

GUIDE DES MESURES ENVIRONNEMENTALES, ENERGETIQUES, ECOLOGIQUES ET PAYSAGERES DANS L'AMENAGEMENT URBAIN ET LES INFRASTRUCTURES



Étude réalisée par :



encis
environnement

Bureau d'études en environnement
énergies renouvelables et aménagement durable

DECEMBRE 2020

www.encis-environnement.fr

Ce guide a été réalisé à l'attention des maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvres et bureaux d'études qui travaillent sur des aménagements urbains et des voiries à la recherche de mesures et de techniques éprouvées pour intégrer pleinement dans leur projet des questions d'écologie, de paysage, de gestion de l'eau et de maîtrise de l'énergie. Ce guide est le résultat d'un travail de RetD basé sur l'analyse de nombreux cas concrets et de retours d'expérience.

Table des matières

Partie 1 : Cadrage de l'étude.....	6
1.1 Présentation du projet	7
1.2 La RetD au sein d'ENCIS Environnement	7
1.3 Rédacteurs du dossier.....	8
Partie 2 : Méthodologie	9
2.1 Postulats et questions de départ à vérifier	10
2.2 État de l'art et bibliographie, verrous et innovation du sujet	10
2.3 Démarche méthodologique	10
Partie 3 : La préservation de la qualité de l'eau et des sols.....	12
3.1 Les incidences sur les sols et les milieux aquatiques des aménagements conventionnels.....	13
3.2 Les mesures de préservation des sols et des milieux aquatiques des aménagements urbains durables	15
Partie 4 : La biodiversité, le végétal et le paysage dans les aménagements	42
4.1 Les incidences des aménagements sur la biodiversité et le paysage dans le cadre d'aménagements urbain ou d'infrastructures conventionnels	43
4.2 Mesures de préservation de la biodiversité et des paysages	44
Partie 5 : L'énergie et la construction durable	79
5.1 Les défis énergie/climat et le cadre réglementaire.....	80
5.2 Mesures d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables	82
Partie 6 : Des exemples contemporains d'aménagement urbain durable	114
Bibliographie.....	137
Annexes	144
Annexe 1 : Dimensionnement des buses et dalots pour le franchissement des cours d'eau	145
Annexe 2 : Infiltration des eaux pluviales	147
Annexe 3 : Calcul du volume des ouvrages de rétention	150
Annexe 4 : Cadre réglementaire sur l'assainissement et éléments techniques pour la conception de filtres plantés de macrophytes.....	153
Annexe 5 : Espèces herbacées métropolitaines conseillées pour les parterres, massifs et plates-bandes	159
Annexe 6 : Essences favorables aux oiseaux et aux insectes.....	161
Annexe 7 : Passage sous voirie pour la petite faune	162
Annexe 8 : Liste non exhaustive des macrophytes métropolitains pouvant être utilisés dans les ouvrages de gestion des eaux pluviales et les filtres plantés	165

Partie 1 : Cadrage de l'étude

1.1 Présentation du projet

La **biodiversité, la qualité des sols et de l'eau et la richesse paysagère** sont difficiles à maintenir lors d'un aménagement urbain ou de voirie. Le végétal et l'environnement naturel sont des éléments essentiels de **l'adaptation au changement climatique et de qualité de vie**. De ces deux constats est né le souhait d'apporter des solutions éco-paysagères dans les conceptions de projets d'ouvrages, de planification urbaine et dans la gestion de chantiers d'aménagement.

Ce programme de recherche consiste en l'identification de **solutions concrètes à mettre en œuvre pour améliorer les conditions de préservation et de développement de la faune, de la flore, des milieux aquatiques, des sols et du paysage, et la gestion des ressources énergétiques dans le cadre d'aménagements urbains ou d'infrastructures**. Ces travaux de recherche sont construits sur la base d'études menées sur l'agglomération de Limoges, d'évaluations environnementales de planification urbaine (PLU), d'études d'impact de projets d'infrastructures VRD ou d'éco-lotissements menés par notre équipe ainsi que par l'analyse d'écoquartiers existants ou en projet.

La finalité est la rédaction d'un guide des mesures éco-paysagères à intégrer dans le cadre d'aménagements urbains ou d'infrastructures.

1.2 La RetD au sein d'ENCIS Environnement

ENCIS ENVIRONNEMENT cherche sans cesse à améliorer les protocoles et dispositifs expérimentaux ainsi que les outils de modélisation afin d'identifier des pistes techniques à mettre en œuvre pour améliorer la fiabilité des résultats. Les perspectives d'amélioration sont encore nombreuses, ainsi, l'équipe d'ENCIS consacre du temps à des projets de recherche et développement propres à l'entreprise, lui permettant de faire progresser ses prestations ainsi que la connaissance scientifique, en générale.

Depuis quelques années, les activités de RetD sont de plus en plus structurées, afin de leur donner plus d'envergure. Les objectifs sont les suivants :

- Développer les programmes de RetD autour des spécialités suivantes : l'écologie (chauves-souris, oiseaux, botanique), la transition énergétique et le climat dont les énergies renouvelables (éolien et photovoltaïque avant tout), l'eau, les sols et le paysage et le cadre de vie
- Cibler les actions de RetD nécessaires et utiles à notre développement et l'amélioration de nos prestations
- Intégrer ces avancées dans nos rapports et prestations existantes
- Développer des prestations nouvelles par ces programmes RetD
- Rédiger, le cas échéant, des articles ou rapports scientifiques
- Diffuser nos résultats et articles dans des revues, colloques et/ou sur notre page web dédiée à la RetD

1.3 Rédacteurs du dossier

ENCIS Environnement se charge de la rédaction de l'étude. Le bureau d'étude se compose d'une équipe pluridisciplinaire spécialisée dans les problématiques environnementales, d'aménagement durable et d'énergies renouvelables. Dotée d'une expérience de plus de 15 années dans ces domaines, ce bureau d'études indépendant accompagne les porteurs de projets publics et privés au cours des différentes phases de leurs démarches.

Structure	
Adresse	Parc ESTER Technopole 21 Rue Columbia 87068 LIMOGES Cedex
Téléphone	05 55 36 28 39
Coordination et rédaction	Sylvain LE ROUX, Docteur en géographie
Assistance à la rédaction	Morgane PLANCHETTE, Ingénieure stagiaire de l'ENSIL
Relecture et amendements	Mélanie FAURE, Paysagiste conceptrice DPLG
Relecture et amendements	Laure Chassagne, Master en Ecologie
Relecture et amendements	Eric BEUDIN, Master en Ecologie
Approbation	Pierre PAPON, Docteur en géographie

Tableau 1 : Présentation de la structure et des référents du dossier

Partie 2 : Méthodologie

2.1 Postulats et questions de départ à vérifier

Nos postulats et questions de départ sont les suivantes :

- Est-il possible de mettre en œuvre des solutions concrètes pour améliorer les conditions de préservation et de développement de la faune, de la flore, des milieux aquatiques, des sols et du paysage, des ressources énergétiques et du climat dans le cadre d'aménagements urbains ou d'infrastructures ? Ces solutions aboutissent-elles à des résultats acceptables pour la préservation de l'environnement et des ressources ?
- Quels critères permettent de définir un programme comme étant un « écoquartier » ?

2.2 État de l'art et bibliographie, verrous et innovation du sujet

Dans un premier temps, nous réalisons un état des lieux bibliographique pour démontrer ce que l'on apporte à l'état de l'art. Les principaux travaux de référence sur le sujet traité sont en annexe. La problématique et le sujet ont été retenus pour ce programme de RetD car ils permettent de répondre à un manque d'information scientifique sur le sujet, car il existe des verrous à lever ou parce que le sujet est particulièrement nouveau et nécessite de répondre à plusieurs questions, quelle que soit la discipline concernée (science sociale, technologique, modélisation informatique, physique, etc).

Bilan de la bibliographie : il existe une bibliographie scientifique et théorique assez développée sur le sujet de la ville durable et des écoquartiers. Néanmoins, nous constatons qu'un apport basé sur des retours d'expérience de projets concrets et plus pratiques, mais aussi basé sur aménagements en milieu rural sera bénéfique pour l'état de l'art.

2.3 Démarche méthodologique

Une démarche, une méthodologie, des protocoles ou des outils spécifiques sont mis en place pour répondre à la problématique. La démarche est décrite ici, en détaillant les outils et méthodes à employer :

1. **Analyse bibliographique**
2. **Valorisation des dossiers réalisés et retours d'expérience**

Les dossiers réalisés par ENCIS Environnement qui seront utilisés pour compiler nos retours d'expérience seront les suivants :

- La nature en ville dans l'agglomération de Limoges : Diagnostic de la biodiversité en ville et préconisation de mesures permettant de favoriser la nature en milieu urbain, 2018
- Réalisation d'études pour la prise en compte des enjeux environnementaux dans les PLU (Evaluation environnementale du PLU de Veyrac, de Chamboret, du Palais/Vienne, de Cussac : chapitres sur le diagnostic et sur les mesures)

- Etudes pour l'aménagement végétal et la gestion naturelle des eaux de pluie de l'éco-lotissement de la Biche, Feytiat (2017-2019) : conseil sur les solutions de gestion des EP, plan des plantations et dimensionnement de noues
- Etude d'impact sur l'environnement dans le cadre d'ouvrages nécessitant de la VRD (ex : étude d'impact pour un parc solaire ou un parc éolien – Chapitre des Mesures environnementales pour la VRD
- Etudes du potentiel en maîtrise de l'énergie et en développement des énergies renouvelables dans le cadre de Zones d'Aménagement Concertées

3. Visite d'Eco quartiers ou Eco aménagements

- Visite de sites
- Entretiens par questionnaire avec les chefs de projets, gestionnaires et usagers
- Rédaction de monographies sur les sites à l'étude

Nom	Commune
Quartier Courtil-Brécard	Saint-Marc, agglomération de Saint-Nazaire
Quartier Sautron (projet)	Saint-Nazaire
Quartier Vauban	Freiburg-In-Brisgau (Allemagne)
Quartier BEDZED	Suddon (Angleterre)
Quartier de la Chênaie Bottière	Nantes
Lotissement de La Biche	Feytiat
Quartier Beausoleil	Vannes
Quartier La Verderie	Lons, Agglomération de Pau
Quartier Maison Neuve	Guérande

Quartiers visités

4. Analyse et détermination des solutions écopaysagères les plus efficaces
5. Présentation de ces solutions en vue de produire un guide méthodologique
6. Mise en forme graphique et didactique

Partie 3 : La préservation de la qualité de l'eau et des sols

3.1 Les incidences sur les sols et les milieux aquatiques des aménagements conventionnels

Au sein des environnements naturels, le cycle de l'eau comprend les phases suivantes : précipitation, infiltration, ruissellement, évaporation. Lorsque la pluie tombe sur un sol non artificialisé, la plupart de l'eau s'infiltré et intègre une nappe souterraine. Environ 10% de l'eau seulement ruisselle et le reste est évaporé ou absorbé par la végétation. L'urbanisation entraîne un remplacement des voies d'écoulement souterraines, dominant le processus de génération des cours d'eau, par un écoulement par voie terrestre, à mesure que la végétation est supprimée et les sols imperméabilisés. Le volume, la vitesse et la distance de ruissellement augmentent alors, ce qui entraîne une amplification de la pollution et du risque d'inondation. En zone fortement urbanisée, près de 55% de l'eau de pluie ruisselle vers les systèmes de collecte des eaux usées ou directement vers les milieux aquatiques, charriant ainsi de nombreux polluants (pesticides, hydrocarbures, MES, métaux lourds). Seulement 15% s'infiltré dans le sol. En plus des eaux de ruissellement, les aménagements urbains sont à l'origine de la production d'eaux usées. Ces eaux sont chargées de différents polluants (particules fines, matières organiques, nutriments et germes pathogènes), issus du métabolisme humain et des activités ménagères, qui ont un impact direct sur la qualité du milieu récepteur.

Le sol est une ressource non renouvelable indispensable pour l'agriculture et le développement de vie végétale et animale. C'est donc un écosystème fragile qui est soumis à de multiples menaces. Les sols subissent des dégradations liées aux conditions climatiques, mais surtout à l'activité humaine. Ces dégradations peuvent être engendrées par la déforestation, l'agriculture intensive (épandages, pesticides), ou l'extension des aménagements urbains et d'infrastructures routières. L'érosion est la principale menace pesant sur les sols, affectant environ 20% du territoire métropolitain. L'érosion dégrade les horizons superficiels du sol, et par là même les potentialités agronomiques. L'artificialisation des sols est principalement causée par l'extension urbaine et des voies de communication. En France, 66 000 ha de surfaces agricoles utiles sont artificialisés chaque année (d'après SOLAGRO, 2008). En trente ans, les espaces artificialisés ont ainsi progressé de 65 %, passant de 3 à 5 millions d'ha entre 1981 et 2012, soit + 1,64 % par an en moyenne. Les pollutions diffuses ou locales (dépôts atmosphériques, volcaniques, industriels, miniers ou urbains, pesticides, épandage, etc.) affectent également la qualité des sols et les rendent impropres à un usage agricole. La mégafaune (taupes, mulots, etc), la macrofaune (vers de terre, termites, fourmis, larves d'insecte, ...), la mésofaune, (acariens, collemboles, ...), la microfaune, et les micro-organismes sont indispensables à la formation des sols et l'entretien de leur fertilité. Or, la pollution, l'érosion, l'artificialisation des sols détruisent cette biodiversité.

Les **travaux de construction** des voiries, des infrastructures réseaux, des espaces publics et de bâtiments peuvent entraîner les effets suivants sur les **milieux aquatiques et les sols** :

- le tassement des sols, la création d'ornières et le mélange des horizons par le passage d'engins,
- le décapage ou l'excavation de terre végétale (lors de la création de voirie, de tranchées ou de fouilles),
- l'érosion liée à la mise à nu des sols lors des décapages et des défrichements,

- l'imperméabilisation des sols et les modifications de l'écoulement de l'eau,
- la pollution accidentelle des sols et des milieux aquatiques par les engins de chantier ou les process de construction (ex : rinçage des bétonnières, cuve de stockage du bitume, etc.),
- la déviation d'un cours d'eau ou la modification de l'écoulement de l'eau,
- la dégradation de zones humides.



Figure 1 : Chantier de terrassement pour une voirie et un bâtiment

Source : Sylvain LE ROUX

Durant la **phase d'exploitation** d'aménagements urbains (voirie, bâtiments, espaces publics, etc), les incidences sur l'eau et les sols sont essentiellement dues à :

- la pollution liée aux eaux pluviales chargées (matières en suspension, métaux lourds, hydrocarbures, etc.)
- la pollution liée aux eaux usées (matières organiques, nutriments, MES, etc.)
- l'utilisation de produits chimiques d'entretien de la végétation et de dégivrage des routes (pesticides, sel),
- l'artificialisation des sols et l'augmentation de phénomènes d'inondation,
- la consommation et le manque d'eau en cas d'épisodes de sécheresse.

3.2 Les mesures de préservation des sols et des milieux aquatiques des aménagements urbains durables

Les mesures présentées ici ont pour objectif de réduire ou de compenser les impacts les plus importants des projets d'aménagements urbains et d'infrastructures : actions de préservation de la qualité des eaux et des sols pendant la phase de chantier ; gestion alternative des eaux pluviales reposant sur la prise en charge de ces eaux au plus près de leur point d'arrivée au sol ; épuration des eaux usées par un système inspiré des zones humides naturelles.

Les mesures traitées dans ce chapitre sont les suivantes :

- ✓ **Démarches de maîtrise de la modification des sols durant le chantier**
- ✓ **Démarches de maîtrise de la pollution des eaux durant le chantier**
- ✓ **Drainer l'écoulement de l'eau sous les pistes**
- ✓ **Les toitures stockantes**
- ✓ **Création de noues**
- ✓ **Création d'un bassin sec**
- ✓ **Création d'un bassin de rétention en eau**
- ✓ **Utilisation de revêtements perméables**
- ✓ **Création de tranchées**
- ✓ **Chaussée à structure réservoir**
- ✓ **Mise en place d'ouvrages d'interception de la pollution**
- ✓ **Épuration des eaux usées par filtres plantés de macrophytes**



Figure 2 : Quartier de la Verderie à Pau

Source : Sylvain LE ROUX

Démarches de maîtrise de la modification des sols durant le chantier

Impact potentiel identifié : Impacts sur les sols (ornières, tassements, modification des horizons) liés aux opérations de chantier

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectif de la mesure : Maîtriser et réduire la modification des sols et leur dégradation

Description :

- Les travaux de chantier nécessitant les engins les plus lourds seront privilégiés par temps sec pour limiter les risques de compaction du sol.
- Les engins légers avec des pneus basse pression seront privilégiés.
- Prévoir des zones de stockage et de livraison des matériaux, pour éviter la circulation de poids lourds sur le site.
- Un schéma de circulation permettra de concentrer les trajets des engins sur des axes précis. Cela évitera la circulation sur l'ensemble de la parcelle.
- Les tranchées réalisées pour les besoins du chantier seront remblayées au plus vite afin d'éviter toute forme de drainage de l'eau.
- Les trous créés lors du dessouchage seront comblés.
- La terre végétale sera réutilisée sur le site ou valorisée sur un autre site.
- Le cas échéant, le sol des parcelles défrichées sera décompacté à l'issue des travaux.

Calendrier : Durant le chantier

Coût prévisionnel : Intégré aux coûts conventionnels

Responsable : Maître d'ouvrage – Coordinateur de chantier



Figure 3 : Sondages géotechniques en vue d'étudier des fondations-pieux non impactantes

Source : Sylvain LE ROUX

Démarches de maîtrise de la pollution des eaux durant le chantier

Impact potentiel identifié : Pollution des eaux (hydrocarbures, huile, MES) liés aux opérations de chantier

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectif de la mesure : Éviter la pollution des eaux et leur dégradation

Description :

Ravitaillement des gros engins et stockage de carburant

Le ravitaillement des gros engins de chantier se fera par la technique dite de « bord à bord », éliminant ainsi tout risque lié à un stockage de carburant de longue durée sur site. Le stockage de carburant pour le petit matériel portatif s'effectue dans une cuve à double paroi placée sur la base vie ; des contrôles hebdomadaires ont lieu pour s'assurer de l'absence de fuite.

Entretien régulier des engins

Un entretien régulier des engins permettra de prévenir les fuites d'huiles, d'hydrocarbures ou autres polluants sur le site. Les opérations d'entretien des engins seront effectuées à l'extérieur du site dans des ateliers spécialisés.

Mise à disposition d'un kit anti-pollution propre

Un kit anti-pollution (absorbant spécifique) sera disponible par équipe. Il est à placer sous la fuite entre son apparition et son traitement. Il s'agit là d'éviter toute pollution du sol. S'il s'avère que de la terre est souillée, celle-ci est pelletée immédiatement avec le kit anti-pollution et ils sont évacués dans un conteneur spécifique afin d'éviter toute propagation de la fuite dans les couches profondes du sol et vers les aquifères.



Figure 4 : Kit anti-pollution utilisé sur une fuite d'hydrocarbures

Source : HALECO

Mise en place d'équipements sanitaires

La base vie du chantier sera pourvue d'un bloc sanitaire autonome. Aucun rejet d'eaux usées n'est à envisager. Des sanitaires mobiles chimiques seront mis en place pour les ouvriers. Les effluents seront pompés régulièrement et envoyés en filière de traitement adaptée.

Calendrier : Durant le chantier

Coût prévisionnel : Intégré aux coûts conventionnels

Responsable : Maître d'ouvrage – Coordinateur de chantier

Création d'un ouvrage de franchissement de cours d'eau

Impact potentiel identifié : Modification de l'écoulement d'eau par la création d'une piste

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectif de la mesure : Garantir la pérennité de l'écoulement de l'eau

Description de la mesure : L'installation d'un système de franchissement permettra la continuité de l'écoulement des eaux. Il sera donc installé une buse en béton.

Pour ne pas porter atteinte au bon fonctionnement de l'écosystème aquatique, l'installation de buses doit respecter les règles suivantes :

- Conserver le substrat du cours d'eau. La buse doit être enterrée sur 1/4 à 1/3 de son diamètre (ou environ 30 cm) pour permettre le dépôt de matériaux à l'intérieur et ainsi recréer un lit similaire à celui alentour ;
- Être adaptées à la pente pour éviter une accélération de la vitesse d'écoulement qui bloquerait le passage des poissons et augmenterait l'érosion du lit mineur à l'aval ;
- Ne pas créer de chute d'eau en sortie pour les mêmes raisons que citées précédemment ;
- Dimensionner l'ouvrage de façon à permettre de maintenir un lit mineur en période d'étiage et d'accepter les débits de crue (méthode de dimensionnement présentée en annexe 1). La largeur de la buse ou du dalot doit être, de préférence, 1,25 fois supérieure à la largeur moyenne du lit mineur au niveau du tronçon d'installation ;
- N'utiliser qu'une buse sur toute la largeur du cours d'eau.

L'utilisation de dalots (buses à section carrée) est plus adaptée étant données les contraintes techniques susmentionnées.



Figure 5 : Exemple d'une buse mal calée (à gauche) et d'une buse correctement installée (à droite)

Source : respectivement SYRIBT et Bassin Versant Vilaine amont

Calendrier : Mesure appliquée durant la préparation du site et la phase VRD.

Coût prévisionnel : 100 € / ml pour une buse en béton de Ø500 mm (Source : France Assainissement)

Responsable : Maître d'ouvrage - Responsable SME du chantier

Toiture stockante

Impacts potentiels identifiés :

- Ruissellement important des eaux de pluie entraînant une modification du régime des rivières et une pollution des milieux naturels ;
- Augmentation du risque inondation.

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectifs de la mesure :

- Lutter, à l'échelle locale, contre les inondations et les sécheresses ;
- Diminuer la pollution des nappes et des cours d'eau ;
- Créer des espaces urbains diversifiés et agréables.

Description :

La toiture stockante est une toiture plate ou à très faible pente (entre 0,1 et 5 %) entourée d'un parapet qui permet le stockage temporaire des eaux de pluie. Suivant le type de toiture mis en œuvre, les eaux sont restituées par évaporation, évapotranspiration et/ou à faible débit vers un exutoire grâce à des organes de régulation.

La toiture est souvent végétalisée, bien que d'autres couches de finition puissent exister (ex : couche de gravier, pas de matériau par-dessus l'étanchéité). Outre le rôle de stockage et

d'amélioration de la qualité des eaux pluviales, la toiture végétalisée permet de créer un espace favorable pour la biodiversité, d'économiser de l'énergie quelle que soit la saison, d'isoler acoustiquement le bâtiment, de diminuer l'effet d'îlot thermique en ville (rafraîchissement de l'air via l'évapotranspiratoire), d'améliorer la qualité de l'air et d'augmenter la durée de vie des matériaux du toit (protection des UV et des chocs thermiques).

