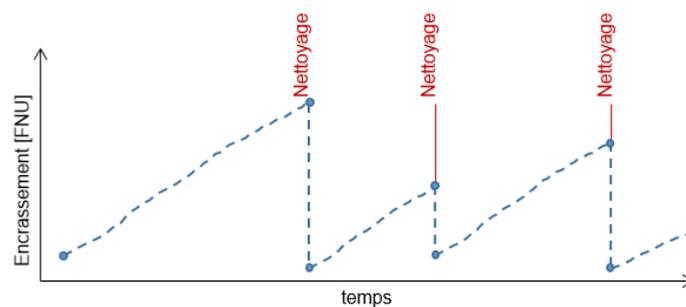


Figure 6-4 : Représentation schématique de l'encrassement linéaire des sondes.

Le traitement du signal de la turbidité est basé sur la méthode décrite par Aumond *et al.* (2006). Les filtres suivants sont appliqués dans l'ordre afin d'enlever les mesures aberrantes et obtenir une turbidité corrigée (TU_{corr}) :

1. Soustraction de la valeur de l'encrassement (linéairement entre deux nettoyages) ;

2. Remplacement des valeurs de turbidité par la médiane glissante de la valeur précédente si le minimum glissant est inférieur de 1.5 FNU à la médiane glissante sur 5 minutes ;
3. Minimum glissant sur 5 minutes des valeurs de turbidité ;
4. Médiane glissante sur 5 minutes des valeurs de turbidité ;
5. Suppression des événements où l'encrassement est supérieur à 10 FNU.

Parallèlement au mesurage en continu de la turbidité, un échantillonnage des eaux est réalisé. On y mesure les paramètres matières en suspension (MES) et cuivre total (Cu). Les valeurs de turbidité et de MES, ainsi que les valeurs de turbidité et Cu sont ensuite corrélées. L'échantillonnage des eaux est asservi à la pluviométrie et réalisé en entrée et en sortie durant les événements pluvieux. Les prélèvements sont distribués dans 24 bouteilles en PE-HD au moyen de préleveurs automatiques *Teledyne ISCO 6712*. L'eau est pompée par l'échantillonneur à proximité directe de la sonde turbidité. Les échantillons sont récupérés dans les 24 heures et séparés pour être d'une part stockés après acidification au HNO_3 en vue de l'analyse du cuivre et d'autre part filtrés à l'aide de filtres en cellulose mixte d'une porosité de $0.45 \mu\text{m}$ (*Whatman N° 10401612*). Les filtres sont séchés 24 heures à 105°C et la pesée du filtrat permet de calculer la teneur en MES en fonction du volume filtré.

6.4 Couplage turbidités et débits

Les flux de polluants entrant $F_{Poll,in}$ et sortant $F_{Poll,out}$ sont calculés à l'aide des mesures de turbidités corrigées $TU_{corr,in}$ et $TU_{corr,out}$ ainsi que des débits entrant Q_{in} et sortant Q_{out} Equation (6.2).

Les valeurs de turbidité $TU_{corr,in}$ et $TU_{corr,out}$ sont premièrement transformées par régression linéaire (Equation (6.4)) en charge polluatives (MES ou cuivre), grâce aux prélèvements réalisés sur le terrain lors d'événements pluvieux. Les courbes d'étalonnage sont disponibles en Annexe 12.

$$C_{poll} = a \cdot TU_{corr} + b \quad (6.4)$$

avec a et b les coefficients de la droite.

Tableau 6-1 : Coefficients a et b des courbes de corrélation des polluants

Polluants	Nb d'échantillon	a	b	R^2
MES_{in}	102	1.124	0	0.87
Cu_{in}	20	7.03 E-4	1.18 E-2	0.86
MES_{out}	115	1.236	0	0.87
Cu_{out}	21	7.77 E-4	8.95 E-3	0.90

Ensuite, les flux de polluants sont calculés en multipliant la charge polluative par le débit (Equation (6.5)).

$$F_{Poll_i} = Q_i \cdot C_{Poll_i} \quad (6.5)$$

6.5 Capacité de rétention

Chaque cassette est équipée d'une sonde tensiométriques de type résistance électrique à matrice granulaire (*Watermark Model 200SS*) positionnée en son centre à une profondeur de 25 cm. Celle-ci permet de calculer la teneur volumique en eau du substrat $\theta(h)$ et ainsi d'approximer la quantité stockée dans les cassettes par la formule de Van Genuchten (1980) (Equation (6.6)). Les sondes *Watermark* ont l'avantage de ne pas nécessiter d'entretien, de ne pas se désamorcer ni de craindre le gel. Selon Shock

et al (2016) bien que leur précision est moins grande que celle d'un tensiomètre, elle est suffisante et leur réactivité est importante, bien qu'on constate une perte de précision lors de forte humidité (moins de 10 cbar).

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left(\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (6.6)$$

Avec h = pression de succion d'eau, n = mesure adimensionnelle de la taille des pores, θ_r = teneur en eau résiduelle, α = inverse de la charge capillaire critique et θ_s = teneur en eau à saturation.

Des mesures de teneur en eau et de tensiométrie ont été réalisées en laboratoire sur les substrats utilisés par l'Hepia. Ces valeurs expérimentales ont ensuite été utilisées pour ajuster les paramètres de l'équation de Van Genuchten (Tableau 6-2) et permettre la mesure en continu.

Tableau 6-2 : Coefficients b et m des courbes de corrélation des polluants

	BC30	BC50
θ_r	0.0232	0.2522
θ_s	0.8243	1
n	1.1688	1.2876
α	0.3218	0.9179

Durant chaque événement, les différences entre la valeur initiale et la valeur finale du stock d'eau des cassettes sont sommées pour obtenir le stock total. Ce mode de calcul peut surestimer ou sous-estimer le stock d'eau en fonction de l'importance des volumes écoulés. En effet, le substrat au centre de la cassette n'est pas forcément au même taux d'humidité qu'à la surface ou qu'au fond de la cassette, en particulier pour les événements pluvieux générant de petits volumes de ruissellement.

7 Calcul des performances de traitement

L'efficacité comprend deux aspects : le premier est l'efficacité hydraulique, à savoir, la capacité à faire passer un certain débit d'eau dans le système de traitement sans déborder. Le second est l'efficacité d'abattement de la pollution, à savoir la capacité à retenir la pollution dans le système de façon durable.

7.1 Calcul de la performance hydraulique

La capacité hydraulique (η_{hyd}) du système est calculée par la formule suivante et permet de vérifier le potentiel d'infiltration pour le bassin versant étudié.

$$\eta_{hyd} = 1 - \frac{\sum V_{bypass}}{\sum V_{in}} \quad (7.1)$$

Où V_{bypass} est le volume n'ayant pas pu être traité par le système lors d'un événement et V_{in} le volume entrant pour ce même événement.

7.2 Calcul de la performance de dépollution

L'efficacité du traitement f_{abat} est calculée par différence entre la masse de pollution entrante et sortante du système sur un intervalle de temps donné (Δt), normée par la quantité de pollution entrante. La masse de pollution se calcule en multipliant la concentration en MES entrante (MES_{in}) ou sortante (MES_{out}) par Q_{in} respectivement Q_{out} sur Δt . La concentration en continu de la MES est déterminée par une relation entre la MES des échantillons et la turbidité au moment du prélèvement.

$$f_{abat} = \frac{\sum F_{Poll, in} \cdot \Delta t - \sum F_{Poll, out} \cdot \Delta t}{\sum F_{Poll, in} \cdot \Delta t} \quad (7.2)$$

8 Résultats

8.1 Pluviométrie

Durant la période d'analyse, la hauteur de précipitation est moins importante que durant la moyenne 1961-1990. Avec 731 mm durant l'année 2015, la hauteur de précipitation est largement en dessous de la moyenne de 1118mm (-35%) et est en dessous du quartile inférieur. La raison en est surtout un été 2015 au fort déficit hydrique et un automne sec.

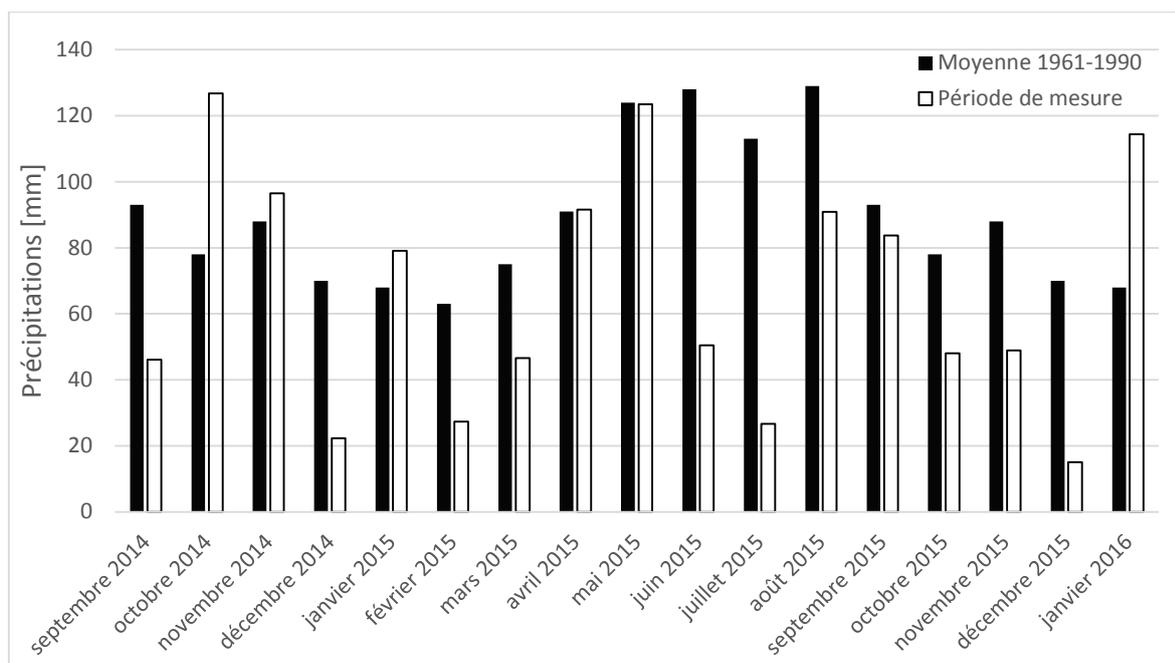


Figure 8-1 : Comparaison mensuelle entre les mesures cumulées et les valeurs normales de MeteoSuisse pour la station GRA

Il a été choisi de caractériser les pluies en fonction de l'intensité maximale I_{max} , la durée d_{pl} , le volume V_{pl} et la période antécédente sèche PAS (Figure 8-2). Les valeurs des quatre paramètres ont été classées indépendamment par ordre croissant et différentes valeurs statistiques ont été calculées (Tableau 8-1). La période d'acquisition des précipitations s'étant de septembre 2014 à janvier 2016.