Une toiture stockante est constituée des éléments suivants :

- Un élément porteur,
- Un pare vapeur (qui entrave le cheminement de la vapeur d'eau de l'intérieur du bâtiment vers l'isolant thermique),
- Un isolant thermique (similaire à celui d'une toiture classique),



Figure 6 : Toiture stockante végétalisée
Source : ADOPTA

- Un revêtement d'étanchéité (asphalte ou système bicouche à base de bitume modifié),
- Une protection de l'étanchéité (dalles sur plots, dallage en béton armé, autoprotection, etc.),
- Un ensemble de dispositifs de vidange (régulateurs, trop pleins de sécurité).

Pour les toitures végétalisées, les éléments suivants doivent être mis en place au-dessus du revêtement d'étanchéité :

- Une couche de drainage (structure alvéolaire, association de cailloux et de graviers, granulats minéraux expansés, etc.) ;
- Une couche filtrante (nappes de non tissé synthétique, éventuellement recouverte d'un géotextile anti-racine) ;
- Une couche de terre végétale (épaisseur variable de 8 cm pour les toitures à végétation extensive à 80 cm environ pour les toitures à végétation intensive).

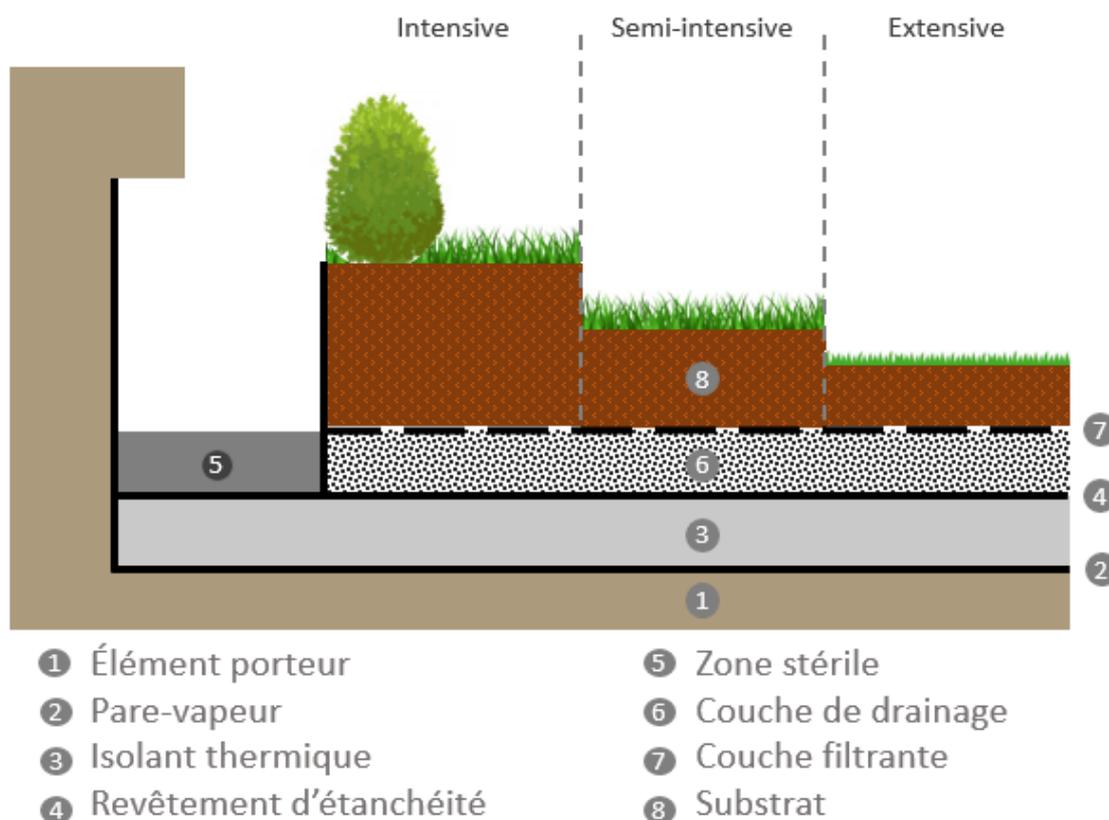


Figure 7 : Coupe d'une toiture stockante végétalisée

Source : Morgane PLANCHETTE, ENCIS ENVIRONNEMENT

Limites et préconisations :

Conception : Les toitures stockantes requièrent une conception très soignée, surtout au niveau de l'étanchéité, par des professionnels qualifiés.

Pour les constructions existantes, la stabilité de la structure à une surcharge pondérale doit être vérifiée.

Les toitures végétalisées doivent être exposées au soleil au minimum quelques heures par jour.

Entretien : La chambre syndicale d'étanchéité préconise deux visites d'entretien annuelles (au printemps et à l'automne) pour veiller au nettoyage des systèmes d'évacuation, notamment. Si la toiture est végétalisée, la végétation doit être entretenue régulièrement (taille, tonte, désherbage, arrosage).

Calendrier : Pas de période d'installation particulière

Coûts : 7-30 € / m² pour une toiture sans végétation (d'après GrandLyon, 2010)

70 à 300 € /m² pour une toiture végétalisée en fonction du type de végétation et de la surface (d'après Maison & Travaux, 2017).

Responsable et intervenants : Maître d'ouvrage – Entreprise spécialisée



*Figure 8 : Toiture stockante à végétation extensive d'une maison individuelle
Source : Sylvain LE ROUX, ENCIS ENVIRONNEMENT*

Création de noues

Impacts potentiels identifiés :

- Ruissellement important des eaux de pluie entraînant une modification du régime des rivières et une pollution des milieux naturels ;
- Augmentation du risque inondation.

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectifs de la mesure :

- Lutter, à l'échelle locale, contre les inondations ;
- Diminuer la pollution des nappes et des cours d'eau ;
- Créer des espaces urbains diversifiés et agréables.

Description :

Une noue est un fossé large et peu profond, avec un profil présentant des rives en pente douce. L'eau y est véhiculée par l'intermédiaire de canalisations, de drains, ou directement par ruissellement sur les surfaces voisines. On distingue deux types de noues en fonction du mode d'évacuation :

- La **noue d'infiltration** : l'eau est évacuée par infiltration directe (annexe 2).
- La **noue de rétention** : la noue doit être raccordée à un exutoire naturel ou artificiel qui permettra l'évacuation de l'eau à débit régulé.



Figure 9 : Noue engazonnée et plantée infiltrante.

Source : Architecture & Climat.



Figure 10 : Noue de rétention imperméabilisée artificiellement, avec massif drainant.

Source : Architecture & Climat.

Les noues permettent le piégeage des polluants au fil de l'écoulement par décantation et « filtration » dans le sol dans le cas d'une infiltration.

Limites et préconisations :

Emprise foncière : L'emprise foncière peut s'avérer importante et onéreuse. Elles pourront toutefois faire partie de l'aménagement d'un espace vert, grâce à leur fonction paysagère.



Figure 11 : Noue paysagère
Source : lyceecfadumene.fr



Figure 12 : Noue plantée, écoquartier Bottière-Chêne
Source : Sylvain LE ROUX, ENCIS ENVIRONNEMENT

Conception : Sur un site pentu, un cloisonnement est à prévoir afin d'optimiser les volumes de stockage.

La noue peut être couplée à une tranchée d'infiltration (voir mesure correspondante) lorsque l'emprise parcellaire est limitée, que les volumes à gérer sont importants ou que le sol est peu perméable.

Végétation : La végétation doit résister aux inondations temporaires. Les plantations (arbres, arbustes, macrophytes (annexe 8)) contribuent à une meilleure infiltration de l'eau grâce à leur système racinaire et peuvent permettre de stabiliser les berges. Les résineux ou les arbres à feuilles pérennes doivent toutefois être privilégiés afin d'éviter le colmatage des ouvrages par les feuilles mortes. Une végétation locale et variée permet le développement de la biodiversité. Certaines zones peuvent être laissées à nu afin de permettre la colonisation spontanée.

Entretien : Un entretien des noues, équivalent à un entretien d'espace vert, doit être régulièrement réalisé afin d'assurer leur bon fonctionnement et de préserver leur aspect esthétique : curage tous les 5 à 10 ans ; ramassage des feuilles et des déchets à l'automne, taille des arbres et arbustes, etc.

Nuisances : Les risques de nuisances olfactives et de prolifération de moustiques sont présents en cas de stagnation d'eau par défaut de réalisation ou manque d'entretien.

Calendrier/période d'intervention : Les travaux doivent être évités lorsque les sols sont humides afin de ne pas modifier leur structure (perte de perméabilité).

Coûts : Le coût d'investissement peut grandement varier en fonction du type de noue (rétention stricte ou infiltration) et des fournitures installées (géo-membrane, enrochement, etc.) : environ 50 à 360 € / ml pour une noue de petite dimension (d'après Bruxelles Environnement, 2010). Plus la noue est longue et plus le prix au ml est faible.

Un financement incitatif peut être accordé, aux collectivités uniquement, par l'Agence de l'Eau en charge du territoire concerné.

Responsable et intervenants : Maître d'ouvrage - Ingénieur Génie civil, paysagiste, architecte

Création d'un bassin sec

Impacts potentiels identifiés :

- Ruissellement important des eaux de pluie entraînant une modification du régime des rivières et une pollution des milieux naturels ;
- Augmentation du risque inondation.

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectifs de la mesure :

- Lutter, à l'échelle locale, contre les inondations;
- Diminuer la pollution des nappes, des cours d'eau et des zones humides ;
- Créer des espaces urbains diversifiés et agréables.

Description de la mesure :

Un bassin sec est une excavation peu profonde à pente douce qui a pour fonction le stockage temporaire de l'eau de pluie. Le bassin se vidange totalement entre deux sollicitations et peut donc être aménagé comme un espace multi-usages (aire de jeu, de détente par exemple). Les bassins secs sont généralement végétalisés et aménagés en espace vert mais le revêtement peut aussi être minéral (pavés à joints infiltrants, pavés poreux, revêtement bétonné, etc.).

L'eau de pluie est collectée par déversement du réseau pluvial (canalisations, noues, rigoles), par mise en charge et débordement du réseau ou par ruissellement direct sur les surfaces voisines. Le bassin sec stocke un évènement pluvieux et permet l'étalement et l'écroulement des eaux pluviales. L'eau est finalement évacuée. On distingue deux types de bassins secs en fonction du mode d'évacuation :

- Le **bassin d'infiltration** : les eaux pluviales sont infiltrées directement sur site après décantation et stockage. L'infiltration est toujours à privilégier lorsqu'elle est possible (annexe 1).
- Le **bassin de rétention strict**: le bassin doit être raccordé à un exutoire naturel ou artificiel qui permettra l'évacuation de l'eau à débit régulé.



Figure 13 : Bassin d'infiltration

Source : Architecture & Climat

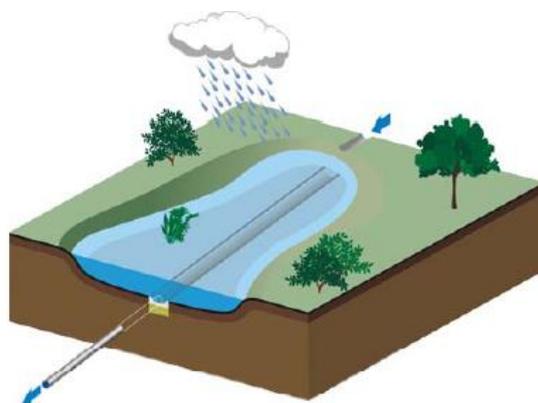


Figure 14 : Bassin de rétention à cunette

Source : Architecture & Climat

Le bassin sec permet une rétention importante de la pollution particulaire par décantation.

Limites et préconisations :

Emprise foncière : L'emprise foncière peut s'avérer importante et onéreuse, le bassin sec est donc plus adapté aux milieux péri-urbains et ruraux. Le caractère plurifonctionnel des bassins permet de rentabiliser le coût foncier.



Figure 15 : Bassin sec aménagé en aire de jeu
Source : confederationconstruction.be



Figure 16 : Bassin sec végétalisé, quartier Courtil-Brecard
Source : Sylvain LE ROUX, ENCIS ENVIRONNEMENT

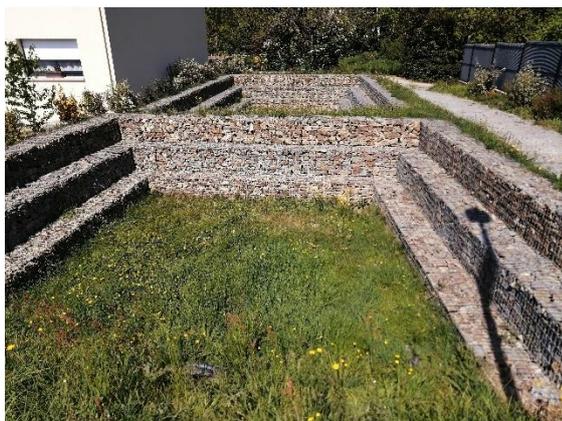


Figure 17 : Bassin sec de rétention de mur de gabion à
Saint-Michel-Chef-Chef
Source : Sylvain LE ROUX, ENCIS ENVIRONNEMENT



Figure 18 : Bassin sec végétalisé, quartier La Bottière-Chênaie
Source : Sylvain LE ROUX, ENCIS ENVIRONNEMENT

Conception : Les pentes doivent être les plus faibles possibles, en fonction de l'emprise disponible, afin d'assurer la sécurité du public, d'améliorer l'intégration paysagère et de faciliter l'entretien (pentes de 25% à 33%).

Végétation : La végétation doit résister aux inondations temporaires et éventuellement permettre l'usage principal du lieu en dehors de ses fonctions hydrauliques. Les plantations (arbres, arbustes, ...) permettent une meilleure infiltration de l'eau grâce à leur système racinaire qui aère la terre et absorbe l'eau. Une végétation locale et variée permet le développement de la biodiversité.

Entretien : L'entretien d'un bassin sec s'apparente à l'entretien d'un espace vert dans le cas d'un bassin sec engazonné ou planté. Afin de favoriser le développement de la biodiversité, une fauche tardive est généralement à privilégier. Dans le cas d'un bassin sec revêtu, un balayage régulier tient lieu d'entretien préventif.

Nuisances : Les risques de nuisances olfactives et de prolifération de moustiques sont présents en cas de stagnation d'eau par défaut de réalisation ou manque d'entretien.

Calendrier/période d'intervention : Les travaux doivent être évités lorsque les sols sont humides afin de ne pas modifier leur structure (perte de perméabilité).

Coût prévisionnel : Le coût d'investissement peut grandement varier en fonction du type de bassin (rétention stricte ou infiltration) et des fournitures à installer (géo-membrane, enrochement, etc.) : environ 120 à 500 €/m³ pour un bassin de petite dimension (Bruxelles Environnement, 2010).

Un financement incitatif peut être accordé, aux collectivités uniquement, par l'Agence de l'Eau en charge du territoire concerné.

Responsable et intervenants : Maître d'ouvrage - Ingénieur Génie civil, paysagiste, architecte



Figure 19 : Bassin d'orage dans un parc, clôture à fermer en cas de risque d'inondation de la zone, Pau

Source : Sylvain LE ROUX, ENCIS ENVIRONNEMENT

Création d'un bassin de rétention en eau

Impacts potentiels identifiés :

- Ruissellement important des eaux de pluie entraînant une modification du régime des rivières et une pollution des milieux naturels ;
- Augmentation du risque inondation.

Type de mesure : Mesure de réduction du risque inondation et pollution de l'eau et mesure de compensation pour la biodiversité

Objectifs de la mesure :

- Lutter, à l'échelle locale, contre les inondations ;
- Diminuer la pollution des nappes, des cours d'eau et des zones humides ;
- Créer des espaces urbains diversifiés et agréables ;
- Renforcer la trame bleue de la démarche TVB.

Description de la mesure :

Un bassin en eau est un bassin présentant une lame d'eau permanente, dont la fonction première est de récupérer les eaux de pluie et de ruissellement. Selon la capacité de stockage nécessaire et l'utilisation souhaitée, le bassin peut devenir une simple mare ou un lac pouvant accueillir des activités nautiques.

L'eau de pluie est collectée par déversement du réseau pluvial (canalisations, noues, rigoles), par mise en charge et débordement du réseau ou par ruissellement direct sur les surfaces voisines. Le bassin en eau stocke un événement pluvieux dans les limites de son marnage et permet l'étalement et l'écrêtement des eaux pluviales. L'eau est restituée vers un exutoire à débit régulé et par évaporation. L'eau peut également être évacuée par infiltration latérale dans le sol par les berges lorsque celles-ci sont perméables au-dessus du niveau de la lame d'eau minimale.

Le bassin en eau permet une rétention importante de la pollution par décantation et par l'action des plantes aquatiques et semi-aquatiques.

Limites et préconisations :

Emprise foncière : L'emprise foncière peut être importante et onéreuse et peut donc s'avérer contraignante en milieu urbain.



Figure 20 : Bassin en eau de Levis (Québec).

Source : lepasseurdelacote.com

Conception : L'usage du bassin et les matériaux des surfaces de ruissellement doivent être compatibles avec les objectifs de qualité de l'eau à garantir, quitte à prévoir un prétraitement éventuel ou un surdimensionnement de la masse d'eau permanente (pour la dilution de la pollution).

Le bassin en eau doit être conçu de sorte qu'il persiste une lame d'eau minimale de 1,5 m afin d'éviter le développement et la prolifération des plantes aquatiques et de limiter le phénomène d'eutrophisation.

Entretien : Un entretien du bassin, de type plan d'eau, doit être régulièrement réalisé afin d'assurer son bon fonctionnement et de préserver son aspect esthétique : curage tous les 5 à 10 ans ; ramassage des flottants, entretien des berges, faucardage des végétaux à l'automne, vidange périodique du bassin pour l'entretien des ouvrages immergés (tous les 10 ans), etc.

Nuisances : Les risques de prolifération de moustiques et de nuisances olfactives existent si la lame d'eau permanente n'est pas suffisamment importante ou si l'entretien est réalisé de façon trop sporadique.

Calendrier/période d'intervention : Les travaux doivent être évités lorsque les sols sont humides afin de ne pas modifier leur structure.

Coût prévisionnel : Le coût d'investissement peut grandement varier en fonction du mode d'imperméabilisation du sol et des fournitures à installer (géo-membrane, enrochement, etc.) : environ 175 à 360€/m³ pour un bassin de petite dimension (d'après Bruxelles Environnement, 2010).

Un financement incitatif peut être accordé aux collectivités uniquement, par l'Agence de l'Eau en charge du territoire concerné.

Responsable et intervenants : Maître d'ouvrage - Ingénieur Génie civil, paysagiste, architecte



Figure 21 : Bassin en eau – La Bottière Chênaie à Nantes
Source : Sylvain LE ROUX, ENCIS ENVIRONNEMENT



Figure 22 : Bassin en eau – La Bottière Chênaie à Nantes
Source : Sylvain LE ROUX, ENCIS ENVIRONNEMENT

Utilisation de revêtements perméables

Impacts potentiels identifiés :

- Ruissellement important des eaux de pluie entraînant une modification du régime des rivières et une pollution des milieux naturels ;
- Augmentation du risque inondation.

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectifs de la mesure :

- Lutter, à l'échelle locale, contre les inondations ;
- Diminuer la dégradation quantitative et qualitative des nappes et des milieux aquatiques ;

Description de la mesure : Le revêtement poreux constitue une solution alternative au revêtement traditionnel imperméable et permet l'infiltration des eaux de ruissellement (annexe 2). Il est constitué de matériaux formant une couche perméable, soit par leur structure propre (porosité), soit par leur mode d'assemblage (joints larges ou perforations).



Figure 23 : Pavés alvéolés
Source : Vivre en ville

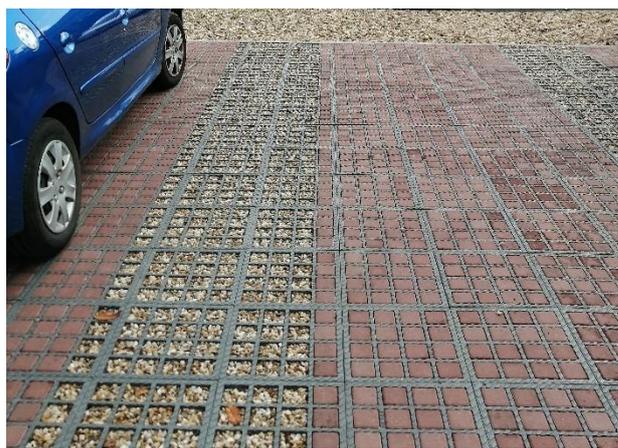


Figure 24 : Parking infiltrant pavé et graviers
Source : Sylvain LE ROUX, ENCIS ENVIRONNEMENT

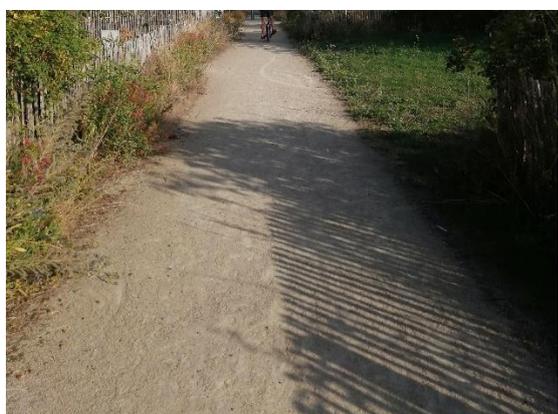


Figure 25 : Chemin en castine perméable pour piétons et vélos
Source : Sylvain LE ROUX, ENCIS ENVIRONNEMENT

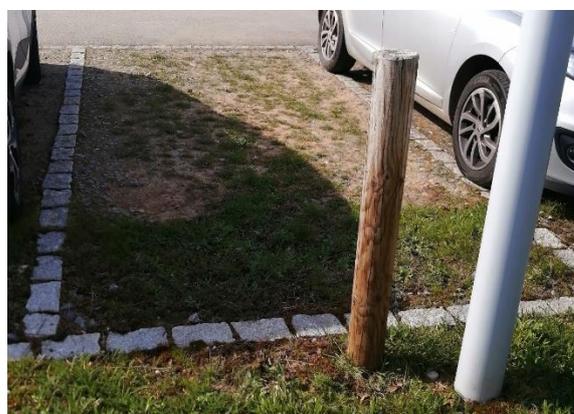


Figure 26 : parking en mélange terre-pierre
Source : Sylvain LE ROUX, ENCIS ENVIRONNEMENT

Le revêtement perméable est composé des éléments suivants (Müller *et al*, 2004) :

- Une couche de fondation qui permet de consolider la surface en fonction des caractéristiques du sol et des sollicitations auxquelles elle sera contrainte. Son épaisseur varie en fonction de ces paramètres. Cette fondation est en matériau filtrant grossier.
- Une couche de réglage qui a pour fonction la mise à niveau de la couche d'usure. Son épaisseur est d'environ 5 cm et elle se compose de gravier de granulométrie 0/30 mm. Cette couche est remplacée par la couche de pose dans le cas des surfaces en pavés ou en dalles perméables. La couche de pose peut être composée de gravillons de granulométrie 0/6 mm (surface pavée) ou des gravillons de granulométrie 3/6 mm (surface en dalles alvéolées). L'épaisseur de cette couche varie entre 3 et 5 cm.
- Une couche d'usure qui correspondant au matériau choisi. Les différents revêtements existants sont décrits dans le tableau ci-dessous.