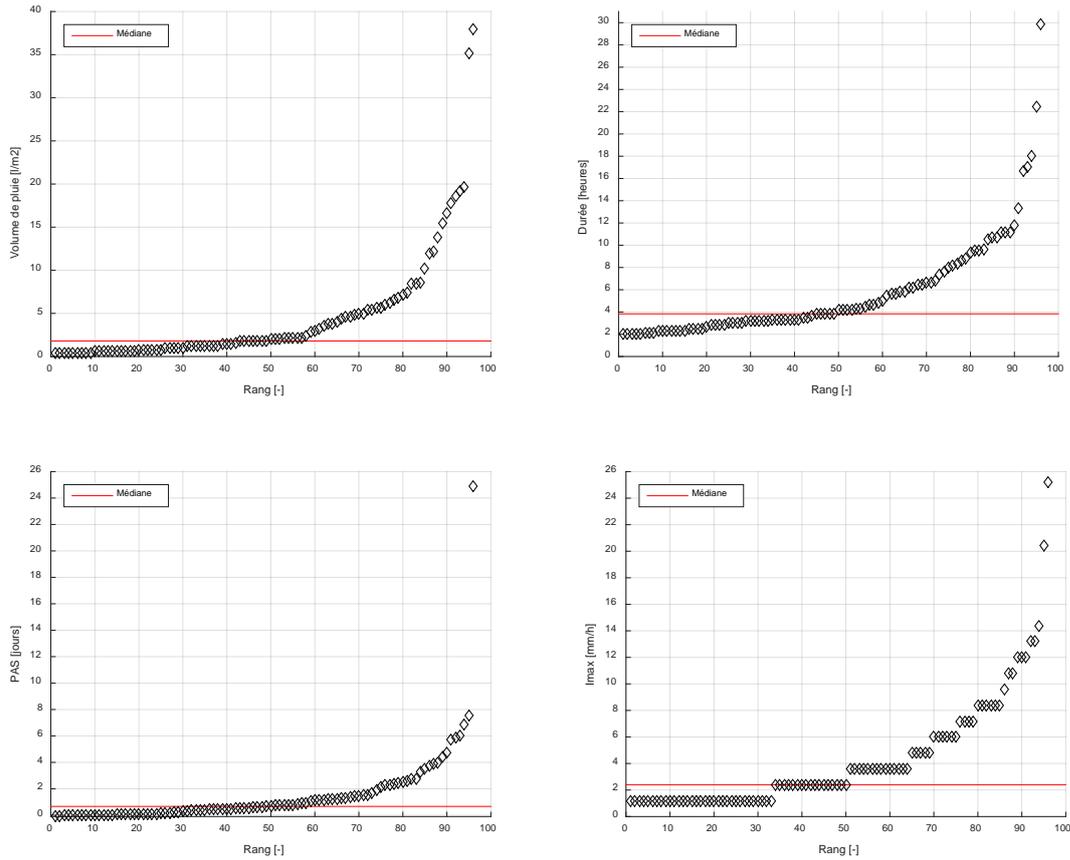


Figure 8-2 : Classement des pluies sur la période d'acquisition en fonction de l'intensité maximale, le volume, la durée et la période antécédente sèche.

Bien que présentant un déficit pluviométrique, la période d'échantillonnage couvre un éventail complet de type d'événements pluvieux. Les événements pluvieux sont classés en catégorie forte, faible ou moyenne, en fonction de la valeur des quantiles des paramètres caractéristiques. Les classes se découpent comme suit :

quartile 25 % < x	événement faible
quartile 25% ≤ x ≤ quartile 75%	événement moyen
x > quartile 75%	événement fort

Tableau 8-1 : Récapitulatif des valeurs statistiques des paramètres

	I_{max} [mm/h]	V_{Pl} [l/m ²]	d_{Pl} [h]	PAS [j]
Minimum	1.2	0.4	2	0
Quartile 25%	1.2	0.8	2.9	0.1
Médiane	2.4	1.8	3.8	0.7
Quartile 75%	6	5.4	7.1	1.6
Maximum	25.2	38.0	29.8	24.9
Moyenne	4.4	4.5	5.8	1.5

8.2 Ruissellements analysés

Le calcul de la performance ne prend pas en compte tous les événements pluvieux mesurés. En effet, en raison des aléas techniques usuelles liés à l'expérimentation *in situ*, certaines valeurs mesurées (turbidité, hauteur d'eau...) sont aberrantes. Au final, 101 événements de ruissellement dont les mesures ont été jugées « propres » ont été sélectionnées pour être analysés sur les 112 mesurés et enregistrés. Les mesures réalisées lors de deux événements pluvieux, respectivement faible et plus important sont illustrés par les Figure 8-3 et Figure 8-4.

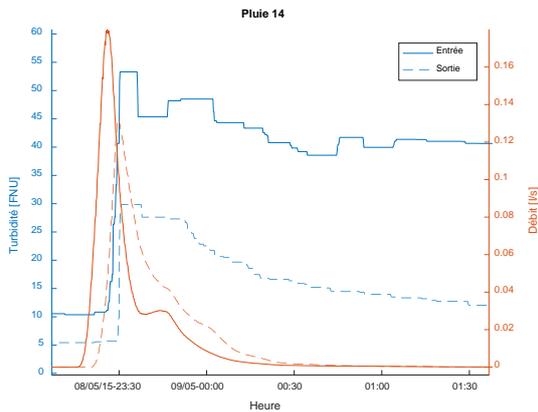


Figure 8-3 : Événement de faible intensité et de faible durée.

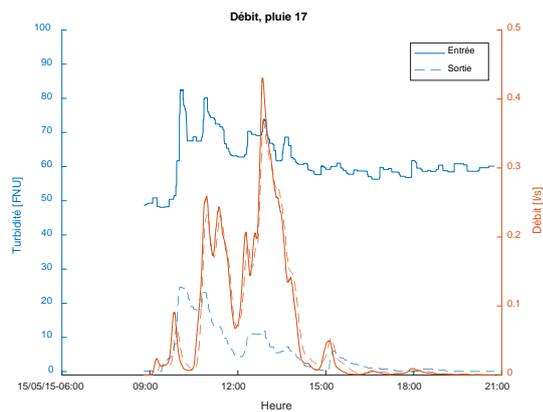


Figure 8-4 : Événement d'intensité élevée et de longue durée.

8.3 Efficacité hydraulique

Lors de la conception du système, celui-ci a été dimensionné pour pouvoir traiter au minimum 90% du volume annuel d'eau entrant. Sur 102 événements pluvieux observés, seul deux ont débordé de la cassette C10 sans avoir été infiltrés. Durant ces deux événements, 32 et 6.65 litres ont surversés, soit respectivement 0.35% et 0.11% du volume ruisselé (Figure 8-5). Le débit de ruissellement maximums de ces événements était respectivement de 1.5 l/s et 1.2 l/s pour une intensité de pluie supérieure à 20mm/h. La capacité hydraulique globale du système se monte à plus de 99%.

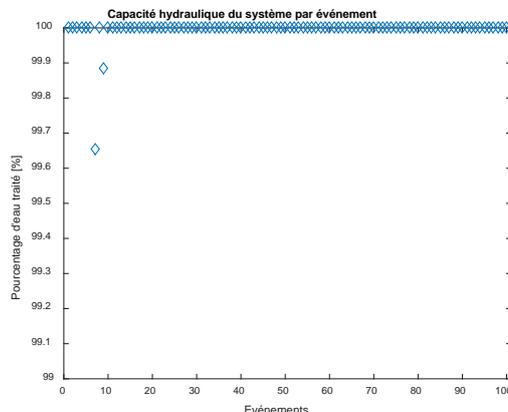


Figure 8-5 : Capacité hydraulique du système en pourcentage lors des événements pluvieux.

Le stockage d'eau par les cassettes est faible. En moyenne environ 15 litres sont stockés dans le système lors d'un événement, soit 1.2% du volume écoulé (Figure 8-6 et Figure 8-7).

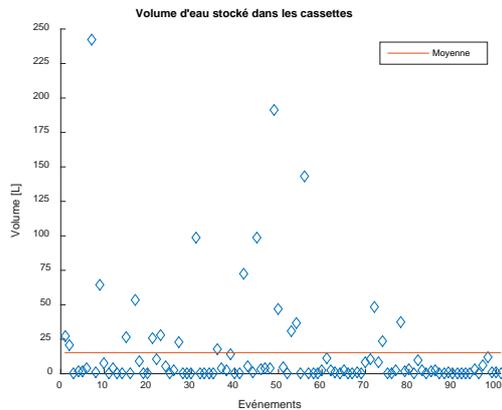


Figure 8-6 : Volume total d'eau stocké par le système lors des différents événements.

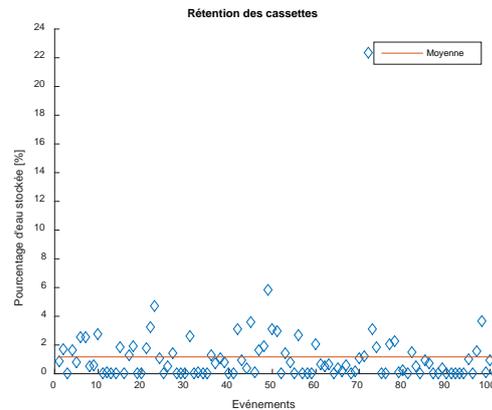


Figure 8-7 : Pourcentage de rétention totale lors des différents événements pluvieux

Le stockage dépend du nombre de cassettes mises à profit et de l'état de sécheresse du substrat dans les cassettes. Le stockage est plus important lors d'événements de forte intensité car des cassettes habituellement plus sèches situées à la fin du système sont sollicitées (Figure 8-8).

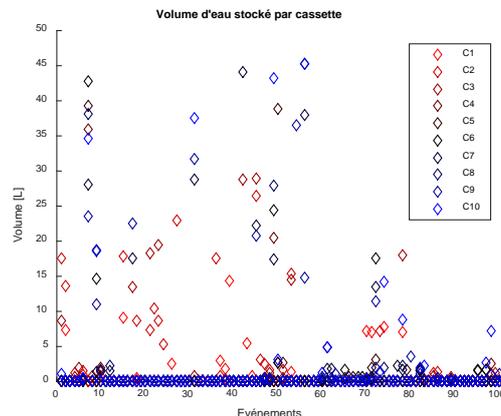


Figure 8-8 : Stockage des dix cassettes au cours des différents événements.

8.4 Efficacité de dépollution

Le système a une efficacité totale d'élimination de la MES et du cuivre de respectivement 57% et 48%. L'efficacité varie beaucoup d'un événement à l'autre mais aucune variation tendancielle ni saisonnière de l'efficacité du système au cours du temps n'est constatée. Les Figure 8-8 et Figure 8-9 illustrent la quantité de polluant entrante et sortant du système pour chaque événement.

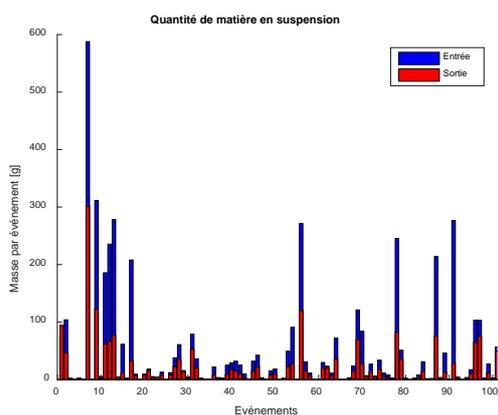


Figure 8-9 : Quantité de MES mesurée en entrée et en sortie du système pour chaque événement.

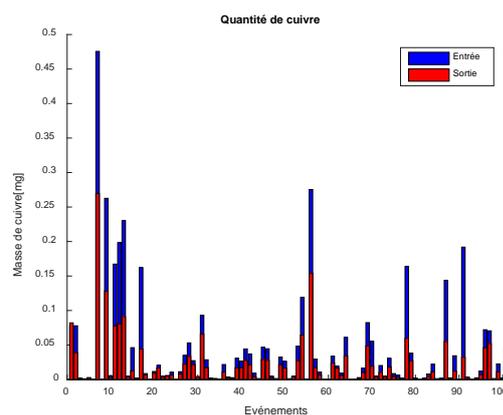


Figure 8-10 : Quantité de cuivre mesurée en entrée et en sortie du système pour chaque événement

Les valeurs statistiques de l'efficacité du système sont résumées dans le Tableau 8-2.

Tableau 8-2 : Valeurs statistiques des coefficients d'abattement lors des différents événements.