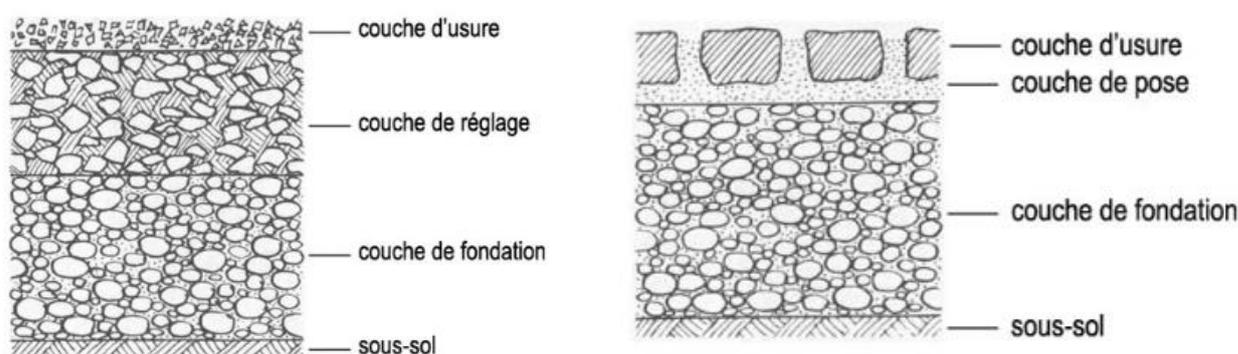


Figure 27 : Coupes de principe pour les revêtements perméables

Source : Müller *et al*, 2004

Revêtement	Description	Utilisation	Entretien	Illustration
Gravier-gazon	Mélange de terre végétale et de gravier	<ul style="list-style-type: none"> • Place de stationnement pour voitures • Cheminement piétonnier • Circulation pour véhicules d'entretien 	Recharge si formation d'ornières	
Gravier concassé stabilisé (chaille)	Matériaux graveleux concassés de granulométrie variable	<ul style="list-style-type: none"> • Espace public • Place de stationnement d'appoint • Cheminement piétonnier ou à charge réduite de véhicules 	Ratissage pour éviter la compaction, recharge périodique	
Gorrh rouge	Matériau issu du concassage de roche granitique (rhyolite) du Beaujolais. Sa couleur rouge apporte une chaleur à la matière	<ul style="list-style-type: none"> • Espaces publics, surface de détente et de sport • Cheminements piétonniers 	Élimination des feuilles mortes et autres déchets verts tombés sur la surface pour éviter le colmatage	

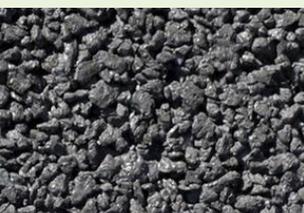
"Stabilizer"	Liant d'origine végétale qui agglomère des matériaux d'origine minérale pour stabiliser une surface tout en garantissant sa perméabilité	<ul style="list-style-type: none"> • Place de stationnement pour voiture • Espace public • Cheminement piétonnier et cycliste • Voie de circulation pour trafic léger 	Entretien moins fréquent qu'un revêtement traditionnel	
Écorces ou copeaux de bois	Écorces plutôt utilisées pour les places, jeux, copeaux pour les chemins	<ul style="list-style-type: none"> • Place de jeux • Cheminement piétonnier, parcours sportif, sentier didactique 	Recharge régulière dans les zones fortement sollicitées	
Dalles alvéolées	Dalles en béton ou en PEBD préfabriquées, ménageant des espaces plus ou moins grands qui permettent la croissance de la végétation	<ul style="list-style-type: none"> • Place de stationnement pour voitures • Voie d'accès pour véhicules du service du feu ou des petits véhicules de transport 	Faible entretien	
Pavés en pierre naturelle ou en béton	Pavés anciens en pierre naturelle, ou plus récents en béton ; espacés pour permettre la croissance de végétaux	<ul style="list-style-type: none"> • Parvis d'église ou cimetière (pavés anciens) • Place, espace public, terrasse, chemin, cour 	Matériau relativement cher à mettre en place, mais très durable	
Béton bitumeux drainant	Enrobé constitué de granularités de 0/10 et d'un liant (bitume)	Autoroutes, routes nationales, voies rapides, etc.	Mouillage/aspiration trimestriel pour prévenir du colmatage	

Tableau 2 : Différents matériaux perméables et entretien

Source : Müller et al, 2004

Limites et préconisations :

De manière générale, les matériaux de revêtement poreux doivent être installés sur un sol relativement plat (pente inférieure à 2,5 %).

Les revêtements perméable de type pavés, dalles et graviers ne doivent être mis en place que pour les voies d'accès et les stationnements à faible circulation car ils sont sujets à la formation d'ornières ou aux déformations.

Le revêtement poreux doit être installé, de préférence, à distance de toute végétation arborée afin d'éviter le colmatage de la structure par les feuilles mortes.

L'utilisation du béton poreux n'est pas recommandé dans les régions sujettes au gel, ce dernier pouvant provoquer des fissures dans le matériau.

Calendrier/période d'intervention : Les travaux doivent être évités lorsque les sols sont humides afin de ne pas modifier leur structure (perte de perméabilité). Les revêtements sont mis en place de préférence à la fin de la phase chantier, lorsque les engins lourds n'utilisent plus les accès.

Coût prévisionnel : Coûts supérieurs de 10 à 15% par rapport à un revêtement conventionnel.

Responsable – Intervenant : Maître d'ouvrage – Architecte – Paysagiste – Ingénieur VRD



Figure 28 : Voirie en grave non traitée pour accéder à une unité de méthanisation et voirie engravillonnée d'accès à un quartier

Source : Sylvain LE ROUX, ENCIS ENVIRONNEMENT

Création de tranchées

Impacts potentiels identifiés :

- Ruissellement important des eaux de pluie entraînant une modification du régime des rivières et une pollution des milieux naturels ;
- Augmentation du risque inondation.

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectifs de la mesure :

- Lutter, à l'échelle locale, contre les inondations ;
- Diminuer la dégradation qualitative et quantitative des nappes et des milieux aquatiques ;

Description de la mesure :

Les tranchées sont des aménagements hydrauliques de faibles largeur et profondeur. Leur fonction principale est la rétention des eaux pluviales et de ruissellement dans le corps de leur structure constituée de matériaux poreux. Elles nécessitent une faible emprise foncière et présentent une bonne intégration dans les aménagements, le long des bâtiments et des voiries (trottoirs ou pistes cyclables) ou en tant qu'éléments structurants de parkings.

L'eau est amenée dans le corps de la structure soit par injection localisée (systèmes d'avaloirs et de drains), soit par infiltration répartie à travers un revêtement poreux en surface. Elle est stockée dans les interstices du matériau de garnissage. Il existe donc deux types de tranchées en fonction du mode d'évacuation de l'eau :

- les tranchées drainantes : l'eau est évacuée grâce à un drain, à débit régulé, vers l'exutoire ;
- les tranchées d'infiltration : l'évacuation de l'eau se fait par infiltration directe dans le sol (annexe 2).



Figure 29 : Tranchée longeant une voie piétonne. Source: gesteau.fr

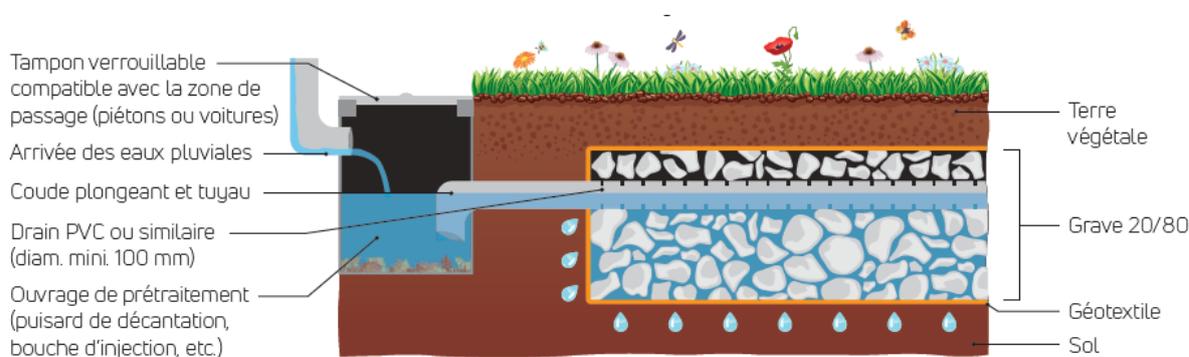


Figure 30 : Coupe longitudinale d'une tranchée en gravier non traitée avec injection localisée

Source : ADOPTA.

Limites et préconisations :

Conception : Cette technique est difficilement applicable sur les terrains à forte pente. Un cloisonnement peut toutefois être prévu afin d'optimiser les volumes de stockage.

La tranchée est constituée d'un matériau poreux (graviers, cailloux, granulats concassés ou galets) de porosité supérieure à 35%, ou de structures préfabriquées de porosité élevée (structures alvéolaires en nid d'abeilles, en casier, etc.).

Une distance de 3 m entre la tranchée et les arbres et arbustes est conseillée afin d'éviter toute dégradation de la structure par les racines. Un système anti-racinaire doit être mis en place si la tranchée se situe à proximité de plantations.

La tranchée d'infiltration peut compléter une noue ou un bassin de rétention lorsque l'emprise parcellaire est limitée, que les volumes à gérer sont importants ou que le sol est peu perméable.

Entretien : Un entretien régulier doit être réalisé afin de limiter le colmatage de la tranchée et des ouvrages associés et ainsi d'assurer leur bon fonctionnement : nettoyage biennuel de l'ouvrage de prétraitement (particulièrement après la chute des feuilles à l'automne) et entretien de la végétation dans le cas des tranchées plantées.

Calendrier/période d'intervention : Les travaux doivent être évités lorsque les sols sont humides afin de ne pas modifier leur structure (perte de perméabilité).

Coût prévisionnel : Le coût d'investissement peut grandement varier en fonction du type de tranchée (infiltrante ou drainante) et des fournitures installées (nature de la garniture poreuse, géotextile, géomembrane, etc.) : environ 300 à 1400 €/m³ d'eau stockée (d'après Bruxelles Environnement, 2010).

Responsable et intervenants : Maître d'ouvrage - Ingénieur Génie civil



Figure 31 : Tranchée d'infiltration de l'écoquartier la Bottière-Chênaie, Nantes
Source : Sylvain LE ROUX, ENCIS ENVIRONNEMENT

Chaussée à structure réservoir

Impacts potentiels identifiés :

- Ruissellement important des eaux de pluie entraînant une modification du régime des rivières et une pollution des milieux naturels ;
- Augmentation du risque inondation.

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectifs de la mesure :

- Lutter, à l'échelle locale, contre les inondations ;
- Diminuer la dégradation quantitative et qualitative des nappes et des milieux aquatiques ;

Description de la mesure :

La chaussée à structure réservoir est un aménagement hydraulique souterrain dont la fonction principale est le stockage temporaire des eaux pluviales dans le corps de sa structure constituée de matériaux poreux. Cette technique présente l'avantage de ne nécessiter aucune emprise foncière supplémentaire mais participe à l'encombrement du sous-sol et réduit les possibilités en termes de réseaux enterrés.

Les eaux pluviales sont injectées dans la structure à travers le revêtement perméable de la chaussée ou, selon la conception, par l'intermédiaire d'un système de drains et d'avaloirs. L'eau s'accumule dans la structure réservoir avant de s'infiltrer lentement dans le sol (annexe 2) ou d'être évacuée vers un exutoire, à débit régulé.

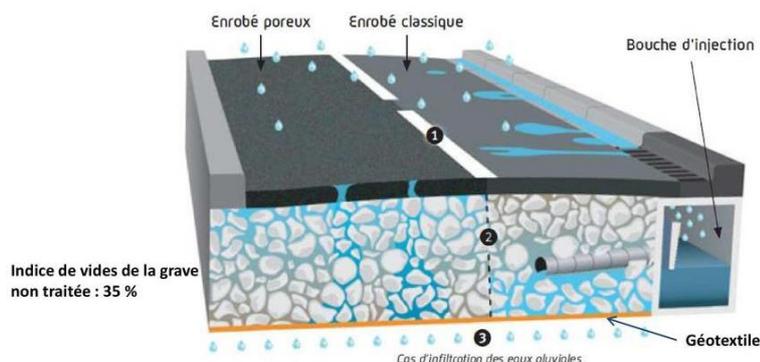


Figure 32 : Chaussée à structure réservoir. Source : Symcea.

Les structures réservoirs d'infiltration sont enveloppées dans un géotextile qui permet de retenir la pollution.

Le corps de la structure est constitué d'un matériau poreux (gravier, cailloux, granulats concassés ou galets) de porosité supérieure à 35%, ou de structures préfabriquées de porosité élevée (structures alvéolaires en nid d'abeilles, en casier, etc.).

Limites et préconisations :

Conception : Les chaussées à structure réservoir ne sont généralement pas adaptées au passage de véhicules lourds. De même, il est déconseillé de les utiliser sur des carrefours giratoires ou sur des zones de manœuvres à forte fréquentation car il y a des risques de formation d'ornières ou de déformation de la chaussée.

Entretien : Les organes d'injection doivent être régulièrement curés afin d'éviter leur colmatage.

Dans le cas d'une chaussée avec revêtement étanche, un entretien par simple balayage suffit.

Les chaussées à revêtement poreux doivent faire l'objet d'une attention plus poussée puisqu'ils peuvent être soumis au colmatage. Le simple balayage doit être proscrit car il peut aggraver ce phénomène par enfouissement des débris dans les pores du revêtement. Un mouillage/aspiration trimestriel sera utilisé en tant qu'entretien préventif.

Calendrier/période d'intervention : Les travaux doivent être évités lorsque les sols sont humides afin de ne pas modifier leur structure (perte de perméabilité).

Coûts : 240 à 290 €/ml pour une chaussée classique et 270 à 450 € HT/ml pour une chaussée poreuse (Grand Lyon économie, 2009).

Responsable et intervenants : Maître d'ouvrage - Ingénieur Génie civil



Source : Sylvain LE ROUX, ENCIS ENVIRONNEMENT

Mise en place d'ouvrages d'interception de la pollution

Impacts potentiels identifiés :

- Ruissellement important des eaux de pluie entraînant une pollution des milieux naturels par charriage de gros débris, matières en suspension et hydrocarbures ;
- Pollution des eaux pluviales lors de leur cheminement dans les canalisations ;

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectif de la mesure : Réduire les apports de polluants avant l'entrée dans le réseau de collecte ou l'ouvrage de rétention

Description :

Dessablage : Le dessableur est un ouvrage dont le but est de séparer des eaux brutes les particules de granulométrie égale ou supérieure à 200 μm , voire 300 μm : les graviers, sables et particules plus ou moins fines. Il est placé en amont d'une structure d'infiltration pour limiter son colmatage ou en amont des réseaux pour les protéger de l'obstruction et de l'abrasion. La séparation s'effectue par réduction de la vitesse horizontale d'écoulement de l'eau qui permet la sédimentation des particules.

Décantation : La décantation a pour but de retenir les matières en suspension de granulométrie comprise entre 50 et 250 μm . La séparation de ces particules permet d'agir plus largement sur les hydrocarbures et les métaux lourds qui sont en grande partie fixés sur les MES. Ce système peut être placé au niveau de l'engouffrement d'une structure de stockage ou d'infiltration. La décantation peut être couplée à une filtration, avec un filtre de type « nid d'abeille » par exemple. Un entretien (curage) et une surveillance réguliers sont nécessaires pour ce type d'ouvrage.

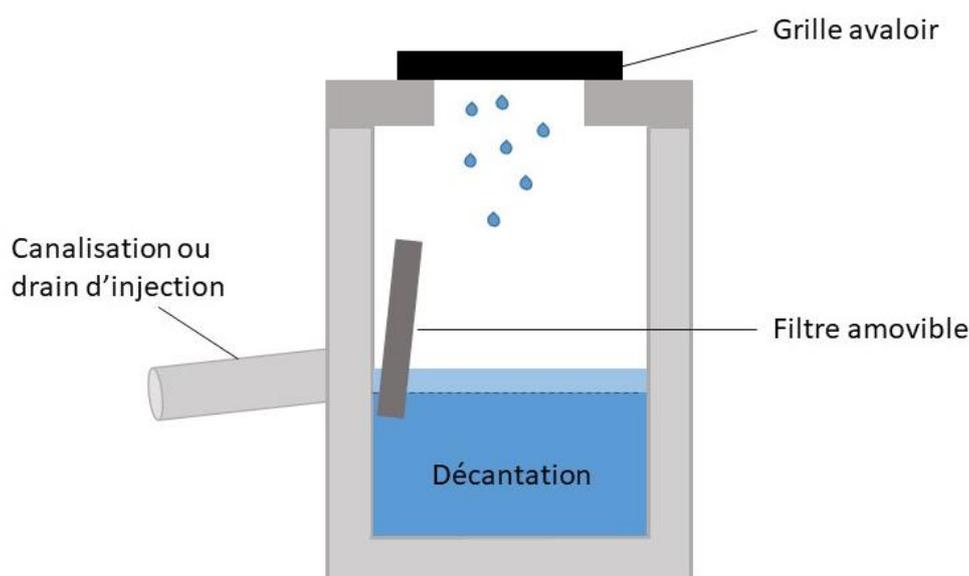


Figure 33 : Dispositif d'engouffrement avec décantation et filtre
Source : Morgane PLANCHETTE, ENCIS ENVIRONNEMENT

Séparateurs d'hydrocarbures : Le séparateur d'hydrocarbures est composé d'un décanteur et d'un déshuileur séparés par une filtre coalesceur qui augmente la surface d'échange et favorise la coalescence des hydrocarbures, c'est-à-dire la réunion des molécules. Ce type d'ouvrage est adapté aux zones à très fort risque de pollution accidentelle.

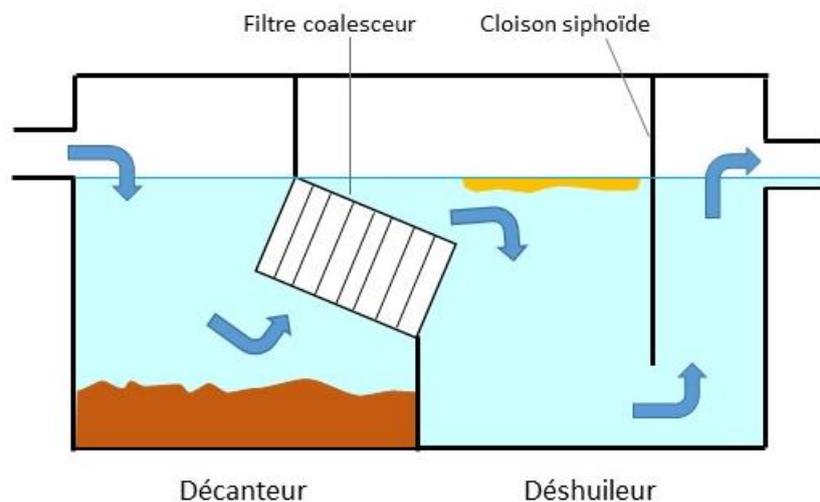


Figure 34 : Schéma d'un séparateur à hydrocarbures

Source : Morgane PLANCHETTE, ENCIS ENVIRONNEMENT

Calendrier/période d'intervention : Pas de période d'installation particulière

Coût prévisionnel : Séparateur à hydrocarbures : 1000 € à 3500 € HT + coût d'installation équivalent (d'après CNIDEP, 2003)

Responsable et intervenants : Maître d'ouvrage - Ingénieur Génie civil

Filtres plantés de macrophytes pour le traitement des eaux usées

Impact brut identifié : Pollution et eutrophisation des cours d'eau par les eaux usées domestiques

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectif de la mesure : Traiter les eaux usées via une méthode d'épuration naturelle

Description de la mesure :

Les aménagements non desservis par le réseau public d'assainissement doivent mettre en place un système d'épuration autonome performant (réglementation présentée en annexe 4). L'épuration par filtres plantés de macrophytes¹ est une méthode d'épuration biologique des eaux usées domestiques, utilisée aussi bien en assainissement collectif qu'en assainissement non collectif.

L'épuration s'effectue lors de l'écoulement des eaux usées à travers un massif constitué de couches de matériaux filtrants de différentes granulométries. Les mécanismes épuratoires mis en jeu sont principalement physiques (filtration, adsorption) et biologiques (dégradation bactérienne). Le traitement biologique des matières organiques est assuré par la biomasse bactérienne fixée sur le matériau filtrant et sur les rhizomes des macrophytes, en condition aérobie².

Le rôle des macrophytes est l'oxygénation du massif, nécessaire à l'activité bactérienne. Les macrophytes développent un système racinaire très dense qui perce et fissure la couche de dépôts accumulés superficiellement ce qui favorise le développement des micro-organismes et prévient de tout risque de colmatage. Les macrophytes utilisés sont généralement des roseaux mais d'autres plantes peuvent être ajoutées telles que les iris des marais, les salicaires, les scirpes, etc. (annexe 8).



Figure 35 : Filtre planté de macrophytes. Source : Terreo

Les filtres plantés sont généralement constitués de deux étages en série. Le 1er étage contribue essentiellement à la dégradation de la pollution carbonée avec un début de nitrification. Le 2ème étage permet d'affiner l'élimination de la fraction carbonée et complète la nitrification.

¹ Végétal aquatique d'eau douce de grande taille

² En présence d'oxygène

Limites et préconisations :

Emprise foncière : L'emprise au sol est importante (2 à 2,5 m² par équivalent habitant, EH).

Implantation : Une étude préalable à la parcelle doit être réalisée afin d'évaluer les contraintes liées à la topographie et à la nature du sol (zone inondable, nappe permanente ou temporaire, dénivelé).