Polluants	MES [%]	Cu [%]
Minimum	-24.5	-5.6
Quartile 25%	38.9	35.4
Médiane	53.5	41.8
Quartile 75%	64.8	50.6
Maximum	99.7	83.2
Moyenne	50.2	42.5

L'efficacité moyenne lors des différents événements est légèrement inférieure à l'efficacité globale du système ; un meilleur abattement des polluants s'est donc produit lors des événements les plus importants. Le Tableau 8-3 illustre les valeurs statistiques des teneurs maximales mesurées lors de chaque événement.

Tableau 8-3 : Valeurs statistiques des concentrations maximales en sortie du système lors des événements.

Polluants	Turbidité [FNU]	MES [mg/l]	Cu [$\mu\text{g/l}$]
Minimum	0.1	0.2	9.1
Quartile 25%	15.6	19.2	21.0
Médiane	25.5	31.5	28.7
Quartile 75%	40.7	50.3	40.6
Maximum	167.7	207.2	139.2
Moyenne	35.5	43.9	36.5

En plus de l'évaluation régulière de la MES et du cuivre, des tests ponctuels ont été réalisés afin de mesurer le carbone organique dissout (DOC). Les résultats de quatre échantillons ponctuels répartis sur une année d'échantillonnage sont présentés dans la Figure 8-11.

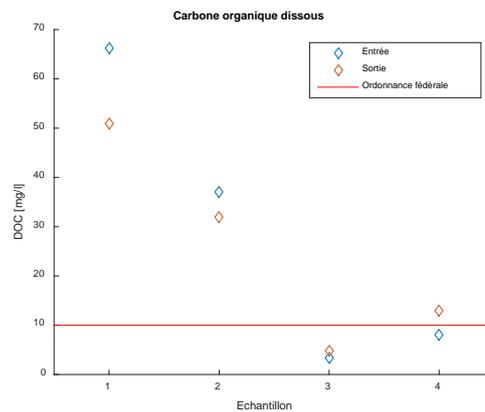


Figure 8-11 : Concentration de DOC en entrée et sortie du système lors de prélèvements ponctuel et limite fixée par l'Oeaux.

Les analyses ont été effectués sur des échantillons ponctuels sur des pluies à différentes saisons et où les concentrations en MES sont variables. Le Tableau 8-4 situe ces différents échantillons en comparaison avec la MES correspondante.

Tableau 8-4 : Valeurs statistiques des concentrations maximales en sortie du système lors des événements.

Date et n° d'échantillon	DOC in [mg/l]	DOC out [mg/l]	MES in [mg/l]	MES out [mg/l]
13.06.2015 (12_2)	66.3	51	184.2	94.5
14.06.2015 (13_7)	37	32	55	30.7
14.08.2015 (22_6)	3.4	4.7	16.6	3.9
06.04.2016 (38_6)	8.1	12.9	189.5	70.3

On observe une teneur en DOC de l'effluent supérieure à ce que préconise l'OEau. Le problème semble s'estomper avec le temps et un premier lessivage du substrat. Cependant, étant donné le faible nombre d'échantillon et la variabilité de ceux-ci (eau plus ou moins chargée en entrée, débits variables...), il est difficile de confirmer une tendance à la baisse de la DOC avec le temps. Des échantillons supplémentaires doivent encore être effectués afin de confirmer ces résultats

8.5 Fonctionnement au cours du temps

Des tests en laboratoire réalisés sur colonnes montrent qu'après un apport équivalent à une année d'eau de ruissellement avec une charge moyenne en MES de 500 mg/L la perméabilité à saturation reste toujours supérieure à 100 mm/h. De plus, aucun échantillon d'eau prélevé en sortie de colonne n'a révélé la présence de métaux (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb et Zn) ou de HAP et l'essentiel des métaux (de 50 à 90%) est retrouvé dans les 10 premiers centimètres des colonnes.

Conformément aux résultats de laboratoire, la perméabilité *in situ* diminue dans les premières cassettes, les plus sollicitées mais reste très élevées dans les cassettes suivantes, n'affectant pas l'efficacité globale du système. (Tableau 8-5). L'évolution de la perméabilité dans le temps fait apparaître un colmatage en surface uniquement. La cassette la plus sollicitée du système voit sa perméabilité à saturation passée à 70 mm/h au bout de 8 mois. Au-delà de la 4^{ème} cassette la perte de perméabilité n'est plus visible.

Tableau 8-5 : Evolution du Ksat des cassettes après neuf mois de mise en place du système.

Date	Volume écoulé [m ³]	Ksat [mm/h]					
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
01.08.2014	0	4961	3301	4892	3904	-	-
07.05.2015	152	69	161	236	493	5142	4500

8.6 La végétation

Le comportement des quinze espèces différentes plantées est très variable d'une espèce à l'autre. L'évaluation résumée dans le Tableau 8-6 est basée sur la qualité de la végétation (couverture, développement et floraison) après plus d'une année *in situ*. Pour l'aspect esthétique, la présence de fleurs est une plus-value non-négligeable dans l'appréciation du système comme l'illustre la Figure 8-12.

Sur les quinze espèces implantées :

- 2 ont totalement disparu ;
- 3 ne se développent pratiquement pas ;
- 2 se développent difficilement compte tenu des conditions de sécheresse à leur niveau ;
- 8 sont un succès du point de vue de la colonisation et/ou de leur aspect esthétique.

Tableau 8-6 : Bilan des différentes espèces végétales implantées depuis octobre 2013 dans les structures.

Espèce	Résultats
<i>Aster alpinus</i> 'Dunkle Schöne'	Optimum de végétation de mars à novembre. Floraison de mai à juillet. Très belle résistance au fil du temps → Succès
<i>Carex sylvatica</i>	Vert en toutes saisons Entretien nécessaire pour éliminer les feuilles sèches → Succès
<i>Geranium sanguineum</i>	Optimum de végétation d'avril à octobre. Floraison de mai à septembre. Très belle résistance au fil du temps → Succès
<i>Millium effusum</i>	Végétation peu abondante mais persistante → Echec
<i>Bromus sterilis</i>	Colonisation de la surface des cassettes. Colonisation latérale peu importante du fait du manque d'eau estival. Adéquate pour des situations plus humides → Mitigé
<i>Briza media</i>	Végétation peu abondante, disparition à la base des structures → Echec
<i>Deschampia cespitosa</i>	Végétation abondante au printemps. Colonisation des structures voisines → Succès
<i>Liriope muscarii</i>	Trop sensible aux conditions extrêmes → Echec
<i>Sedum kamtschaticum</i>	Végétation abondante de mai à septembre. → Succès au Sud, mitigé au Nord
<i>Luzula silvatica</i> , <i>Luzula pilosa</i>	Végétation abondante de mai à septembre → Succès
<i>Koeleria glauca</i>	Végétation peu abondante mais résistante → Mitigé
<i>Dianthus gratianopolitanus</i>	Végétation abondante en toute saison. Floraison juin → Succès
<i>Carex morowii</i>	Végétation abondante → Succès
<i>Tradescantia</i>	Trop sensible aux conditions extrêmes → Echec

D'autres espèces ont été réimplantées au cours de l'année 2015 mais les résultats concernant leur reprise et leur résistance aux conditions de terrain ne sont pas encore disponibles.



Figure 8-12 : A gauche : *Geranium sanguineum*, plantes ayant poussé avec succès. A droite : *Koalera glauca*, plantes ayant montré un faible développement mais ayant résisté à l'irrigation peu abondante de la dernière cassette.

9 Discussions des résultats et remarques

9.1 Critère d'appréciation de la performance du système

L'efficacité du système SMACC est comparée aux valeurs définies par le rapport ASTRA 88 002 *Strassenabwasserbehandlungsverfahren: Stand der Technik* (OFROU, 2010). La capacité hydraulique, l'abattement de la pollution et les concentrations maximales en sortie des systèmes sont considérées et classées en 5 groupes (Tableau 9-1). La classe la plus élevée dénote la meilleure performance.

Tableau 9-1 : Classe d'efficacité en fonction de divers paramètres, adapté selon OFROU, 2010.

Classe d'efficacité	Capacité hydraulique	Concentrations		Degré d'efficacité	
		<i>MES</i>	<i>Cu</i>	<i>MES</i>	<i>Cu</i>
	q_w, q_v [l/m ² /min]	<i>MES</i> [mg/l]	<i>Cu</i> [µg/l]	<i>MES</i> [%]	<i>Cu</i> [%]
5	>8	<10	<5	>90	>90
4	4	20	10	80	80
3	2	30	15	70	70
2	1	40	20	60	60
1	<1	>40	>20	<60	<60

Selon cette méthode d'évaluation, le système SMACC est classé dans la classe d'efficacité n°1. Avec une capacité de traitement de plus d'un 1 l/s pour une surface de traitement de 3.75m², la capacité hydraulique du système est largement dans la classe d'efficacité n° 5, cependant le degré d'efficacité et les concentrations en sortie sont plus faibles. Une optimisation entre ces deux paramètres permettrait d'améliorer la performance globale du système : en effet, une réduction de la conductivité hydraulique par réduction de la taille des pores conduirait à une meilleure rétention des polluants particuliers.

L'eau s'écoule dans la plupart des cas verticalement mais des chemins préférentiels par les faces végétalisées ont pu être observés. L'eau suit les plantes et ressort du substrat au niveau de celles-ci. Cela s'est particulièrement manifesté sur les cassettes ayant été végétalisées en cours de l'expérience. Il est possible qu'en résolvant les problèmes de chemins préférentiels le bilan soit amélioré. Il en résulterait probablement une capacité hydraulique légèrement amoindrie mais l'efficacité épurative serait accrue grâce à l'augmentation du temps de contact avec le substrat. On peut imaginer une augmentation de la classe d'efficacité au n°2.

9.2 Appréciation du substrat

Durant l'année de test, le substrat n'a subi qu'un faible tassement d'environ 2-3cm sur les cassettes, soit 4 à 6% de la hauteur. Selon les mesures de K_{sat} , la capacité hydraulique des cassettes de queue de système (peu sujettes à la colmatation) est restée stable. Les premières cassettes (ayant subi une colmatation en surface) ont perdu, comme on pouvait s'y attendre, de leur capacité hydraulique. Celle-ci reste néanmoins élevée, et supérieure aux valeurs utilisées pour le dimensionnement, dès la quatrième cassette.

Le colmatage diminue la capacité d'infiltration des cassettes, mais aucune incidence sur la capacité épurative n'est constatée. On constate que le colmatage se passe dans les 10 premiers centimètres des cassettes. Il est donc possible de retrouver la capacité d'infiltration initiale des cassettes en remplaçant cette couche de substrat lors d'un curage.

Un problème de DOC dans l'eau effluente est constaté, des analyses supplémentaires afin d'en déterminer l'importance et pouvoir régler ce problème doivent être réalisées. Il est possible que le substrat soit en partie lessivé au passage de l'eau. Un lessivage préalable du substrat, avant installation sur le terrain est une mesure à envisager à l'avenir.

9.3 Utilisation du géotextile

L'utilisation de géotextile pour contenir le substrat est problématique car il est difficilement pénétrable par la végétation ; il est fragile et non régénérant. Sa structure est fragilisée car il est percé aux endroits où sont repiquées les plantes. Ceci facilite le passage de petites quantités de substrat. Ce rejet peut induire une diminution de l'efficacité du système. Lors de l'année d'expérimentation, le géotextile de la cassette C4, s'est déchiré et celle-ci s'est vidée d'une bonne partie de son substrat, illustrant les problèmes dus à son utilisation.