La norme NF DTU 64.1 préconise, pour l'implantation du dispositif de traitement, le respect des distances suivantes : 5 m par rapport à tout ouvrage fondé, 3 m par rapport à toute limite séparative de voisinage, 3 m de tout arbre ou végétaux développant un système racinaire important et 35 m d'un puits ou captage destiné à la consommation humaine. La distance aux ouvrages fondés peut varier en fonction du nombre d'équivalents habitants.

Conception : Des éléments techniques pour la conception des filtres plantés sont décrits en annexe 4.

Entretien : La végétation des filtres doit être régulièrement entretenue avec un désherbage manuel deux fois par an et un faucardage une fois par an. Un curage doit être réalisé tous les 8 à 12 ans.

Performances épuratoires : Les rendements épuratoires sont bons pour la DCO³, la DBO₅⁴ et les matières en suspension mais ce type de traitement ne permet pas la maîtrise de la dénitrification, ni de la déphosphatation.

Calendrier – période d'intervention : Les roseaux sont plantés à l'automne

Coût prévisionnel : 5000€ à 8000€ pour 3 EH

20 000€ à 30 000€ pour 20 EH

Responsable : Maître d'ouvrage

³ Demande chimique en oxygène

⁴ Demande biochimique en oxygène pendant 5 jours

Partie 4 : La biodiversité, le végétal et le paysage dans les aménagements

4.1 Les incidences des aménagements sur la biodiversité et le paysage dans le cadre d'aménagements urbains ou d'infrastructures conventionnels

En tant qu'aspect clé de l'anthropisation des espaces naturels, les projets d'aménagements urbains entraînent une altération, voire une destruction des biotopes et de la biodiversité qui y est liée. Ces impacts peuvent advenir sous différentes formes et au cours des différentes phases de l'existence du projet.

Les **travaux de construction** des voiries, des infrastructures réseaux, des espaces publics et de bâtiments peuvent entraîner :

- Destruction et perte d'habitats,
- Rupture de corridors écologiques,
- Mortalité directe d'individus (destruction de nichées, d'espèces ne prenant pas la fuite, etc.),
- Dérangement de la faune lié à la présence humaine et au bruit des engins,
- Installation d'espèces végétales exotiques envahissantes et/ou d'espèces rudérales,
- Pollution des sols et des eaux entraînant des dommages indirects.

Durant la **phase d'exploitation** d'aménagements urbains (voirie, bâtiments, espaces publics, etc), les incidences sur la biodiversité sont essentiellement dues à :

- Dérangement de la faune lié à la présence humaine,
- Effarouchement de la faune lié aux infrastructures,
- Pollution des sols et des eaux entraînant des dommages indirects,
- Entretien de la végétation défavorable à la faune et à la flore (pesticides, fauche précoce, etc.),
- Mortalité liée à la circulation routière, aux collisions avec les bâtiments,
- Éclairage artificiel perturbant la faune.



4.2 Mesures de préservation de la biodiversité et des paysages

Les mesures présentées dans cette partie balayent toutes les phases d'existence du projet d'aménagement urbain ou d'infrastructure : prise en compte de la biodiversité dans la conception du projet, protection de la faune et de la flore installées pendant la phase de construction, préservation voire favorisation du vivant pendant la phase d'exploitation.

Les mesures traitées dans ce chapitre sont les suivantes :

- ✓ **Conservation des milieux à enjeux**
- ✓ **Préservation du patrimoine arboré**
- ✓ **Élagage raisonné**
- ✓ **Choix d'une période de chantier optimale pour la faune**
- ✓ **Choix d'une période optimale d'abattage des arbres**
- ✓ **Visite préventive de terrain et mise en place d'une procédure non-vulnérante d'abattage des arbres creux**
- ✓ **Plantation de haies bocagères**
- ✓ **Création de passages à faune pour les infrastructures de transport**
- ✓ **Intégration de passages à faune dans les clôtures**
- ✓ **Végétalisation des clôtures, façades et toitures**
- ✓ **Choix d'un revêtement pour les voies vertes favorisant leur intégration paysagère**
- ✓ **Création de refuges et de nichoirs pour la faune sauvage**
- ✓ **Création de mares**
- ✓ **Choix de végétaux locaux pour la constitution des haies et de parterres**
- ✓ **Gestion extensive des espaces verts urbains**
- ✓ **Lutte contre les espèces végétales exotiques envahissantes**
- ✓ **Mise en place d'un éclairage respectueux de la faune**
- ✓ **Limitation de la prédation des chats domestiques sur la faune sauvage locale**
- ✓ **Mise en place d'un conseil local pour la biodiversité**

Conservation des milieux à enjeu

Impact brut identifié : Destruction d'habitats d'intérêt pour la biodiversité

Type de mesure : Mesure d'évitement

Objectif de la mesure : Conserver les milieux à enjeu et la biodiversité associée

Description de la mesure :

Conserver les zones humides

La préservation des zones humides est un des objectifs de la gestion équilibrée de la ressource en eau mentionnés à l'article L.211-1 du code de l'environnement.

Les zones humides, à l'interface entre les milieux terrestres et aquatiques, représentent un enjeu majeur pour la conservation de la biodiversité. En effet, de nombreuses espèces animales et végétales y sont inféodées pour tout ou partie de leur cycle biologique. En outre, elles assurent des fonctions essentielles de dépollution (rétention des matières en suspension et dénitrification des eaux notamment) et contribuent à réguler les débits des cours d'eau et des nappes souterraines.

La régression des zones humides au cours des dernières décennies est telle qu'il convient d'agir afin de restaurer ou de préserver les fonctionnalités de celles encore existantes et d'éviter de nouvelles pertes de surfaces. Les SDAGE mettent ainsi en place des dispositions à l'égard des projets d'IOTA et précisent notamment que les maîtres d'ouvrage de projets impactant une zone humide doivent chercher une autre implantation à leur projet, afin d'éviter la dégradation ou la destruction de la zone humide. Si aucune alternative n'est envisageable, le maître d'ouvrage est dans l'obligation de mettre en œuvre des mesures compensatoires de création ou de restauration de zones humides à la fois :

- Équivalentes sur le plan fonctionnel ;
- Équivalentes sur le plan de la qualité de la biodiversité ;
- Dans le même bassin versant.

Conserver les habitats d'intérêt communautaire

Les habitats naturels d'intérêt communautaire constituent un enjeu fort pour le patrimoine naturel et pour la biodiversité puisqu'ils répondent à un ou plusieurs des critères suivants définis dans la Directive « Habitats – Faune – Flore » :

- Être en danger de disparition dans leurs aires de répartition naturelle ;
- Posséder une aire de répartition réduite par suite de régression ou en raison d'une aire intrinsèquement restreinte ;
- Constituer un exemple remarquable, de caractéristiques propres à une ou plusieurs régions biogéographiques européennes.

Parmi les 231 habitats européens mentionnés, 172 sont présents sur le territoire Français dont 43 sont des habitats prioritaires. Ces derniers sont définis comme tels compte tenu de leur risque élevé de disparition et dont la Communauté Européenne porte une responsabilité particulière vis-à-vis de leur conservation.

Conserver les habitats abritant des espèces patrimoniales/protégées

Certains habitats peuvent représenter un enjeu élevé lorsqu'ils abritent une ou plusieurs espèces patrimoniales et/ou protégées au cours d'au moins une phase du cycle biologique de celles-ci.

La conservation d'un habitat peut être réglementairement obligatoire, notamment lors de l'utilisation de celui-ci par une espèce protégée. En effet, certaines espèces protégées font l'objet d'une interdiction de destruction, d'altération ou de dégradation de leurs sites de reproduction et de leurs aires de repos. Elles sont mentionnées à l'article 2 des textes législatifs pour les groupes suivants :

- Arrêté du 23 avril 2007 fixant les listes des **insectes** protégés sur l'ensemble du territoire et les modalités de leur protection ;
- Arrêté du 29 octobre 2009 fixant la liste des **oiseaux** protégés sur l'ensemble du territoire et les modalités de leur protection ;
- Arrêté du 8 janvier 2021 fixant les listes des **amphibiens** et des **reptiles** protégés sur l'ensemble du territoire et les modalités de leur protection ;
- Arrêté du 23 avril 2007 fixant la liste des **mammifères terrestres** protégés sur l'ensemble du territoire et les modalités de leur protection.

La conservation d'un habitat peut être souhaitée, sans être réglementaire, lorsque celui-ci abrite une biodiversité riche ou constituée d'espèces patrimoniales et/ou protégées. Les espèces dites patrimoniales incluent notamment : les espèces présentant un statut de conservation défavorable selon la liste rouge de l'UICN, les espèces inscrites en annexes de la Directive Oiseaux ou de la Directive Habitat – Faune – Flore, ainsi que les espèces déterminantes de ZNIEFF.

Calendrier : Phase de conception

Coût prévisionnel : Non chiffrable

Mise en œuvre : Maître d'ouvrage



Préservation des arbres d'intérêt majeur pour la biodiversité

Impact brut identifié : Dégradation ou destruction d'arbres d'intérêt pour la biodiversité durant la phase chantier

Type de mesure : Mesure d'évitement

Objectif de la mesure : Conserver les arbres présentant des caractéristiques favorables à la biodiversité

Description de la mesure :

Le patrimoine arboré est une clé de voûte de la biodiversité en milieu urbain. Il convient donc de s'assurer que le projet ne conduise pas à la destruction (coupe ou dégradation accidentelle) d'arbres présentant des caractéristiques (taille, diamètre, âge, essence et présence de cavités) très favorables à la biodiversité. Deux cas principaux peuvent être mis en avant : les vieux arbres isolés et les arbres morts sur pied.

Les vieux arbres isolés constituent un perchoir et une source d'alimentation pour diverses espèces (oiseaux, insectes, etc.) et présentent parfois des cavités naturelles pouvant les abriter. Il convient ainsi de les conserver au mieux. Aussi, afin de protéger ces arbres durant la phase de chantier, une ou plusieurs des actions suivantes peuvent être mises en place :

- La préservation d'une emprise égale à la projection au sol du houppier, voire au double de la projection ;
- La mise en place d'un balisage ou des barrières autour des arbres isolés pour éviter l'écrasement des racines par les engins de chantier ;
- La protection physique du tronc à l'aide de matelas, boudins plastiques, etc.

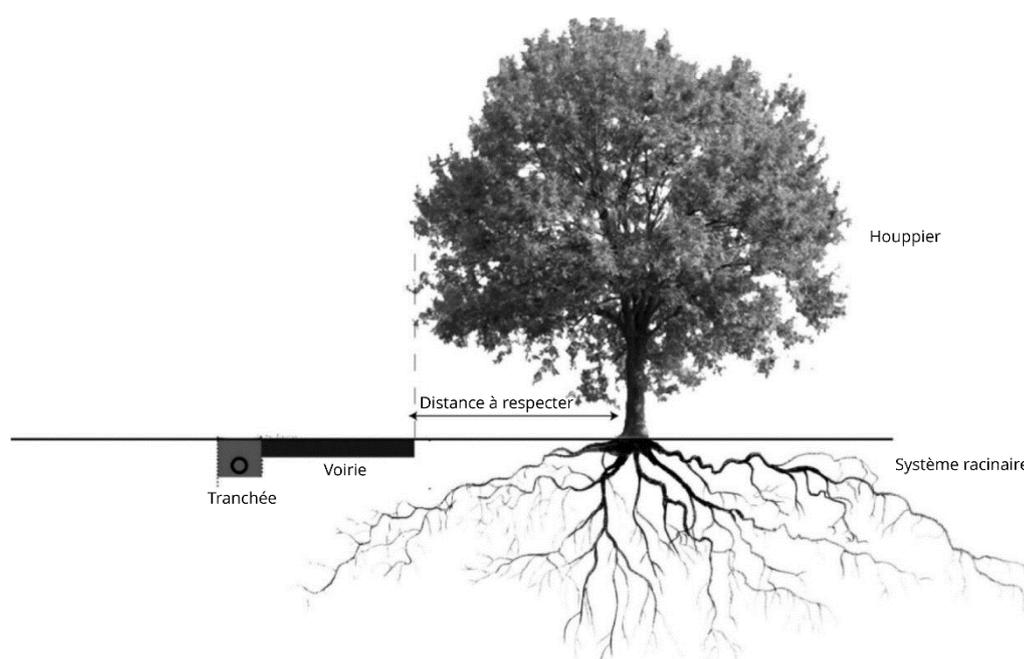


Figure 36 : Recommandation pour l'implantation des pistes et des tranchées

Les arbres morts sur pied représentent une source de nourriture pour divers insectes saproxylophages et un habitat précieux pour de nombreuses espèces (oiseaux, chiroptères micromammifères, insectes, etc.). Si cela ne crée pas de risques liés à la sécurité (effondrement, notamment), les arbres morts peuvent être laissés sur pieds. Dans le cas contraire, les arbres pourront être taillés en chandelle de 6 à 8 m de haut ou abattus par sections. Le bois mort pourra être préservé, de préférence sur le site, et placé à proximité de la végétation existante, loin de sources potentielles de dérangement. Un élagage peut alors être envisagé afin de ne laisser que le tronc et, ainsi, limiter l'emprise au sol.



Figure 37 : Arbre mort taillé en chandelle
Source : onf.fr

Calendrier : Phase de conception et phase de chantier

Coût prévisionnel : Compris dans le chantier

Mise en œuvre : Maître d'ouvrage et maître d'œuvre - Responsable SME du chantier

Élagage raisonné

Impact potentiel identifié : Déséquilibre et dégradation de la silhouette des arbres

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectif de la mesure : Mettre en place un élagage raisonné préservant à la fois la silhouette des arbres et leur santé, pour une meilleure longévité

Description de la mesure : Un élagueur pratiquera une intervention au cœur du houppier de l'arbre, grâce aux techniques de grimpe qui permettent d'explorer l'ensemble de la couronne jusqu'en bout de branche, d'y évaluer les tailles à réaliser, de sélectionner les branches porteuses d'avenir, de soulager les branches charpentières. Il pratiquera un élagage équilibré permettant aux arbres de conserver la silhouette propre à leur essence. Les tailles de grosses sections sont à éviter le plus possible, afin de ne pas fragiliser l'arbre face aux attaques parasitaires (champignons...) qui condamneraient l'arbre à moyen terme.

Calendrier : Pendant le chantier

Coût prévisionnel : Compris dans le projet

Responsable : Maître d'ouvrage - Coordinateur de travaux



Choix d'une période de réalisation des travaux optimale pour la faune

Impact brut identifié : Dérangement de la faune (avifaune, chiroptères, faune terrestre) pendant la période de reproduction, de mise bas et d'élevage des jeunes

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectif de la mesure : Diminuer les impacts du chantier aux périodes les plus importantes du cycle biologique de la faune

Description de la mesure : Durant la phase de travaux, la présence du personnel et des engins de chantier peut engendrer diverses nuisances sur la faune. Les perturbations occasionnées par les travaux peuvent entraîner une mortalité directe (destruction de couvées ou de nichées), une baisse du succès reproducteur, la perte de zones de chasse, voire un abandon temporaire ou définitif du site par les espèces dérangées. Ces risques sont fortement accrus entre début mars et mi-août, soit la période de reproduction de la majeure partie des espèces.

Afin de limiter le dérangement de la faune se reproduisant sur le site, les travaux de construction les plus impactants (notamment le défrichage, la coupe de haie, le terrassement et les VRD, et le génie électrique) commenceront en dehors des périodes de reproduction et d'élevage des jeunes (début mars à mi-août). Ces périodes peuvent varier en fonction des espèces identifiés sur le site.

Si des travaux devaient être effectués en mars ou en juillet, un écologue indépendant serait missionné pour vérifier la présence ou non de nicheurs précoces ou tardifs sur le site. Si des observations le justifient (ex : espèce sensible se reproduisant sur un secteur amené à être impacté), le chantier pourrait alors être reporté.

Calendrier : Début du chantier

Coût prévisionnel : Non chiffrable

Mise en œuvre : Responsable SME du chantier - Maître d'œuvre et Maître d'ouvrage



Figure 38 : Chantier

Source : France-echafaudage

Choix d'une période optimale pour l'abattage des arbres

Impact brut identifié : Dérangement et mortalité des chiroptères arboricoles

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectif de la mesure : Diminuer les impacts du chantier aux périodes les plus importantes du cycle biologique des chiroptères

Description de la mesure : Lorsqu'une phase d'abattage est nécessaire, la période d'hibernation des chiroptères (novembre à mars) est à proscrire. En effet, durant cette période, les individus sont en léthargie tous dérangements peuvent être fatals aux animaux. Il en est de même pour la période de mise-bas et d'élevage des jeunes, s'étalant de mai à mi-août. Pour ces raisons, la meilleure période pour réaliser l'abattage des arbres est entre la fin d'été et l'automne (mi-août à mi-novembre).

Calendrier : Automne de l'année de la phase d'abattage

Coût prévisionnel : Non chiffrable

Mise en œuvre : Responsable SME du chantier – maître d'œuvre et maître d'ouvrage

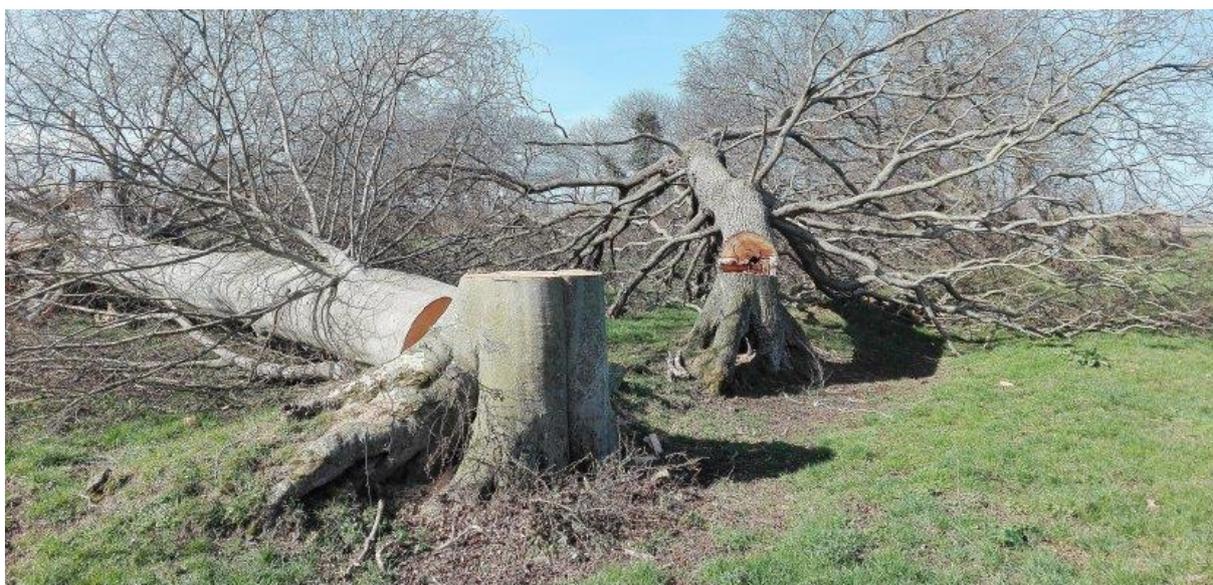


Figure 39 : Arbres abattus

Source : lamanchelibre.com

Visite préventive de terrain et mise en place d'une procédure non-vulnérante d'abattage des arbres creux

Impact brut identifié : Mortalité d'individus lors de la coupe d'arbres creux

Type de mesure : Mesure d'évitement

Objectif de la mesure : Éviter la mortalité des chiroptères gîtant potentiellement dans les arbres à abattre

Description de la mesure : Les coupes d'arbres à cavités peuvent entraîner la mortalité involontaire de chauves-souris gîtant à l'intérieur. Un chiroptérologue réalisera une visite préalable des sujets concernés par le défrichage. En cas de présence d'un ou plusieurs arbres favorables, ils seront vérifiés grâce à une caméra thermique ou un endoscope, afin de tenter de déterminer la présence ou l'absence de chauve-souris. Si des individus sont découverts, plusieurs méthodes peuvent être envisagées afin de leur faire évacuer le gîte. L'une d'entre elle consiste à éviter que les individus continuent à utiliser le gîte. Pour ce faire, en phase nocturne, après la sortie de gîte des individus, les interstices pourront-être bouchés. Ainsi, les individus seront forcés de trouver un gîte de remplacement et leur présence lors de l'abattage des arbres sera évitée. Si les individus n'ont pu être évacués, un chiroptérologue devra assister à la coupe des arbres afin de proposer une coupe raisonnée (maintien du houppier, tronçonnage du tronc à distance raisonnable des cavités ou trous de pics, etc.). Une fois abattus, les arbres présentant des cavités seront laissés au sol plusieurs nuits afin de laisser l'opportunité aux individus présents de s'enfuir. Néanmoins, notons que le maître d'ouvrage devra se tourner vers l'administration en cas de présence d'individu car il pourrait être soumis à une demande de dérogation pour destruction d'espèce protégées.

Calendrier : Visite préalable à la coupe des arbres et lors de la coupe des arbres

Coût prévisionnel : Non chiffrable

Modalités de suivi de la mesure : Mise en place d'un calendrier et d'une procédure d'abattage

Responsable - Intervenant : Responsable SME du chantier – Chiroptérologue

Plantation de haies bocagères

Impact potentiel identifié : Impact visuel du projet

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectif de la mesure : Accompagner visuellement le projet à l'aide de structures végétales et créer des corridors écologiques

Description de la mesure : Les haies peuvent être plantées ou renforcées à l'aide d'arbustes et d'arbres à haute-tige. Les espèces choisies doivent être des essences locales, et au nombre de 4 à 8 idéalement.

Les caractéristiques des plantations sont les suivantes :

- Hauteur des plants : 40 à 60 cm pour les espèces arbustives et 1,50 m pour les arbres
- Protections : pose de filets de protection et paillage pour chaque arbuste
- Garantie des plants : 1 an minimum

L'organisation de la plantation devra faire l'objet d'un plan de plantations préalablement réalisé par un Paysagiste/Écologue concepteur.

Ces haies plantées devront être entretenues :

- 1 passage au printemps suivant la phase de plantation,
- le cas échéant recépage et/ou remplacement des plants n'ayant pas survécu (prévoir un contrat de garantie d'un an minimum),
- 1 passage annuel pour la taille et le dégagement de la végétation herbacée sans recours aux produits phytosanitaires.

Calendrier : Plantation à l'automne - entretien annuel pendant les 5 premières années - entretien biennuel par la suite

Coût prévisionnel :

Coût de plantation : environ 20€/mètre linéaire planté

Coût d'entretien :

- 5 € /mètre linéaire/an pour les 5 premières années

- 2€ /mètre linéaire/an après les 5 premières années

Responsable - Intervenant : Maître d'ouvrage – Paysagiste/Écologue concepteur



Création de passages à faune pour les infrastructures de transport

Impacts bruts identifiés :

- Fragmentation des habitats due aux infrastructures de transport ;
- Mortalité directe de la faune par collision avec les véhicules.