Une des solutions envisagée est la mise en place sur les faces d'un tapis de gazon pour retenir le substrat (Figure 9-1). L'important réseau racinaire permet une bonne tenue du substrat, une auto régénération et une végétalisation ornementale à l'intérieur de ce réseau est envisageable. La solution est actuellement en test à la Heia-Fr.



Figure 9-1 : A gauche : Tapis de gazon destiné à retenir le substrat. A droite : Utilisation de géotextile, le plantes ne se développent que par les zones trouées à cet effet.

10 Conclusions et perspectives

Le système SMACC montre une relativement bonne efficacité de traitement des volumes et de la pollution. Le substrat développé permet l'implantation durable de divers types de végétations ne nécessitant pas ou peu d'entretien. Les espèces *Aster alpinus* 'Dunkle Schöne', *Carex sylvatica*, *Geranium sanguineum*, *Deschampia cespitosa*, *Luzula sylvatica*, *Luzula pilosa*, *Dianthus gratianopolitanus* et *Carex morowii* satisfont pleinement les critères de résistance aux conditions données, de développement dans le substrat et d'esthétique.

Au cours du temps, la capacité d'infiltration des cassettes les plus sollicitées (C1-C4) diminue, mais le système utilisé en série permet quand même de traiter plus du 99 % des événements pluvieux. L'efficacité de dépollution respectivement de 57% et 48% pour les MES et le cuivre n'est pas impactée au cours du temps. Des traces de DOC ont été mesurées dans l'eau effluente et une étude plus approfondie doit être menée pour en trouver la cause et appliquer une solution.

Une amélioration de la performance d'épuration est envisageable en augmentant le temps de contact entre l'eau et le substrat et en supprimant les chemins préférentiels. Bien que cela aurait une incidence sur de l'efficacité hydraulique du système, celle-ci est suffisamment grande pour être une peu diminuée. Les solutions consisteraient à travailler sur la géométrie du système ainsi que sur l'utilisation des matériaux. La géométrie pourrait être modifiée pour forcer l'eau à passer par le centre du substrat, empêcher qu'elle ne longe les parois et sorte en suivant les racines des plantes. L'utilisation d'un tapis de gazon pour retenir le substrat à la place du géotextile est également envisageable. L'important réseau racinaire permet une bonne tenue du substrat et une auto régénération excluant la sortie de substrat par les parois.

11 Références

- AFNOR. Mesure de débit de l'eau dans les canaux découverts au moyen de déversoirs en mince paroi. NF X 10-311, Septembre 1983, 37p.
- AFNOR Qualité de l'eau : Détermination de la turbidité, NF EN ISO 7027, (2000-03).
- Aumond, M., & Joannis, C. (2006). Mesure en continu de la turbidité sur un réseau séparatif eaux usées: mise en œuvre et premiers résultats. *Houille blanche*, 4, 121.
- Bertrand-Krajewski, J.-L., Laplace, D., Joannis, C. and Chebbo, G. (2000). *Mesures en Hydrologie Urbaine et Assainissement*. Paris: Technique & Documentation.
- Bertrand-Krajewski, J. L., Joannis, C., Chebbo, G., Ruban, G., Métadier, M., & Lacour, C. (2010). Comment utiliser la turbidité pour estimer en continu les concentrations en MES et/ou DCO. *Techniques Sciences Méthodes*, 105(1/2), 36-46.
- Branchu, P., Badin, A. L., Bechet, B., Eisenlohr, L., Priol, T. L., Marseille, F., & Trielli, E. (2013). Pollution d'origine routière et environnement de proximité. *Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement*, (Hors-série 15).
- Degrémont, S. A. (2005). *Mémento technique de l'eau/Degrémont*. 2 Vol.
- Mathieu Lepot, (2012). Mesurage en continu des flux polluants en MES et DCO en réseau d'assainissement. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- MétéoSuisse, (2012). Normes standard 1961-1990: Précipitations. Genève: Office fédérale de météorologie et de climatologie MétéoSuisse, pp. 9.
- OFROU, (2010). *Strassenabwasserbehandlungsverfahren: Stand der Technik*. Bern: Bundesamt für Strassen ASTRA, Bundesamt für Umwelt BAFU, pp. 130.
- OFROU, 18005f, (2013 V1.30), *Traitement des eaux de chaussée des routes nationales* (94p.)
- OFEV, (2002). *Instructions - Protection des eaux lors de l'évacuation des eaux des voies de communication*. Berne: Office fédérale de l'environnement et du paysage, pp. 57
- Shock, C. C., Pereira, A. B., Feibert, E. B., Shock, C. A., Akin, A. I., & Unlener, L. A. (2016). Field Comparison of Soil Moisture Sensing Using Neutron Thermalization, Frequency Domain, Tensiometer, and Granular Matrix Sensor Devices: Relevance to Precision Irrigation. *Journal of Water Resource and Protection*, 8(02), 154.
- Slijepcevic A. (2014). Test et adaptation d'un biofiltre pour le traitement des eaux de ruissellement de chaussée. Travail de Master Hes-so.

12 Annexe A : courbes de régression linéaire

12.1 Loi turbidité TU vs matières en suspension MES

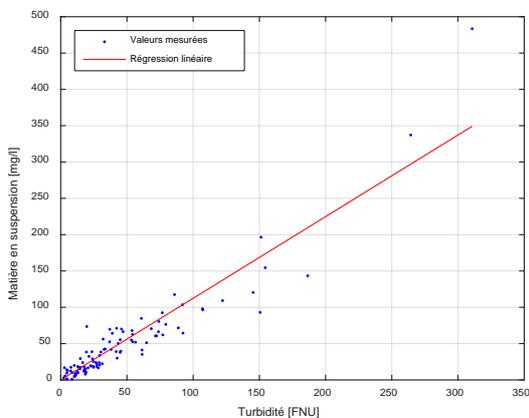


Figure 12-1 : Régression linéaire de la relation turbidité TU et matière en suspension MES, en entrée du système.