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectifs de la mesure :

- Limiter l'isolement des populations pour enrichir la diversité génétique intra-spécifique ;
- Sécuriser le déplacement des espèces animales entre les différents réservoirs de biodiversité.

Description de la mesure :

Les passages à faune ont pour objectifs principaux de limiter les impacts de la fragmentation écopaysagère des infrastructures de transports et de réduire la mortalité directe liée aux collisions avec les véhicules. Certaines espèces y sont particulièrement sensibles, notamment : les espèces effectuant des migrations quotidiennes ou saisonnières entre des habitats locaux (les amphibiens en particulier), les espèces à petites populations locales possédant de vastes territoires, les espèces se croyant protégées par leur système de défense (carapace, piquants, venin, etc.).

Limites et préconisations :

De manière générale, la mesure est efficace si :

- Les passages sont adaptés au paysage, aux habitats touchés et aux espèces cibles en termes de dimensionnement ;
- La densité et l'emplacement des passages à faune sont adaptés à l'espèce ou au groupe d'espèces cibles et à la répartition des habitats ;
- Un suivi et un entretien réguliers sont assurés afin qu'elle remplisse son objectif sur le long terme ;
- Les passages sont protégés des nuisances visuelles, acoustiques et lumineuses pour les plus grands ouvrages.

Exemples de passages inférieurs :

Les passages à petite faune : ce sont des conduits ou des tunnels rectangulaires d'une largeur de 0,4 à 2 m souvent accompagnés de dispositifs de guidage qui permettent aux petits animaux tels que les amphibiens, les micromammifères, les loutres ou encore les blaireaux de traverser sous la chaussée (description en



Figure 40 : Passage à petite faune

annexe 7).

Les passages hydrauliques : ces ouvrages, qui transportent de l'eau de façon temporaire ou permanente, permettent à la fois le passage de la faune terrestre et de la faune aquatique. Pour la faune aquatique le fil de l'eau doit être continu et la profondeur suffisante. Pour la faune terrestre des

banquettes ou paliers sont aménagés à l'intérieur du passage, le palier le plus haut étant au niveau de la crue annuelle.



Figure 41 : Passage hydraulique. Source : trameverteetbleue.fr

Exemples de passages supérieurs :

Les **ponts verts** ou écoducs : ces solutions sont coûteuses mais efficaces pour réduire les effets de la fragmentation sur les populations d'ongulés et de petits mammifères notamment. Ils sont généralement construits au-dessus de grands axes routiers à trafic dense et rapide ou de lignes ferroviaires à grande vitesse où la mortalité est importante. Les habitats présents de part et d'autre de l'infrastructure doivent être reproduits sur le passage en tenant compte de divers paramètres tels que la végétation, la structure du sol et l'humidité, afin d'assurer la continuité écologique.



Figure 42 : Ecoduc de Singapour. Source : sanspression.fr

Les **passages sur canopée** : ce sont des passages à faune spécifiques aux mammifères arboricoles. Ils sont placés au-dessus des routes à fort et moyen trafic dans des zones boisées très peuplées de martres, écureuils et loirs et où la mortalité est élevée. Ils peuvent être réalisés selon différentes méthodes : cordes tressées, passerelle constituée de deux câbles en acier reliés par un filet, adaptation d'un portique de signalisation d'une autoroute avec une passerelle en bois, etc.

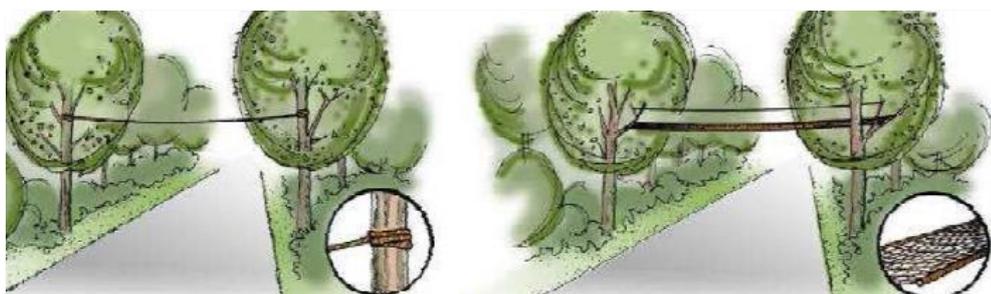


Figure 43 : Schéma de principe de ponts pour les écureuils. Source :

Les **tremplins verts** sont des passages à faune spécifiques pour la faune volante et plus particulièrement pour les chiroptères et les passereaux qui sont régulièrement percutés par les véhicules. Plusieurs types de tremplins verts existent :

- Les tremplins verts basés directement sur des structures arborées hautes et permettant une proximité entre les arbres placés d'un côté et de l'autre de la route ;
- Les tremplins verts accompagnés de palissades obligeant les espèces à augmenter leur hauteur de vol en amont de la traversée de la route. Ces palissades peuvent être en bois ou en grillage (mailles inférieures à 4x4 cm) d'une hauteur de 4 m ;
- Des méthodes d'effarouchement ou d'avertissement plus ciblées sur les chiroptères peuvent être couplées à ces tremplins. L'effarouchement lumineux consiste en la mise en place de projecteurs lumineux directement intégrés au sol avec projection vers le haut permettant d'éloigner les chauves-souris. Des avertissements sonores sont aussi envisageables par le biais des revêtements de voirie granuleux qui génèrent des ultrasons au passage des véhicules et permettent ainsi d'informer les chiroptères de l'approche d'un danger.

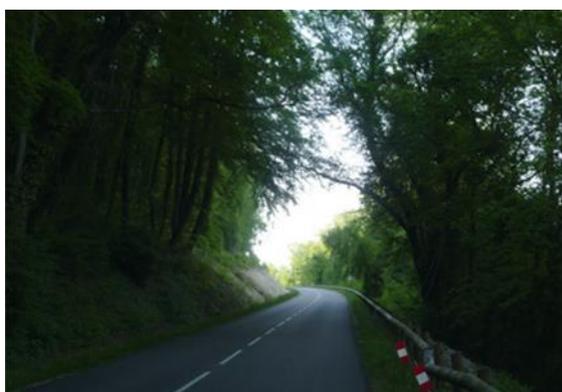


Figure 44 : Voûte arborée maintenue dans le cadre d'un aménagement routier. Source : CEREMA

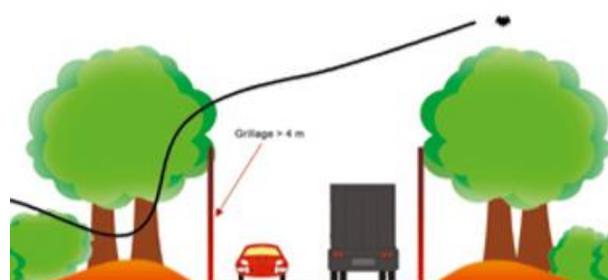


Figure 45 : Tremplin accompagné de palissades. Source : CEREMA

Calendrier : Pas de période particulière

Coûts : Très variables en fonction du type de passage à faune

Responsable : Maître d'ouvrage

Choix de clôtures favorables au passage de la faune

Impact brut identifié : Fragmentation des habitats due à la présence de clôtures infranchissables pour certaines espèces

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectif de la mesure : Limiter l'isolement des populations pour enrichir la diversité génétique intra-spécifique

Description de la mesure :

Les clôtures constituent des obstacles infranchissables pour certaines espèces (particulièrement la faune terrestre) et limitent ainsi les possibilités de déplacement entre les différents réservoirs de biodiversité. Elles participent aussi indirectement à l'augmentation de la mortalité de la faune en contraignant les individus à emprunter des chemins dangereux.

Lorsqu'elles ne sont pas indispensables, les clôtures ne doivent pas être utilisées. Si une délimitation des espaces est nécessaire, les haies variées et composées d'essences locales et les « clôtures vivantes » (en saules tressés, par exemple) sont à privilégier car elles peuvent constituer des zones de refuge et de nourrissage pour la faune.

Lorsque l'installation d'une clôture ne peut pas être évitée, celle-ci doit être conçue afin d'être perméable à la faune. Une des trois mesures présentées ci-après peut être mise en place en fonction des contraintes techniques du projet :

- création d'ouvertures de 40 cm² au niveau du sol tous les 15 m environ,
- jour écologique correspondant à un espace de plusieurs centimètres entre le sol et la base de la clôture,
- grillage à mailles larges (15 cm de côté), au moins en partie basse de la clôture.

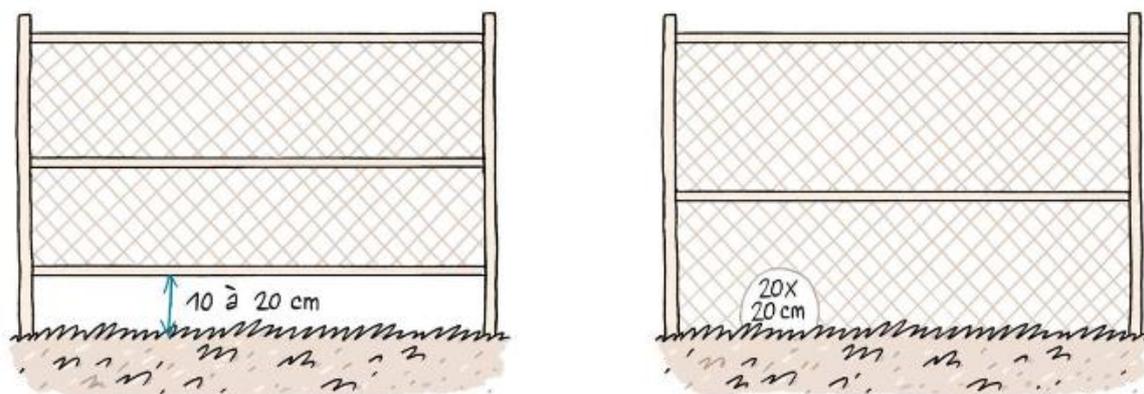


Figure 46 : Exemples de clôtures facilitant la circulation de la petite faune
Source : © Bruxelles Environnement

Calendrier : Pendant la phase de chantier

Coût : Non chiffrable

Responsable : Maître d'ouvrage

Végétalisation des clôtures, façades et toitures

Impact brut identifié : Perte d'habitats et rupture des continuités écologiques

Types de mesure : Mesure de compensation

Objectifs de la mesure : Utiliser des surfaces artificielles stériles pour recréer des habitats

Description de la mesure :

Les murets, les palissades, les clôtures grillagées, façades et toitures sont souvent exempts de toute vie alors qu'ils représentent un enjeu important du fait des surfaces importantes qu'ils occupent et des possibilités qu'ils représentent en termes de support de végétation voire d'habitats. Il convient alors de les transformer en éléments vivants et fonctionnels du réseau écologique.

Les supports végétalisés offrent une source d'alimentation, un refuge, un habitat et un couloir de déplacement aux espèces sauvages. Ils peuvent également permettre d'améliorer le cadre de vie en jouant un rôle de régulateur microclimatique et hydraulique, en captant la pollution de l'air et en réduisant la pollution sonore, ou peuvent simplement être un atout esthétique.

Les séparations vertes

Les haies indigènes et les « clôtures vivantes » constituent les séparations vertes les plus intéressantes pour la faune (cf. mesure passage à faune) mais les clôtures à mailles fines ainsi que les murs et murets préexistants ou indispensables peuvent être végétalisés à l'aide de plantes grimpantes. Les espèces telles que la Clématite des haies, le Pois de senteur, le Houblon, la Capucine grimpante, le Lierre grimpant et le Chèvrefeuille sont adaptées à ce type d'usage. Concernant les murs et les murets, il est possible de prévoir, au moment de leur élaboration ou de leur rénovation, des cavités à intervalles réguliers permettant l'installation de poches de terre où des végétaux rupicoles pourront prendre racine.

Les façades végétalisées :

La façade végétalisée peut se décliner de deux façons possibles. Soit les végétaux évoluent directement sur la façade, souvent aidés d'un support, généralement depuis le sol ou éventuellement depuis des bacs de plantation. Soit les végétaux évoluent sur une paroi séparée de la façade de plusieurs dizaines de centimètres, depuis le sol ou des bacs de plantation. Cette dernière méthode est plus onéreuse en termes de conception et d'entretien mais permet d'obtenir une végétation plus dense et qui peut être appréciée depuis l'intérieur des bâtiments.



Figure 47 : Façade végétalisée avec support. Source : jakob.com

Les toitures végétalisées :

Les toitures végétalisées peuvent accueillir différentes strates de végétation : les toitures extensives sont couvertes de mousses et de plantes rases (sédums, graminées, bulbes) ; les toitures intensives sont conçues comme de véritables jardins et peuvent accueillir des arbustes voire des arbres. Il y a

deux logiques de conception de toiture végétalisée. La première consiste à apporter de nouveaux habitats pour privilégier la diversification des habitats locaux. La seconde logique consiste à reproduire le milieu alentour pour assurer une continuité maximale et remplacer l'espace perdu au sol à cause de la construction. Les toitures végétalisées peuvent également être conçues de manière à stocker temporairement les eaux de pluie et ainsi participer à réduire les risques d'inondation et les îlots de chaleur notamment (voir mesure Toiture stockante).



Figure 48 : Toiture végétalisée extensive. Source : toiture-couvreur.fr

Calendrier : Les semis d'herbacées sont réalisés au printemps et/ou en septembre. Pour les arbres et arbustes, les plantations sont réalisées à l'automne.

Coûts :

- Plantation de haies : 20 à 50€ / ml en fonctions des essences choisies et de la taille de arbustes et des arbres
- Plantation de plantes grimpantes le long des clôtures ou des façades : 5 à 20 € / ml
- Toiture végétalisée : 70 à 300 € / m² en fonction de la végétation
- Support pour végétation : très variable en fonction du type de support (système de câbles, treillage, etc.), du matériau (acier, bois, etc.) et de la charge à supporter

Responsable : Maître d'ouvrage

Choix d'un revêtement pour les voies vertes favorisant leur intégration paysagère

Impact potentiel identifié : Création de voies vertes à l'aspect routier et très artificiel, déconnectées du contexte paysager du lieu

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectif de la mesure : Limiter l'impact visuel des voies vertes

Description de la mesure : Les voies vertes sont des voies exclusivement réservées à l'usage des véhicules non motorisés, des piétons et des cavaliers. Elles sont parfois réalisées à l'aide de revêtements hydrocarbonés (béton bitumeux, asphalte, etc.) peu esthétiques qui s'intègrent mal au contexte paysager local. Afin d'améliorer l'intégration paysagère de ces infrastructures, il est préférable d'utiliser des matériaux de recouvrement d'origine locale et de privilégier une teinte approchant la teinte naturelle du sol en place. Le tableau suivant présente quelques exemples de revêtements adaptés.

	Usagers exclus	Entretien	Durée de vie	Coût (au m ²)	Illustration
Sable stabilisé	Rollers Personnes à mobilité réduite	Désherbage et reprofilage fréquents	Faible	6 à 7 €	
Stabilisé renforcé à la résine	Rollers Personnes à mobilité réduite	Désherbage	Moyenne	25 €	
Enrobé à base de liant végétal	Aucun	Simple balayage	Longue	40 €	
Graves traitées aux liants hydrauliques	Rollers Équestre	Simple balayage	Longue	18 à 20 €	

Tableau 3 : Exemples de revêtements à bonne intégration paysagère

Source : Yvelines Conseil Général

L'intégration paysagère peut également être améliorée à travers la création d'une bande centrale enherbée avec des dalles engazonnées, par exemple.

Coût prévisionnel : Voir le tableau ci-dessus

Calendrier : Mesure appliquée lors de la phase de chantier et maintenue pendant toute la durée d'exploitation.

Période de mise en œuvre des stabilisés : printemps ou automne (période ni trop pluvieuse ni trop sèche).

Période de mise en œuvre des matériaux hydrauliques et enrobés à liants translucides : hors périodes de gel, périodes pluvieuses ou trop sèches.

Responsable : Maître d'ouvrage - Paysagiste



*Figure 49 : Voie verte en stabilisé de l'écoquartier de la Bottière-Chênaie, Nantes
Source : Sylvain LE ROUX, ENCIS ENVIRONNEMENT*

Création de refuges et de nichoirs pour la faune sauvage

Impact brut identifié : Perte d'habitats pour la faune

Types de mesure : Mesure de compensation ou d'accompagnement

Objectifs de la mesure : Augmenter la fréquentation et le déplacement de la faune dans et entre les réservoirs de biodiversité

Description de la mesure :

Les habitats de substitution pour la petite faune :

Diverses solutions existent pour favoriser la présence de petits animaux (reptiles, micromammifères, insectes et autres arthropodes) en milieu urbain et péri-urbain : tas de bois, pierriers et hôtels à insectes. Ces dispositifs sont généralement peu coûteux et ne nécessitent que peu d'entretien. Afin d'être efficaces, tous ces habitats doivent être disposés à proximité d'une zone d'alimentation (prairie fleurie, etc.) et à l'abri du dérangement.



Figure 50 : Hôtel à insectes

Source : jardin-biodiversite.com

Les nichoirs pour oiseaux :

De nombreuses espèces d'oiseaux peuvent potentiellement se reproduire en milieu urbain. Toutefois les niches disponibles sont parfois rares, ceci étant notamment lié à la faible présence de vieux arbres et à la rénovation du bâti. Pour les espèces cavernicoles, la création d'habitats de substitution permettra ainsi de pallier le déficit de cavités au sein du milieu urbain.

Afin de s'assurer d'une efficacité optimale des nichoirs, plusieurs paramètres doivent être pris en compte :

- Choisir des nichoirs faits de matériaux non traités et résistants (sapin, peuplier, châtaignier, etc.), sans colle ni peinture (composés potentiellement toxiques) et éventuellement munis d'une trappe pour l'entretien ;
- Réfléchir à l'orientation, éviter le plein sud et la face aux vents dominants, l'exposition sud-ouest est préférable ;
- Étudier les distances d'installation entre les nichoirs pour les colonies et vérifier que les ressources alimentaires soient suffisantes pour le nombre de nichées potentielles ;
- Adapter la dimension et la forme du nichoir aux espèces cibles détectées (trous ronds d'environ 3 cm pour les mésanges, nichoir semi-ouvert pour le Rougequeue noir et la Bergeronnette grise, etc.) ;
- Choisir, pour certaines espèces, un modèle à balcon qui protège les nichés des prédateurs et des intempéries.

Les gîtes pour les chiroptères :

Au même titre que les oiseaux, de nombreuses espèces de chauves-souris arboricoles et ubiquistes souffrent du manque de disponibilité de cavités en milieu urbain. De plus, les chauves-souris ont besoin de gîtes tout au long de l'année : des gîtes d'hiver dans lesquels elles hibernent et des gîtes d'été dans lesquels elles élèvent les jeunes et s'abritent durant la journée.

Les gîtes de substitution, placés sur les façades des bâtiments ou sur les troncs d'arbre, peuvent permettre de remédier à ce manque d'habitats.

Afin de s'assurer d'une efficacité optimale des nichoirs, plusieurs paramètres doivent être pris en compte :

- Ne pas utiliser de colle ou de peinture pour éviter la présence de substances toxiques ;
- Laisser les surfaces rugueuses à l'intérieur du nichoir et utiliser des planches en bois striées pour permettre aux individus de s'accrocher à l'envers ;
- Placer l'entrée du nichoir en bas, celle-ci doit mesurer au moins 6 cm selon l'espèce de chauve-souris accueillie ;



Figure 51 : Gîte fixé sur un tronc d'arbre

Les pierriers et hibernacula :

Ces aménagements concernent principalement les reptiles mais peuvent également être utilisés par les micromammifères ainsi que les amphibiens. Ils constituent des sites refuges, de reproduction et d'hibernation pour les reptiles et permettent de maintenir/renforcer les populations locales de ce groupe faunistique. Les pierriers sont des tas de pierres posées à même le sol et présentant de nombreux interstices tandis que les hibernacula nécessitent le creusement d'une fosse d'environ 50 cm de profondeur avant la mise en place de branches et de pierres.

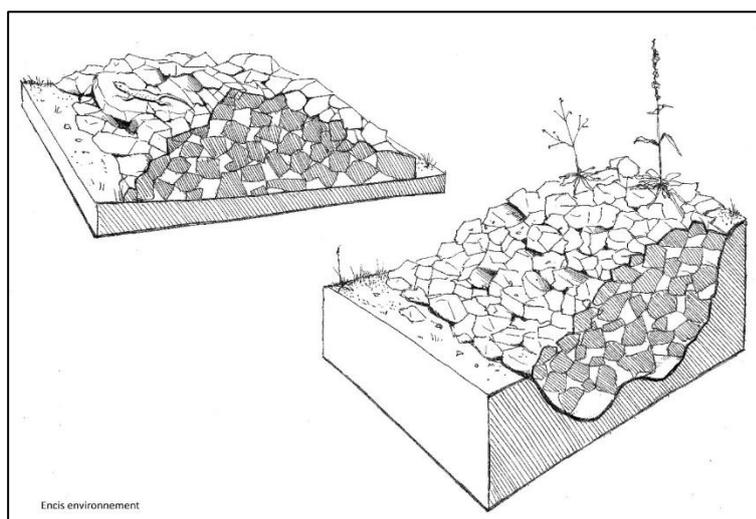


Figure 52 : Schéma de principe d'un pierrier et d'un hibernaculum

Calendrier / période d'intervention : Les hôtels à insectes et les nichoirs peuvent être installés à l'automne. Les gîtes pour les chiroptères sont installés dès la fin de l'hiver.

Coûts :

- Hôtel à insectes : 100 à 300 € pour les grands modèles
- Nichoir en bois ou béton de bois : 8 à 20 €
- Gîte : 8 à 20 € pour un gîte en bois et 25 à 80 € pour un gîte en béton de bois

Responsable : Maître d'ouvrage

Création d'une mare

Type de mesure : Mesure de compensation ou d'accompagnement

Objectif de la mesure : Favoriser la biodiversité se reproduisant et/ou utilisant un point d'eau au cours de son cycle biologique

Description de la mesure :

La création d'une mare fonctionnelle et pérenne permet de favoriser l'apparition d'une faune et d'une flore aquatique diversifiées.

La mare pourra être alimentée par les eaux de pluies, par les eaux de ruissellement du bassin versant, par contact avec la nappe phréatique ou par les eaux de toitures.

Les berges seront en pente douce (inférieure à 45°) avec une profondeur comprise entre 0,8 m et 1 m qui permettra de conserver une lame d'eau plus longtemps en été et d'éviter le gel en hiver. Lorsque la mare est de grande taille, il est possible de créer un profil complexe (contours sinueux en forme de haricot ou de huit) favorable à l'apparition de différents micro-habitats. La mare doit être positionnée dans un milieu ouvert et ensoleillé mais quelques zones d'ombres seront appréciées par certaines espèces.

L'ensemble sera mis en défend afin d'empêcher le piétinement des berges par le public. Une distance minimale de 1,5 m entre le haut des berges et les clôtures est nécessaire afin de permettre la gestion du couvert végétal qui se fera de manière mécanique tous les 3 à 5 ans en fonction de la dynamique de la végétation. L'entretien de la végétation des berges se fera en maintenant une garde au sol de 15 cm afin de préserver la faune terrestre.

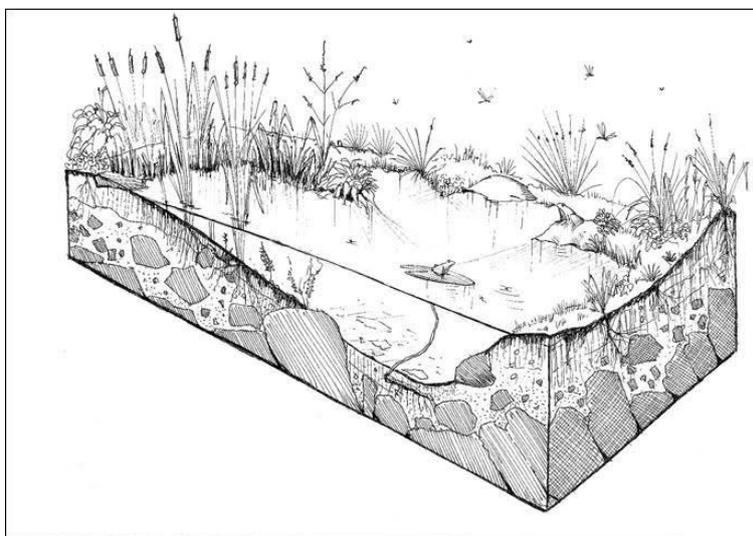


Figure 53 : Schéma de principe d'une mare

Calendrier : Dès la phase préparatoire du chantier et durant toute la durée de vie du projet

Coût prévisionnel :

- création : 900 € / jour

- gestion : 900 € / intervention

Responsable : Maître d'ouvrage - Société en charge des travaux

Compensation de destruction de zones humides

Impact brut identifié : Imperméabilisation de zones humides

Type de mesure : Mesure de compensation

Objectif de la mesure : Compenser l'impact lié à l'imperméabilisation de zones humides

Description de la mesure :

Afin de respecter l'orientation du SDAGE en vigueur, le porteur de projet s'engage à compenser l'atteinte aux fonctions des zones humides, sur une superficie de 1 pour 1. Ainsi, afin d'assurer une contribution équivalente, la compensation sera portée en priorité sur la restauration ou la réhabilitation des zones humides, en termes de biodiversité et de fonctionnalité égales. En l'absence de la démonstration que la compensation proposée apporte une contribution équivalente, la compensation sera effectuée à hauteur de 150 % de la surface perdue. La compensation sera localisée en priorité dans le bassin versant de la masse impactée. En cas d'impossibilité technique, une justification devra être produite.

Les mesures compensatoires concernent prioritairement les opérations de restauration et de réhabilitation des zones humides. La restauration consiste à favoriser le retour à l'état antérieur d'un écosystème dégradé, par le seul jeu d'un abandon ou d'un contrôle raisonné de l'action anthropique. Elle implique que l'écosystème considéré, même s'il est dégradé, soit sur sa bonne trajectoire dynamique et présente un bon niveau de résilience⁵. La réhabilitation consiste à réparer les fonctions endommagées ou bloquées d'un écosystème, pour retrouver la trajectoire dynamique de l'écosystème et un bon niveau de résilience.



Figure 54 : Zone humide restaurée par le SIGAL

Source : alagon-sigal.fr

⁵ Capacité d'un écosystème à retrouver un fonctionnement, un développement et un équilibre dynamique normal après avoir eu une phase d'instabilité engendrée par une perturbation environnementale.

Une convention sera signée avec un propriétaire et le pétitionnaire appliquera sur ces parcelles une mesure consistant à gérer de manière extensive les zones humides sur la durée d'exploitation du projet. Pour la réalisation de cette mesure, le porteur de projet sera susceptible de faire appel à un organisme compétent en matière de gestion de zones humides.

Les opérations de restauration des zones humides sont encadrées par la norme NF X 10-900⁶, à destination de tous les acteurs susceptibles d'intervenir dans la réalisation d'un projet de génie écologique, et dont l'objectif est de définir les méthodes d'interventions sur les zones humides pour une mise en œuvre appropriée aux enjeux et contraintes du territoire.

Calendrier : Mesure à l'issue de la phase de construction ; entretien et plan de gestion sur la durée de l'exploitation.

Coûts prévisionnels :

Acquisition de terrains : 5990 €/ha de terre agricole (moyenne nationale en 2018)

Fauche ou broyage des formations herbacées et semi-ligneuses : 2000 à 5000 €/ha pour des interventions manuelles ou semi-mécanisées et 500 à 1500 €/ha pour une intervention mécanisée (Le Blévec *et al*, 2012)

Pose de clôtures (barbelés, fil électrique, fil lisse) : 6 à 12 €/ml (Le Blévec *et al*, 2012)

Création de mares : environ 2000€ pour une mare de 20m² et 10000€ pour une mare de 100 m²

Abattage d'arbre et d'arbustes : 10 à 40 €/stère pour le bucheronnage et le débardage (Le Blévec *et al*, 2012)

Effacement de drains : 150 à 1500€ en fonction de la largeur du drain

Responsable - Intervenants : Maître d'ouvrage - Organisme compétent

⁶ « Génie écologique, Méthodologie de projet appliqué à la préservation et au développement des habitats naturels, zones humides et cours d'eau »

Gestion extensive des espaces verts urbains

Impacts bruts identifiés : Érosion de la biodiversité occasionnée par des méthodes de gestion destructrices et pollution par les intrants et les pesticides

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectifs poursuivis :

- Préserver la biodiversité des espaces végétalisés ;
- Limiter les pollutions dues aux produits phytosanitaires (herbicides, pesticides) et aux bâches plastiques ;
- Gérer les ressources naturelles : économies d'eau, gestion des déchets verts.

Description de la mesure :

Éduquer les riverains : La gestion différenciée doit nécessairement être accompagnée par une sensibilisation des riverains à la préservation de la biodiversité, notamment pour les inciter à tolérer la végétation spontanée.

Proscrire l'utilisation de produits phytosanitaires : Les pesticides de synthèse sont parmi les causes majeures de l'érosion de la biodiversité et certaines substances sont potentiellement dangereuses pour la santé humaine. Il convient donc de restreindre voire de proscrire leur utilisation. Il existe différentes solutions alternatives à l'utilisation des pesticides comme le désherbage mécanique ou thermique. Si l'usage des produits phytosanitaires est indispensable, les doses et les conditions d'utilisation doivent être respectées, et la pulvérisation par temps de pluie et à proximité de points d'eau ou de bouches d'égout doit être proscrite.

Pratiquer la fauche ou la tonte raisonnées : Les fauches ou les tontes précoces, rases et/ou excessives sont très destructrices pour la biodiversité puisqu'elles entraînent une mortalité directe, une perte de zones de refuge, de nourrissage et de reproduction ainsi qu'une rupture des continuités écologiques. La tonte sera idéalement réalisée à 10 cm de hauteur pour préserver la faune qui vit au pied des plantes ainsi que les rosettes de certaines plantes. Les zones plus fréquentées ne seront tondues qu'une fois par mois. Certaines zones enherbées ne seront fauchées qu'une à deux fois par an (après le 14 juillet et/ou après le 15 septembre) pour préserver la faune. Toute la végétation ne sera pas fauchée en même temps afin de préserver des zones refuges nécessaires à la faune et de permettre à un maximum d'espèces de terminer leur cycle biologique.

Économiser l'eau : L'arrosage en période de sécheresse doit être proscrit. Il est préférable d'arroser tôt le matin ou le soir (avant 11h et après 17h) afin d'éviter les pertes d'eau par évaporation directe.

Pailler les parterres et les plantations : Le paillage est une solution alternative à l'utilisation de bâches qui permet de limiter les arrosages et de favoriser l'activité microbologique du sol en maintenant certains paramètres pédologiques tels que l'humidité et la température. Le paillage est également efficace pour réduire le désherbage car il empêche la germination des plantes adventices en bloquant l'arrivée de la lumière à la surface du sol. Finalement, il peut servir de refuge à de nombreux insectes

durant l'hiver. Le paillage s'applique en couche épaisse en été, lors des épisodes de sécheresse, et à l'automne, toujours sur sol humide. Il est retiré au printemps pour éviter la prolifération des parasites.

Pratiquer l'éco-pâturage : L'éco-pâturage est une solution écologique et naturelle afin d'entretenir un espace vert à l'aide d'ovins, de caprins ou d'autres petits herbivores. L'éco-pâturage permet notamment de réduire la quantité de déchets verts, de remplacer l'utilisation de tondeuses plus destructrices et de gérer des terrains accidentés sur lesquels la fauche est irréalisable. Il faut toutefois veiller à pratiquer un pâturage extensif : la pression de pâturage ne doit pas être trop élevée au risque de voir disparaître certaines espèces végétales et les espèces animales associées. La planification spatiale et temporelle du pâturage est donc un élément essentiel pour le maintien de la biodiversité et plus encore des espèces sensibles à forte valeur patrimoniale. Lorsque la fauche tardive est possible, elle peut être préférable au pâturage pour favoriser la biodiversité.



Figure 55 : Eco-pâturage en Bretagne

Source : ecopaturebreizh.fr

Planter des végétaux locaux : Il est préférable d'utiliser des plantes locales, adaptées à l'environnement dans lequel elles seront plantées. Elles demanderont généralement moins d'eau et d'entretien que la majorité des espèces exotiques et autres variétés horticoles.

Calendrier : Tout au long de la phase d'exploitation

Coût prévisionnel : Non chiffrable

Responsable – intervenant : Maître d'ouvrage – Société de gestion des espaces verts

Privilégier les végétaux locaux et la diversité des espèces plantées

Impact brut identifié : Destruction d'arbres, arbustes et herbacées indigènes favorables à la biodiversité

Type de mesure : Mesure de réduction et/ou de compensation

Objectifs poursuivis :

- Favoriser la biodiversité et préserver un biotope existant ;
- Lutter contre l'expansion des espèces végétales exotiques envahissantes.

Description de la mesure :

Il est préférable de favoriser le développement de la flore sauvage spontanée et d'apporter des espèces locales ou rustiques déjà présentes dans les habitats naturels alentours, adaptées aux conditions climatiques et pédologiques.

Certaines essences sont à privilégier pour leur caractère nourricier et pour les refuges potentiels qu'elles peuvent offrir à la faune : le Chêne pédonculé possède une écorce épaisse qui peut abriter de nombreux insectes, le Sureau noir produit de nombreuses baies appréciées des oiseaux frugivores, le Saule marsault est un arbre mellifère qui attire de nombreux pollinisateurs, etc. Les essences les plus favorables à l'avifaune et à l'entomofaune sont listées en annexe 6.



*Figure 56 : Fauvette sur Sureau noir
Source : oiseaupapillonjardin.fr*

Concernant les herbacées, de nombreuses espèces locales peuvent apparaître de manière spontanée, d'autres peuvent être semées. En général, ces plantes ne nécessitent pas ou peu d'entretien ou seulement pour limiter une colonisation trop importante. Bon nombre de ces plantes communes sont mellifères et attirent toutes sortes d'insectes pollinisateurs (annexe 5).

Les plantes rustiques, vivaces et cespiteuses (qui ne drageonnent pas) sont à privilégier pour limiter l'entretien.

Calendrier : Les semis d'herbacées sont réalisés au printemps et/ou en septembre. Pour les arbres et arbustes, les plantations sont réalisées à l'automne.

Coût prévisionnel : Non chiffrable

Responsable – intervenant : Maître d'ouvrage - Paysagiste

Lutte contre les espèces végétales exotiques envahissantes

Impact potentiel identifié : Dispersion d'espèces végétales exotiques envahissantes (EVEE) qui appauvrissent les milieux et concurrencent les plantes indigènes

Types de mesure : Mesure de réduction

Objectifs poursuivis : Préserver la diversité floristique autochtone et la faune associée

Description : Les travaux induisant un remaniement des terrains naturels sur des zones envahies ou à proximité de zones envahies par les EVEE⁷ sont souvent à l'origine de la dissémination de ces dernières. De plus, une grande majorité des espèces envahissantes colonisent des milieux naturels dégradés par les activités humaines. Les actions de lutte contre les EVEE doivent donc être menées durant la phase chantier et la phase d'exploitation et certaines précautions doivent être adoptées même lorsque la zone n'est pas colonisée.

Cette mesure est en accord avec les objectifs des SDAGE concernant le contrôle des espèces invasives.



Figure 57 : Exemples d'espèces exotiques envahissantes : *Ludwigia grandiflora*, *Ambrosia artemisiifolia*, *Symphyotrichum* sp.

Source : Centre de ressources EEE

⁷ Le Centre de Ressources EEE regroupe les listes d'espèces exotiques envahissantes de chaque région.

Préconisations :

Dans les secteurs non colonisés :

- Ne pas utiliser de terre exogène pour réaliser des aménagements afin de limiter le déplacement de ces espèces (fragments de rhizomes, morceaux de tiges et graines sont susceptibles de recréer de nouvelles colonies) ;
- À proximité d'espaces envahis, éviter les travaux et les activités aboutissant à une destruction complète ou partielle de la couverture végétale. Un sol nu est plus facilement colonisé par des plantes envahissantes ;
- Si des chantiers sont prévus, baliser systématiquement les stations d'espèces envahissantes les plus proches et former le personnel sur les précautions à prendre.

Sur les secteurs déjà envahis :

- Intervenir le plus précocement possible (une fois l'identification de l'espèce confirmée) avant que la population ait le temps de s'étendre, notamment avant la période de floraison ;
- Préférer les techniques d'arrachage manuel, toujours plus efficaces et plus précises, lorsque la surface envahie n'est pas trop importante ;
- Après un chantier d'éradication d'EVEE, nettoyer systématiquement tout le matériel d'intervention, qu'il s'agisse du petit matériel (gants, bottes, râpeaux) ou des engins mécaniques (roues comprises) utilisés pour l'arrachage et le fauchage ;
- Exporter les végétaux fauchés ou arrachés dans des bennes de transport bâchées afin d'éviter la dissémination de graines ou de boutures ;
- Neutraliser les produits d'exportation (brûlage en conditions contrôlées, dépôt en déchetterie).

En fonction de l'espèce responsable de l'invasion et de ses impacts avérés ou potentiels, différentes méthodes d'intervention sont préconisées. Pour être efficaces, ces techniques tiennent compte de l'écologie de la plante, et en particulier de son mode de dissémination.

Types d'intervention pouvant être engagés dans la lutte contre les plantes envahissantes :

L'élimination

Pour les plantes produisant des rhizomes (organes de réserve souterrains de certaines plantes vivaces), l'arrachage manuel ou mécanique est le moyen le plus courant. Il est efficace surtout en début d'invasion. Lorsque les populations sont encore peu étendues, un arrachage soigneux et systématique visant à éradiquer la plante devra être entrepris rapidement dès la détection. Il faudra veiller en particulier à extraire les parties souterraines et à éviter la dissémination de fragments de tiges ou de rhizomes. La surveillance des zones infestées est nécessaire et peut orienter vers une reconduction de l'opération.

La gestion

La gestion s'opère dès lors que les plantes envahissantes sont bien implantées et nuisent à l'écosystème ou aux usages. Elle permet de limiter la population et la colonisation de nouveaux sites.

Des fauches (ou broyages) répétées plusieurs fois par an (jusqu'à 10 fois/an) feront diminuer la vitalité des populations et à terme les feront régresser. Une fauche avant maturation complète des semences est un moyen efficace de lutter contre la dissémination de certaines espèces.

La renaturation du milieu

La renaturation d'un milieu naturel doit être envisagée lorsque sa dégradation (le plus souvent du fait d'activités anthropiques) a entraîné sa colonisation par des plantes envahissantes et ce, sur de très grandes surfaces. Cette renaturation consiste à exporter l'ensemble de la station de l'espèce envahissante (système aérien et racinaire) et à recréer un milieu naturel à base d'espèces végétales indigènes. Souvent coûteux, ces travaux de renaturation nécessitent des moyens matériels importants. Un suivi doit être engagé plusieurs années après les travaux pour éradiquer d'éventuelles repousses et permettre le développement de la flore autochtone.

La surveillance

Préalable à la gestion des espèces invasives, la surveillance permet d'anticiper et d'intervenir le plus tôt possible sur les nouveaux foyers de dissémination d'espèces envahissantes.

Intervenants : ces chantiers peuvent être engagés par les services techniques de la commune ou par une entreprise spécialisée dans la gestion des espaces naturels

Coûts : Non chiffrable

Calendrier : Phase chantier et phase d'exploitation

Responsable – intervenant : Maître d'ouvrage – société en charge des travaux – entreprise spécialisée dans la gestion des espaces naturels pour les campagnes d'éradication

Mise en place d'un éclairage respectueux de la faune

Impacts bruts identifiés :

- Nuisances pour les espèces nocturnes ;
- Désorientation des espèces migratrices se repérant grâce aux étoiles ;
- Perturbation de certaines espèces diurnes.

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectif poursuivi : Réduire les nuisances des éclairages envers la faune

Description de la mesure :

L'éclairage nocturne engendre des nuisances connues chez l'homme (perturbations du sommeil, éblouissement direct), ainsi que chez de nombreuses espèces animales nocturnes et diurnes. Le dérangement est direct pour les chauves-souris et les oiseaux nocturnes qui sont adaptés à vivre dans l'obscurité. Pour les oiseaux migrateurs, la nuisance est davantage liée à la luminosité globale de la ville la nuit, qui favorise la collision des oiseaux avec les bâtiments et les empêche de repérer les étoiles avec lesquelles ils s'orientent. Les oiseaux diurnes sont également touchés par l'éclairage urbain, leurs cycles journaliers étant basés sur le modèle d'alternance jour/nuit. Enfin, les insectes voient leurs populations fortement impactées par les éclairages nocturnes qui constituent des pièges autour desquels ils s'épuisent et sont plus facilement prédatés.

L'éclairage nocturne doit donc être pensé afin d'assurer son rôle sécuritaire tout en impactant le moins possible les espèces qui y sont sensibles :

- Éviter l'installation de nouveaux points lumineux, en particulier à proximité des espaces naturels et semi-naturels (cours d'eau, zones humides, espaces forestiers et bocagers) peu ou pas éclairés ;
- Éviter toute diffusion de lumière vers le ciel en dirigeant les rayons du haut vers le bas. Des dispositifs de canalisation des faisceaux lumineux permettent de diriger les rayons uniquement là où ils sont nécessaires. Dans la mesure du possible, le luminaire doit être choisi avec un ULOR (proportion de flux lumineux qui est émis au-dessus du plan horizontal) de 0% en position d'installation.

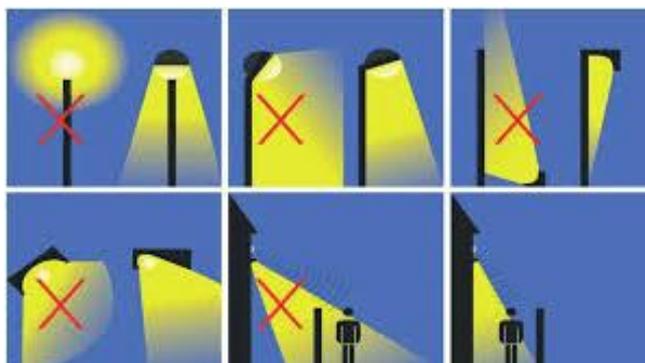


Figure 58 : Bonnes pratiques d'éclairage

Source : biodiversité.wallonie.be

- Limiter le temps d'éclairage au moyen de minuteries ou de détecteurs de mouvements, notamment ;
- Réguler le niveau d'éclairage et le flux de lumière en fonction des usages avec un appareillage intégré (gradation et régulation avec gestion à distance), ou utiliser le bafflage interne qui oriente la lumière verticalement pour limiter le halo lumineux et l'éblouissement des animaux et des passants ;
- Choisir une ampoule efficace, adaptée à l'usage, émettant uniquement dans le visible, si possible de teinte ambrée. Par exemple, les ampoules à vapeur de sodium n'émettent pas d'UV et leur lumière orange-jaune a moins d'impact sur la faune (moins d'attraction pour les insectes notamment) ;
- Privilégier un revêtement de sol sombre et non réfléchissant.

Calendrier : Tout au long de la phase d'exploitation

Coût : Non chiffrable - Pas de surcoût par rapport aux éclairages conventionnels

Responsable : Maître d'ouvrage

Limitation de la prédation des chats domestiques sur la faune sauvage locale

Impact brut identifié : Pression de prédation importante par les chats qui participe au déclin des populations animales en milieu urbain

Type de mesure : Mesure de réduction

Objectifs de la mesure :

- Favoriser le développement de la petite faune sauvage en ville (oiseaux, petits mammifères, reptiles) ;
- Limiter les prélèvements d'individus jeunes ou fragiles vulnérables dans les populations d'oiseaux déclinantes et menacées en ville.

Description de la mesure :

Les chats domestiques sont omniprésents en ville, notamment dans les quartiers résidentiels comprenant des habitations individuelles. L'estimation du nombre de chat au km² en ville peut approcher les 250 individus contre une quinzaine en campagne. Le chat est un prédateur non-natif redoutable qui fait de nombreuses victimes auprès des oiseaux, des chiroptères et des reptiles notamment. D'après la LPO, le nombre d'oiseaux tués par des chats, en France, en un an, peut être estimé à 75 millions (par extrapolation).



Figure 59 : Chat tenant un chardonneret

Source : A.J. CASSAIGNE

Des campagnes de sensibilisations peuvent être menées auprès des propriétaires de chats pour qu'ils mettent en place certaines mesures simples limitant la prédation.

Conseils prodigués par la LPO à communiquer aux habitants :

Aménager son jardin avec des zones de refuges : une zone de hautes herbes, un muret en pierres sèches ou une haie sont autant de refuges potentiels pour la petite faune qui pourra s'y replier en cas de danger. Aussi, les mangeoires et les nidoirs doivent être disposés de manière à être inaccessibles pour les chats.

Limiter les sorties du chat en période à risque : en période de conditions climatiques rudes (épisode prolongé de froid ou de pluie), en période de sortie du nid par les jeunes ou en votre absence, il est préférable que le chat soit confiné.