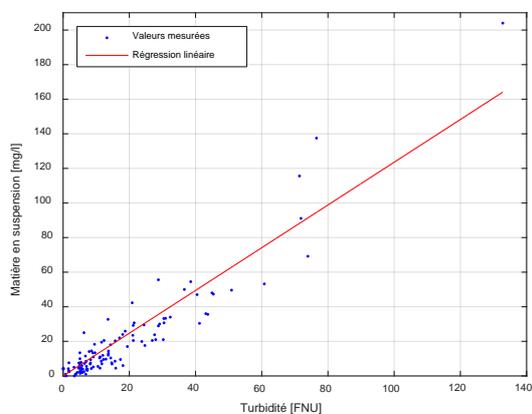


Figure 12-2 : Régression linéaire de la relation turbidité TU et matière en suspension MES, en sortie du système

12.1 Lois turbidité TU vs cuivre Cu

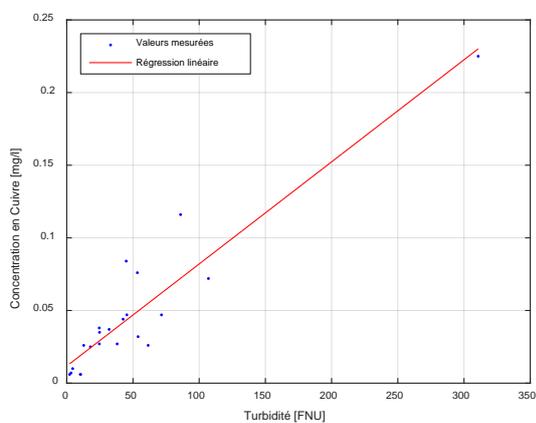


Figure 12-3 : Régression linéaire de la relation turbidité TU et Concentration en cuivre Cu, en entrée du système.

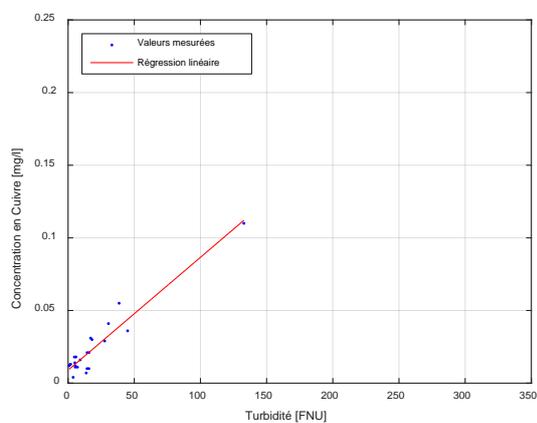


Figure 12-4 : Régression linéaire de la relation turbidité TU et Concentration en cuivre Cu, en sortie du système

13 Annexe B : Exemples de mesure d'une pluie

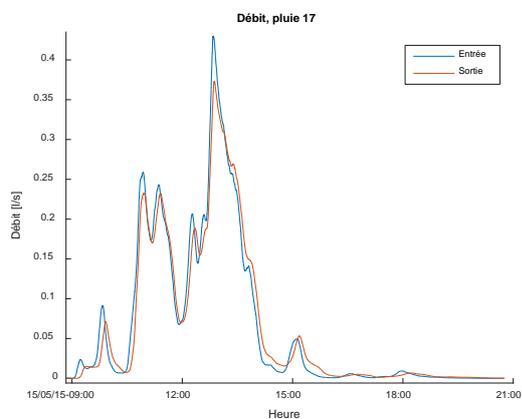


Figure 13-1 : Débit entrant et sortant du système lors de la pluie n° 17.

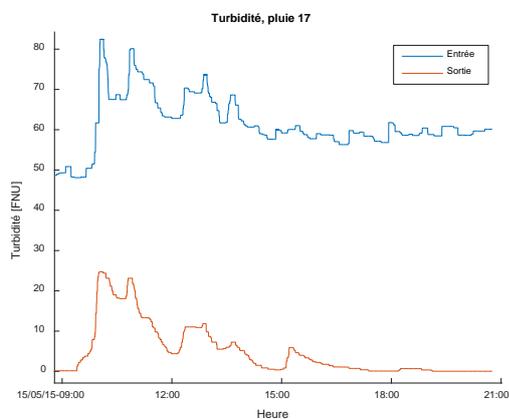


Figure 13-2 : Turbidité de l'eau entrant et sortant du système lors de la pluie n° 17

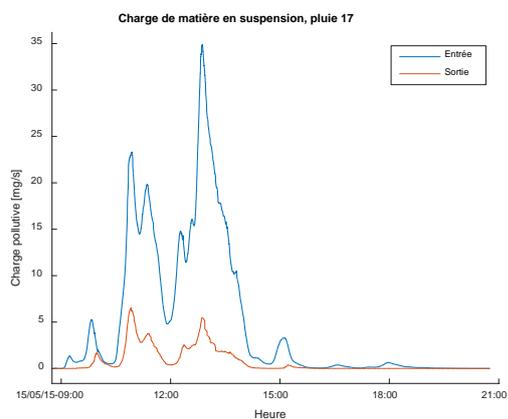


Figure 13-3 : Charge polluante (MES) entrant et sortant du système lors de la pluie n° 17.

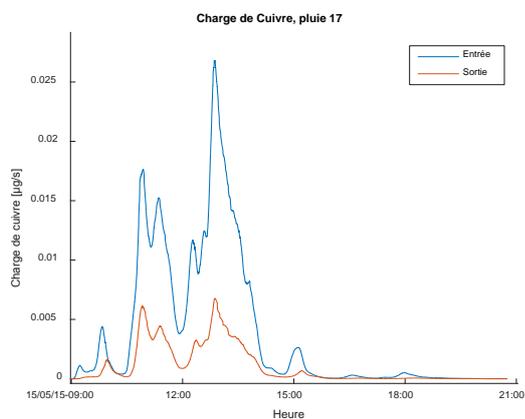


Figure 13-4 : Charge polluante (Cu) entrant et sortant du système lors de la pluie n° 17.