Éviter de nourrir les chats en extérieur : l'alimentation extérieure favorise l'immigration de nouveaux chats, parfois même l'abandon de chats dans ces zones ;

Maîtriser les populations de chats : la présence de chats errants (miaulant, maigres, qui semblent perdus ou en mauvaise santé), doit être notifiée à une association locale de défense et de protection des chats. Celle-ci pourra prendre en charge l'animal (capture, nourrissage, soins, stérilisation et adoption) ;

Équiper le chat d'un collier : deux clochettes peuvent être disposées de part et d'autre du collier. Le tintement signale la présence du chat à la petite faune, et particulièrement aux micromammifères. Il existe également des collerettes de couleurs vives qui fonctionnent comme des avertisseurs visuels pour les oiseaux ;

Assurer une alimentation de qualité, en libre-service : en garantissant une alimentation aux textures variées et de qualité, en libre-service, les chats n'auront pas besoin de pallier le manque de ressources alimentaires et limiteront leurs activités de chasse ;

Stériliser son chat : cette action est préconisée par de nombreuses associations de protection de la nature, des associations de protection des animaux et les vétérinaires. Elle permet de limiter la prolifération des chats, de stopper les naissances non souhaitées et donc les abandons ;

Stimuler son chat : le jeu permet d'extérioriser l'instinct chasseur du chat. Le propriétaire peut mettre à disposition des petits jouets, un arbre à chat, un casse-tête alimentaire, etc. ;

Ne pas abandonner son chat dans la nature : en période de départ en vacances, le chat peut être confié à des voisins ou mis en pension. Si le propriétaire ne peut plus assumer la garde de son chat, il peut le placer auprès d'une association de défense et de protection des chats.

Calendrier : Pas de période particulière

Coûts : Non chiffrable

Responsable : Riverains

Mise en place d'un Conseil local pour la biodiversité

Type de mesure : Mesure de compensation

Objectifs de la mesure : Éduquer et faire participer le grand public à la préservation de la biodiversité

Description de la mesure :

Afin que les pratiques de renforcement de la biodiversité persistent et que de nouvelles idées puissent émerger, il s'avère primordial de dynamiser le dialogue avec le grand public en ce sens. Pour cela, il est possible de réunir un conseil local pour la biodiversité comme cela a déjà été fait à Nantes et à Rennes par exemple.

Un tel conseil local aurait pour vocation d'être un lieu de veille et d'alerte des élus, notamment dans la perspective de mieux intégrer la biodiversité dans les documents d'urbanisme. Il constituerait un lieu d'échange, de concertation et valorisation pédagogique pour but de sortir la biodiversité du monde des experts et de mettre en avant la « proximité » de la nature dans les espaces urbains.

Le Conseil pourrait regrouper des experts, des associations locales, des représentants de la ville. Son but serait de partager des connaissances, réunir des compétences variées – profils de techniciens, d'urbanistes ou d'experts naturalistes locaux – et croiser l'expertise afin de bien conseiller les élus dans leurs choix stratégiques et ainsi donner du poids à la biodiversité dans les politiques de la ville.

Il est également possible de réunir des conseils à différentes échelles : quartier, zone ou ville.

Ce Conseil serait également un moyen pour développer des campagnes d'information de la population pour inciter celle-ci à agir concrètement et à petite échelle en faveur de la biodiversité locale, voire pour aider les habitants financièrement dans leurs actions.

Calendrier : Réunions 4 fois par an

Coûts : À titre indicatif, le budget annuel pour la ville de Rennes est de 30.000€.

Responsable : Riverains



Figure 60 : Conseil en pleine nature

Partie 5 : L'énergie et la construction durable

5.1 Les défis énergie/climat et le cadre réglementaire

5.1.1 Les défis énergétiques globaux

Le charbon, le pétrole et le gaz sont actuellement les ressources les plus utilisées dans le monde et couvrent **plus de 80 % des besoins mondiaux** en énergie, loin devant le nucléaire ou les énergies renouvelables.

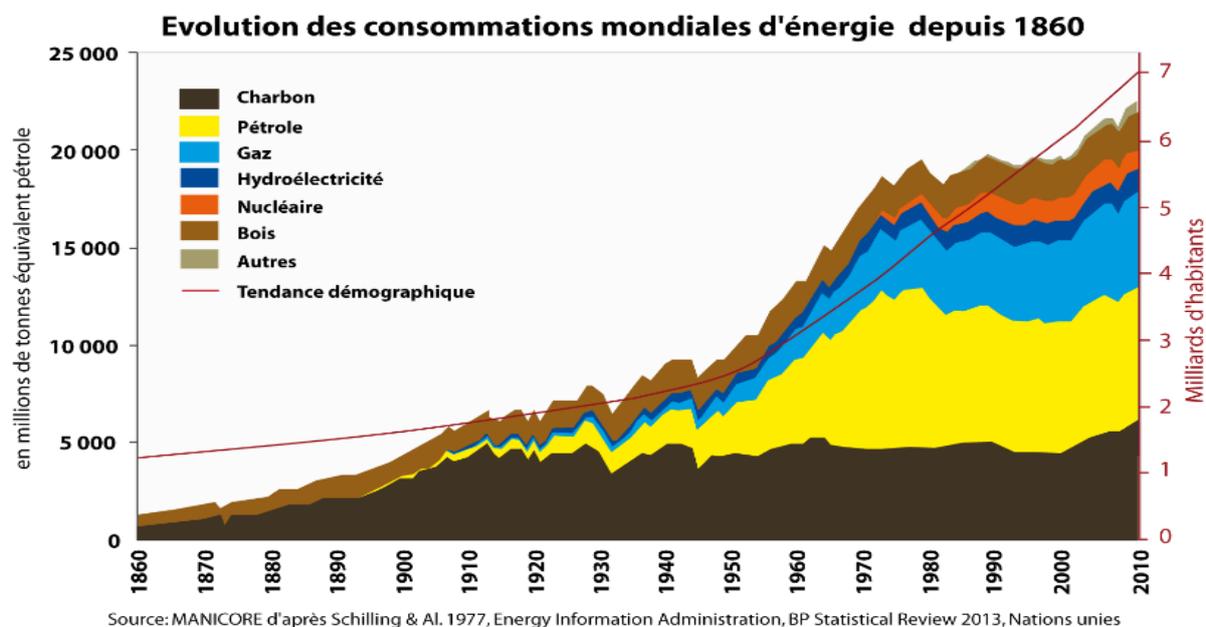


Figure 61 : Evolution des consommations d'énergie mondiale

Or, l'augmentation conjointe des besoins en énergie et de la population mondiale accélère leur épuisement. Malgré les controverses sur les quantités restantes, l'épuisement des stocks fait consensus. Selon BP, un groupe énergétique international, les **réserves prouvées correspondent à l'équivalent d'environ 50 ans de pétrole ou de gaz**.

Concernant le pétrole, par exemple, le pic des découvertes a été atteint en 1965.

Après le pic des découvertes devrait s'en suivre, à l'horizon 2025 d'après certains experts, le pic pétrolier.

Une fois que le pic sera atteint, l'écart entre l'offre et la demande s'élargira constamment et le prix se mettra par conséquent à augmenter de façon brutale. La question n'est donc finalement pas de savoir pendant combien de temps dureront les réserves de pétrole et de gaz, mais plutôt de savoir **comment s'adapter, à court terme (10-20 ans), à une énergie dont la rareté amène les prix à être de plus en plus élevés et variables.**

Dans ce contexte, la sortie de la dépendance énergétique aux ressources fossiles est primordiale. En 2016, le taux d'indépendance nationale était de 54 %.

Les énergies renouvelables constituent, à terme, un moyen de production compétitif et contribuent à diminuer la dépendance aux combustibles fossiles dont le prix est très fluctuant.

En 2017, la couverture de la consommation d'électricité par la production renouvelable s'élève à 18,4 % en France contre en moyenne 32 % en Europe (jusqu'à 50 % pour la Suède ou l'Autriche).

5.1.2 Des objectifs européens et nationaux ambitieux

L'Union Européenne a adopté fin 2008 un « paquet Energie-Climat » qui fixait trois grands objectifs à atteindre à l'horizon 2020. Il a été révisé en 2014 avec l'adoption le 23 octobre d'un nouveau texte fixant comme objectifs **à l'horizon 2030** :

- Réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 40 % par rapport au niveau de 1990 (pour 20 % à l'horizon 2020),
- Porter la part des énergies renouvelables à 27 % de la consommation d'énergie finale (pour 20 % à l'horizon 2020),
- Réduire de 27 % la consommation d'énergie par rapport aux scénarios de consommation estimée (pour 20 % à l'horizon 2020).

En France, une feuille de route a été établie en 2009 au travers des **lois Grenelle 1 et 2** qui proposent des mesures relatives à différents sujets tels que la lutte contre le réchauffement climatique, la préservation de la biodiversité et des milieux naturels, la mise en place d'une nouvelle forme de gouvernance et enfin la prévention des risques pour l'environnement et la santé. C'est la loi Grenelle 1 qui a introduit pour la première fois dans le code de l'urbanisme **l'obligation de réaliser une étude de faisabilité du développement des énergies renouvelables** pour toute action ou opération d'aménagement soumise à étude d'impact. Cette obligation est aujourd'hui retranscrite dans l'article L.300-1 du code de l'urbanisme :

« Toute action ou opération d'aménagement faisant l'objet d'une évaluation environnementale doit faire l'objet d'une étude de faisabilité sur le potentiel de développement en énergies renouvelables de la zone, en particulier sur l'opportunité de la création ou du raccordement à un réseau de chaleur ou de froid ayant recours aux énergies renouvelables et de récupération. »

La prise en compte des énergies renouvelables dans les aménagements doit également contribuer à atteindre les nouveaux objectifs fixés par la **loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte**. Cette dernière fixe les grands objectifs du nouveau modèle énergétique français et va permettre à la France de contribuer plus efficacement à la lutte contre le dérèglement climatique et de renforcer son indépendance énergétique. Les énergies renouvelables doivent contribuer fortement à l'accomplissement des objectifs de cette loi qui sont résumés sur la figure page suivante. L'objectif est que la part des énergies renouvelables représente au moins 23% de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et au moins 32% de la consommation énergétique finale et 40% de la production d'électricité en 2030.



Figure 62 : Principaux objectifs de la loi de transition énergétique
(Source : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie)

5.2 Mesures d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables

5.2.1 Fonctionnement, principes généraux et réglementation

Les quelques paragraphes qui suivent ont comme objectifs de définir succinctement l'importance de l'énergétique du bâtiment et de montrer les différentes possibilités qui s'offrent au maître d'ouvrage afin d'atteindre les objectifs de réduction de consommation énergétique visés par la loi de la transition énergétique.

Dans le cadre du projet de loi relatif à la transition énergétique pour la croissance verte, la France a prévu de **réduire de 30 % sa consommation d'énergie totale à l'horizon 2030**. Avec une consommation de 70 millions tep⁸ par an, soit 44 % de l'énergie finale totale, le **secteur du bâtiment est le premier secteur consommateur d'énergie**.

Aussi, l'étude du potentiel en énergies renouvelables n'est cohérente que si elle est associée à une analyse du potentiel en maîtrise et efficacité énergétique du bâtiment.

La consommation dépend non seulement de la qualité intrinsèque du bâtiment, mais aussi du comportement des habitants. Un indice souvent utilisé pour comparer la consommation d'énergie des bâtiments est l'**Indice de Dépense Énergétique (IDE)**. On obtient cet indice par le rapport entre la consommation annuelle totale d'un bâtiment, exprimée en kWh (ou en MJ), et la surface brute de plancher chauffé (mur compris).

⁸ Tonne équivalent pétrole

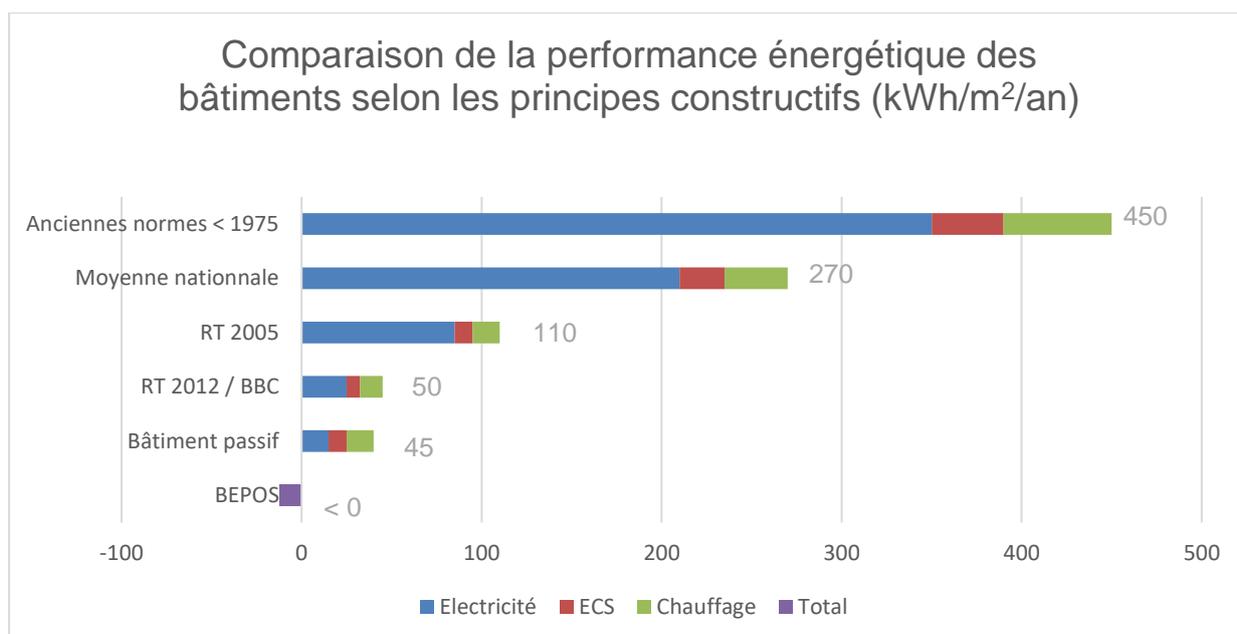


Figure 63 : Comparaison de la performance énergétique des bâtiments selon les principes constructifs (kWh/m²/an)

Afin d'atteindre cet objectif de diminution énergétique et d'assurer le confort nécessaire à l'usage du bâtiment, nous verrons par la suite à travers plusieurs fonctions du bâtiment, différentes mesures qui peuvent être mises en place.

Les mesures passives sont des mesures architecturales et constructives qui permettent d'atteindre naturellement le but poursuivi sans ou avec très peu d'apport d'énergie. Elles sont généralement bon marché, et par définition ne peuvent tomber en panne. En revanche, elles dépendent souvent des conditions météorologiques. Elles nécessitent de la créativité ainsi que des études plus approfondies de la part de l'architecte et des bureaux d'études. Peu énergivores, elles permettront de diminuer drastiquement la consommation du bâtiment. Pour être efficaces, elles devront être travaillées et étudiées méticuleusement, si possible avec un logiciel de simulation énergétique dynamique (SED).

Les mesures actives ou technologiques permettent d'atteindre le but poursuivi par des actions mécaniques, en consommant de l'énergie pour compenser les défauts du bâtiment ou compléter les mesures passives. Ces mesures sont mises en œuvre par différents professionnels (chauffagistes, installateurs, bureaux d'études génie-climatique, etc.) qui doivent être consultés dès de la phase de conception du projet pour une intégration optimale. Ces mesures dépendent peu des conditions météorologiques, mais sont relativement chères, énergivores et peuvent tomber en panne.

Pour rendre un bâtiment confortable, les mesures passives doivent être exploitées avant de recourir aux mesures actives dont le rôle de support pallie les insuffisances résiduelles à l'aide d'installations techniques.

5.2.2 Mesures détaillées

Nous présenterons dans les fiches suivantes les mesures possibles.

Architecture bioclimatique

L'architecture bioclimatique consiste à exploiter et intégrer un maximum les caractéristiques du lieu d'implantation dans la construction d'un bâtiment. L'objectif recherché est d'obtenir le confort souhaité de façon la plus naturelle possible. Ci-dessous, quelques exemples de mesures possibles :

- Distribution des volumes adaptée au climat. Les grandes hauteurs sont recommandées dans les climats chauds, alors que les petits volumes, plus simple à chauffer, le sont pour les climats froids.
- Grandes surfaces de captages orientées du Sud-Est au Sud-Ouest, nécessaires pour capter la faible irradiance perçue en hiver. Attention à ne pas surdimensionner les gains solaires afin ne pas être en surchauffe l'été.
- Aménagements architecturaux : il s'agit de regrouper les zones chauffées au sud (bureaux, logements, etc...) et les zones plus fraîches au nord (entrepôt, etc.).



Figure 64 : Architecture bioclimatique à Beausoleil à Vannes
Source ENCIS Environnement

Enveloppe et ventilation du bâtiment

Afin d'atteindre un confort thermique optimal, il peut être judicieux de jouer sur certaines caractéristiques liées à l'enveloppe du bâtiment (épaisseur et type d'isolant, particularités physiques des matériaux, etc...) :

- **Isolation thermique** : placée à l'extérieur de la structure, elle protège des variations rapides de température, stabilise la température intérieure, favorise l'utilisation des gains solaires, permet le refroidissement passif, supprime le risque de moisissure et de condensation, etc.

Types isolants			Utilisation					Caractéristiques isolantes			Caractéristiques techniques				Bilan environnemental ^(a)			
			Mur	Plancher / combles perdus	Rampant	Support de couverture	Sol - Sous chape	Lambda en W/m.K	Epaisseur pour R=5 en cm	Prix TTC indicatif pour R=5	Capacité hygroscopique	Résistance à la vapeur	Classement au feu	Temps de réplacage (en heure) pour 20 cm	Energie primaire (kWh Exp UF) ^(b)	Effet de serre (CO ₂ eq/UF) ^(b)		
Origine	Isolants	Conditionnement																
Isolants synthétiques	Polystyrène expansé PSE	Panneaux	●	●	●	●	●	0,037 à 0,040	18 à 20	15 à 20 €	Non	30 à 100	B	6	142,6	⊖	16,9	⊖
		Laines minérales	Laine de verre	Rouleaux	●	●	●	●	●	0,035	17	6 à 16 €	Non	1	A à B	6	59,4	⊖
	Laine de roche HD	Rouleaux		●	●	●	●	●	0,040	20	6 à 10 €	Non	1	A à B	6	184	⊖	46,8
Isolants d'origine végétale	Fibre de bois	Panneaux souples	●	●	●			0,038 à 0,040	19 à 20	24 à 38 €	Faible	1 à 2	E	7,5	51,5	⊖	-5,5	⊕
		Panneaux denses	●	●	●	●	●	0,037 à 0,046	18 à 23	36 à 75 €	Faible	3 à 8	E	15	173,3	⊖	-18,6	⊕
	Ouate de cellulose	Vrac insufflé	●	●	●			0,038 à 0,044	19 à 22	10 à 15 €	Moyenne	1 à 2	B à E	10	17,1	⊕	-4,4	⊕
		Vrac déversé		●				0,037 à 0,040	18 à 20	10 à 15 €	Moyenne	1 à 2	B à E	10	17,1	⊕	-4,4	⊕
		Panneaux	●	●	●			0,039	20	38 à 42 €	Moyenne	2	E	12	50,8	⊖	-3,5	⊕
	Liège	Vrac	●	●			⊙	0,040 à 0,045	20 à 22	28 à 42 €	Faible	5 à 30	E	9	41,4	⊖	-25,6	⊕
		Panneaux	●	●	●	●	●	0,036 à 0,042*	18 à 21	45 à 71 €		5 à 30	E	13	41,4	⊖	-25,6	⊕
	Laine de chanvre	Rouleaux	●	●	●			0,038 à 0,042	19 à 21	25 à 36 €	Moyenne	1 à 2	E	7	60,8	⊖	5,1	⊖
		Panneaux	●	●	●			0,038 à 0,042	19 à 21	20 à 40 €	Moyenne	1 à 2	E	7	60,8	⊖	5,1	⊖
	Chênevotte	Vrac	⊙	●	●		⊙	0,048	24	17 à 30 €	Moyenne	1 à 2	E	8,5	15,5	⊕	-48,9	⊕
Laine de lin	Rouleaux	●	●	●			0,037	19	35 à 40 €	Moyenne	1 à 2	C à D	6	56,7	⊖	0,7	⊕	
	Panneaux	●	●	●			0,037 à 0,047	18 à 23	22 à 25 €	Moyenne	1 à 2	C à D	6	56,7	⊖	0,7	⊕	
Isolants d'origine animale	Laine de mouton	Rouleaux	●	●	●			0,035 à 0,042	17 à 21	20 à 28 €	Forte	1 à 2	C	5	24,5	⊕	0,2	⊕
		Panneaux	●	●	●			0,035 à 0,040	17 à 20	28 à 36 €	Forte	1 à 2	C	5	24,5	⊕	0,2	⊕

* 0,049 pour liège blanc
 ● : Utilisation conseillée
 ⊙ : Utilisation possible en béton allégé

(a) Moyenne calculée par l'association Arcanne (cf explications page 27)
 (b) 1 UF = 1 m² d'isolant à R = 5 m².K/W

Figure 65 : tableau comparatif d'isolants selon différents critères.
 Source : <http://www.ecowizz.net/articles/2010/09>

- **Inertie du bâtiment élevée** permettant de répartir durant la journée les gains reçus et de limiter les surchauffes en périodes ensoleillées. Nécessité d'une isolation extérieure. Pour les locaux occupés seulement la nuit, une faible inertie thermique peut être avantageuse car permet un abaissement rapide de la température.

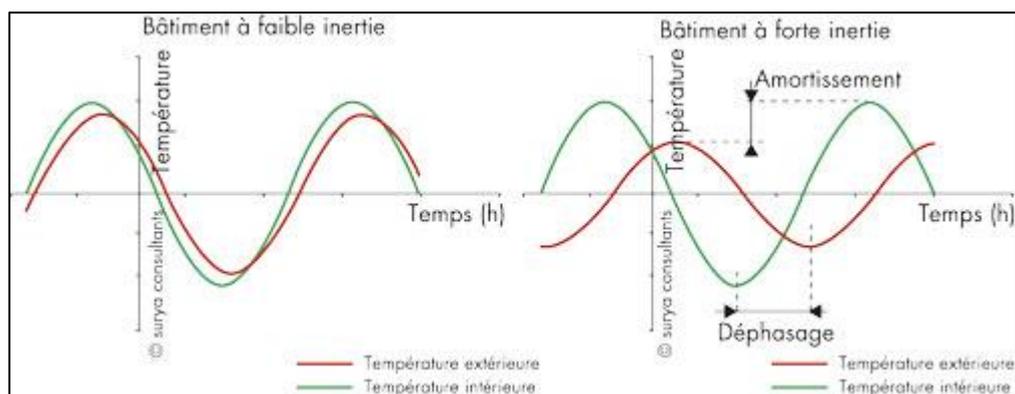


Figure 66 : Comparaison de l'amortissement et du déphasage de température entre l'intérieur et l'extérieur, engendrés par l'inertie thermique d'un bâtiment

Au sein d'un bâtiment, la ventilation joue un double rôle. Elle permet d'assurer le maintien d'une bonne qualité de l'air, tout en étant un vecteur aéraulique de température. Ci-dessous, deux exemples de mesures passives possibles concernant la ventilation.

- Ventilation naturelle : souvent mieux acceptée par les habitants que la ventilation mécanique (selon sondage SBS⁹), elle permet des débits bien supérieurs à ceux que la ventilation mécanique peut atteindre, favorisant l'évacuation des polluants éventuels et améliorant nettement l'efficacité du refroidissement passif (cf. 3.2.5.1).
- Thermocirculation de l'air : il s'agit d'un mouvement convectif naturel de l'air à l'intérieur d'un bâtiment permettant à l'air chaud de monter et l'air refroidi de descendre, créant ainsi une boucle de circulation thermique.

⁹ Sick Building Syndrome (Syndrome du Bâtiment Malsain).

Moyens passifs

Consommant peu ou pas d'énergie lors de leur utilisation, ces moyens permettent de diminuer fortement la consommation énergétique d'un bâtiment :

- **Le refroidissement passif** met à profit tout phénomène permettant de diminuer la température intérieure et ne consommant pas d'énergie. L'été, nous chercherons à diminuer les gains de chaleur internes et solaires en installant des protections solaires et en diminuant l'utilisation des appareils intérieurs qui dégagent trop de chaleur. Si ce n'est pas possible, il est conseillé d'évacuer l'excédent de chaleur par ventilation. On peut également appliquer le refroidissement passif par ventilation nocturne. Celui-ci comporte deux phases :

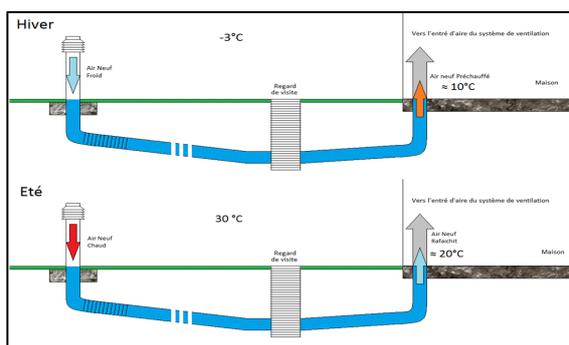


Figure 67 : Fonctionnement d'un puit canadien
Source : <http://www.enat44.fr/puitscanadien.html>

- **Période de refroidissement** : lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure, on évacue le surplus d'air chaud accumulé durant la journée au travers des ouvertures dans le bâtiment. Un couplage avec le sol peut être effectué à l'aide d'un puit extérieur, afin d'augmenter le gradient de température entre l'air intérieur et l'air en sous-sol.

○ **Période de protection** : lorsque la température extérieure est supérieure à la température intérieure, la ventilation est réduite au minimum requis afin d'assurer une qualité de l'air convenable. De plus, de protections solaires efficaces (diminuant le rayonnement solaire) sur les vitrages doivent être installées. Ces protections peuvent être de simples rideaux (extérieurs ou intérieurs), arbres à feuilles caduques (protection solaire en été, laisse passer le rayonnement en hiver), masques architecturaux (bloquant le rayonnement direct en été, mais pas en hiver).

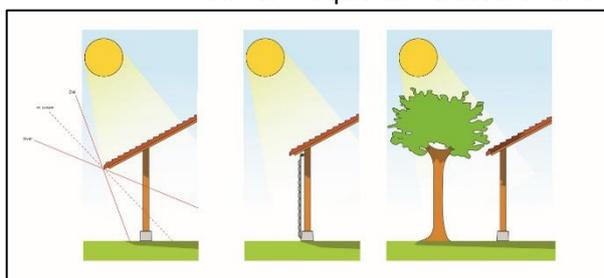


Figure 68 : Différentes méthodes de protection solaire
Source : <http://www.info-energie-fc.org>

- **Chauffage solaire passif** : il consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire entrant dans le bâtiment par les fenêtres ou parfois des dispositifs ad-hoc (façade double peau, etc...), afin de contribuer au chauffage des locaux. Afin de profiter au mieux des gains solaires, quelques directives doivent être mises en place

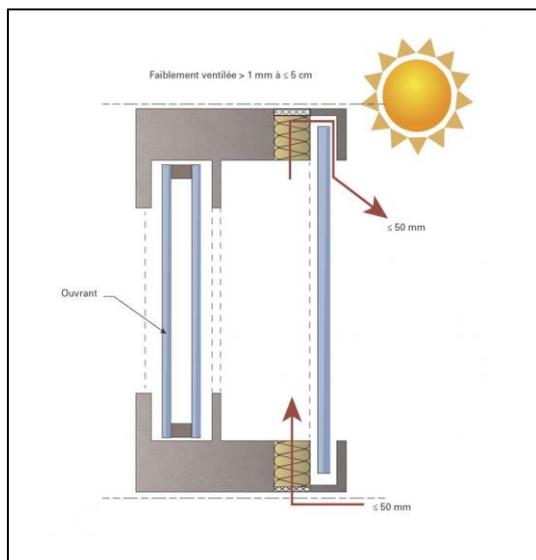


Figure 69 : Zone tampon créée par une double façade ventilée
Source : <https://www.energieplus-lesite.be>

- Régulation thermique adéquate avec la mise en place de systèmes de contrôles prévisionnels et intelligents.
- Isolation thermique soignée : forte épaisseur d'isolant et vitrage de haute performance afin de réduire au minimum les besoins énergétiques.
- Grandes surfaces de captages orientées du Sud-Est au Sud-Ouest, nécessaires pour capter la faible irradiance perçue en hiver.
- Protections solaires (voir précédemment).
- Inertie du bâtiment élevée permettant de répartir durant la journée les gains reçus perçus et de limiter les surchauffes en périodes ensoleillées. Nécessité d'une isolation extérieure. Pour les locaux occupés seulement la nuit, une faible inertie thermique peut être avantageuse car permet un abaissement rapide de la température.



Pompe à chaleur

Une pompe à chaleur est un dispositif permettant de soutirer l'énergie présente dans une source froide à l'aide d'une action mécanique (pompe à compresseur), thermique (pompe à absorption), ou chimique (pompe à adsorption). La température de la source froide doit être inférieure à la température nécessaire afin que cette chaleur soit utile.

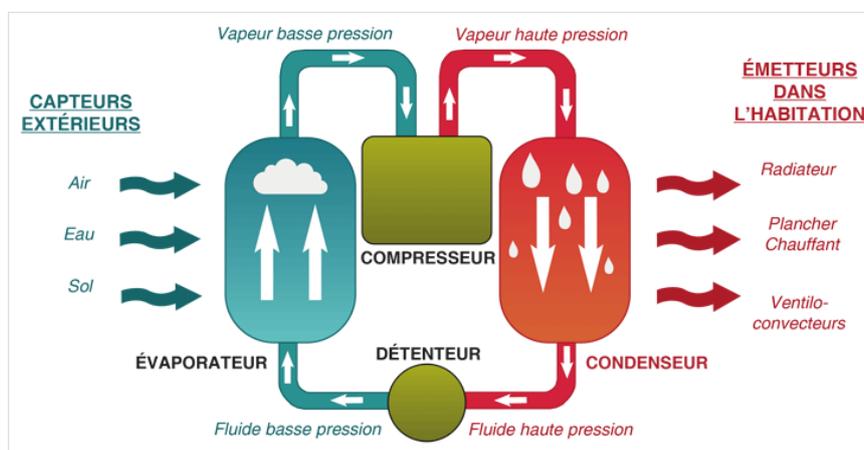


Figure 70 : Schéma d'une PaC
Source : <http://www.creabain-energies.com>

Une pompe à chaleur se compose d'un compresseur qui comprime un fluide. Ce fluide va s'échauffer et céder sa chaleur au travers un condenseur. Puis, ce gaz va être détendu dans un détendeur ce qui aura comme conséquence de le refroidir. À basse pression, ce fluide va de nouveau s'évaporer dans un évaporateur et ainsi capter les calories du milieu ambiant de la source froide.

Cette pompe à chaleur peut être réversible, permettant de produire du froid.

Le rendement d'une PaC est donné sous le nom de COP¹⁰ étant égal au rapport de l'énergie thermique délivrée en sortie du condenseur par rapport à l'énergie électrique (s'il s'agit d'une PaC électrique) fournie au compresseur.

$$COP = \frac{\text{Chaleur Utile}}{\text{Energie motrice fournie}}$$

$$COP = \frac{(\eta_{PAC})}{(\eta_{carnot})}$$

¹⁰ Coefficient de performance

Réseau de chaleur

La mise en place ou l'extension d'un réseau de chaleur peut être intéressant en fonction des besoins énergétiques du site et des différentes énergies renouvelables productrices de chaleur que le maître d'ouvrage souhaitera privilégier (géothermie, solaire thermique, biomasse par combustion).

Le réseau de chaleur est un système de distribution de chaleur à l'échelle urbaine, produite de façon centralisée. Consistué d'un réseau de distribution dans lequel circule un fluide caloporteur, d'une unité de production centrale de chaleur vers des postes secondaires appelés sous-stations d'échanges.

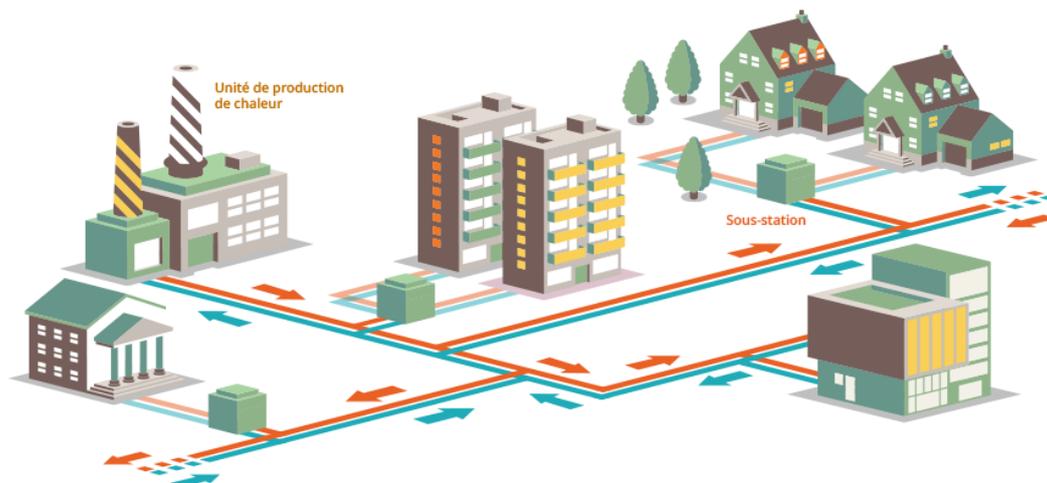


Figure 71 : Schéma simplifié d'un réseau de chaleur
Source : <http://www.enrchoix.idf.ademe.fr/>

L'unité de production de chaleur :

La chaleur peut être générée à partir de différentes sources : conventionnelles, renouvelables, ou de récupération (industrielle le plus souvent).

À l'heure actuelle, la chaleur produite à partir d'énergies renouvelables représente 15% de la chaleur consommée en France. Dans l'objectif du projet de loi relatif à la transition énergétique pour la croissance verte, afin de diminuer la part importante de la consommation énergétique du bâtiment, la mise en place d'un réseau de chaleur d'origine renouvelable peut apporter une réelle plus-value.

Réseau de distribution primaire :

Le réseau de distribution primaire concerne le réseau en lui-même, et constitue une boucle amenant un fluide caloporteur d'une unité de production à une sous-station. Plusieurs fluides peuvent être employés :

- L'eau chaude : d'une température allant de 60 à 110°C, permet d'alimenter les bâtiments résidentiels, les bureaux, etc.
- L'eau surchauffée : d'une température comprise entre 110 et 180°C, concerne les réseaux de très grandes échelles alimentant les industries nécessitant des températures d'eau plus élevées (laveries, certaines industries, abattoirs, etc.)
- L'eau sous forme vapeur : d'une température de 200 à 300°C.

Sous-station d'échange :

Située au pied de chaque bâtiment, la sous-station d'échange est constituée d'un échangeur thermique permettant le transfert de chaleur entre le réseau primaire et le réseau secondaire ou particulier, ainsi que d'un compteur de chaleur afin de connaître la consommation dudit bâtiment.

Coûts

Relativement conséquents, les coûts d'installation sont de l'ordre de 1 MW par 1 million d'euros investis (chaufferie et réseau de distribution).¹¹

Plusieurs possibilités existent afin de diminuer les coûts d'investissement :

- Mutualiser les coûts de génie civil durant la phase de la pose des canalisations, avec les travaux d'un réseau empruntant un tracé similaire.
- Utilisation de canalisations souples (en plastique pré-isolé). Sa livraison sous forme de touret, permet une pose plus rapide permettant une diminution des coûts d'installations.
- Un accompagnement par une AMO¹² compétente et expérimentée permet un cadrage plus rigoureux des coûts.

Aides publiques

Depuis 2009 le **fond chaleur**, un dispositif de soutien financier aux projets de chaleurs renouvelables a été mis en place. Les réseaux de chaleur peuvent bénéficier de dispositif sous certaines conditions. Le montant d'aides attribuées au projet doit permettre une décote de l'ordre 5% du prix de la chaleur renouvelable par rapport à la chaleur produite par une énergie conventionnelle. Il doit clairement apparaître sur le dossier l'impact de l'aide du fond de chaleur sur le prix de la chaleur vendue aux abonnés du réseau.

¹¹ <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/reseaux-de-chaleur-couts-et-aides-publiques>

¹² Assistance à Maîtrise d'Ouvrage

L'énergie solaire

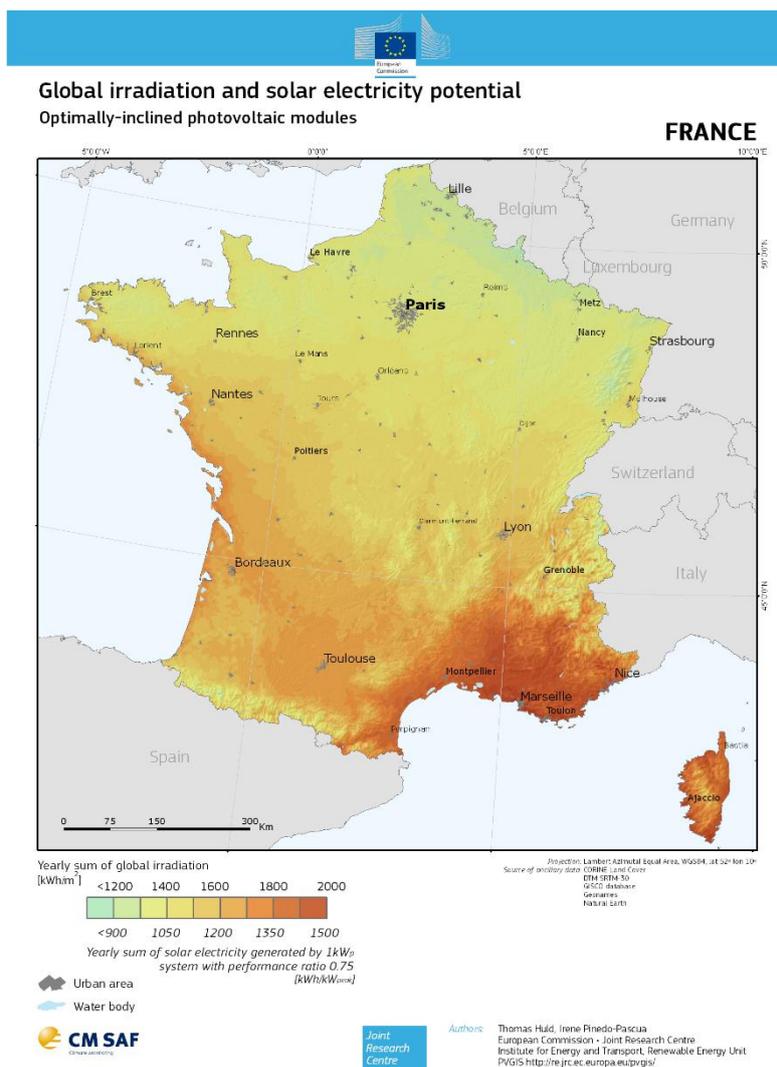
Trois technologies différentes permettent de valoriser l'énergie solaire :

- le solaire thermique,
- le solaire thermodynamique,
- le solaire photovoltaïque.

Des panneaux hybrides permettent également de produire simultanément de la chaleur et de l'électricité.

L'irradiation solaire

Le premier paramètre permettant d'évaluer le potentiel photovoltaïque d'un site est son irradiation solaire. Elle dépend de plusieurs facteurs tels que la latitude, l'altitude, le taux d'humidité dans l'air et la durée journalière d'ensoleillement. La carte page suivante réalisée par la Commission Européenne (JRC's Institute for Energy and Transport) représente l'irradiation solaire en France ainsi que l'électricité annuelle générée par une installation de 1kWc optimalement orientée avec un rendement de 75 %.



Carte 1 : Irradiation solaire du site (Source : Commission Européenne)

Positionnement de l'installation

La production d'une installation solaire dépend également et de manière très significative du positionnement des modules, à savoir leur orientation et leur inclinaison. La figure ci-dessous présente le pourcentage du flux lumineux annuel récupéré en fonction de ces deux paramètres.

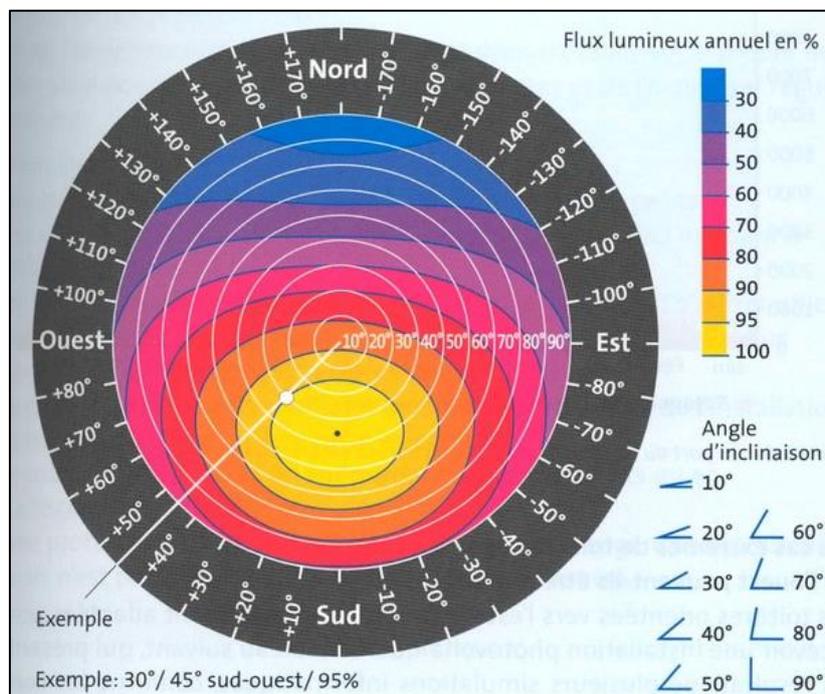


Figure 72 : Flux lumineux annuel capté en fonction de l'orientation et de l'inclinaison

Source : photovoltaïque.info

Masques

Des masques sont des éléments de l'environnement susceptibles de générer un ombrage total ou partiel sur l'installation photovoltaïque. Il existe des masques lointains (ligne d'horizon) et proches (arbres, cheminées, antennes, bâtiments voisins, etc.). Ces ombrages génèrent des pertes de production plus ou moins importantes en fonction de leur localisation :

- Pour les obstacles lointains, on estime que la diminution de l'irradiation se répartit de manière égale entre tous les modules constitutifs de l'installation. Il est donc possible d'évaluer la production en effectuant un simple relevé de masques. (cf. figure page suivante).
- Dans le cas d'un obstacle proche de l'installation photovoltaïque (ex : arbre, bâtiment, etc.), l'ombre portée sur un seul module constitutif d'un champ photovoltaïque peut entraîner une diminution très marquée de la production du champ tout entier. En effet, les cellules d'un panneau photovoltaïque sont

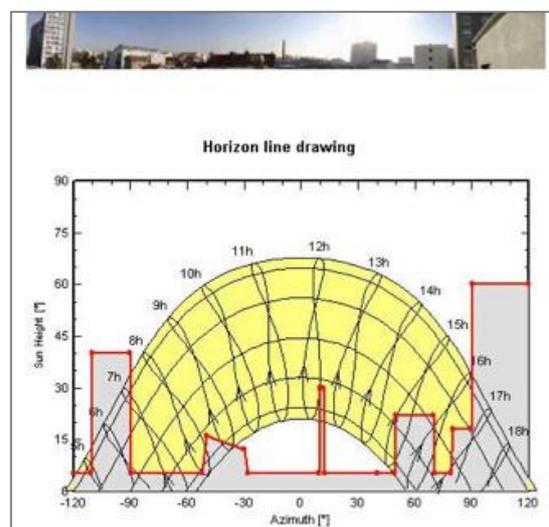


Figure 73 : Incidence des masques sur la production

connectées en série et la cellule qui se trouve à l'ombre va impacter le reste des cellules de la chaîne. Pour les ombrages proches, il est donc nécessaire de modéliser le système photovoltaïque et le site à l'aide d'un logiciel spécialisé. Si les pertes sont trop importantes, des systèmes existent afin de limiter les pertes en rendant indépendants les panneaux solaires les uns par rapport aux autres : les optimiseurs et les micro-onduleurs. Leur coût n'est cependant pas négligeable et doit être pris en compte dans la modélisation économique du projet.

Néanmoins, les obstacles proches sont potentiellement nombreux en milieu urbain et les études de potentiel devront être effectuées au cas par cas, pour chaque bâtiment.

La poussière peut également être considérée comme un masque. En cas de zone sensible (bâtiment bas, passage de tracteurs, stockage de paille, etc.), il faut porter une attention particulière à l'entretien et au nettoyage des panneaux.

Le solaire thermique

Présentation générale

Le solaire thermique permet de récupérer sous forme de chaleur l'énergie des rayons du soleil. Ces systèmes peuvent être utilisés pour générer de l'eau chaude et/ou du chauffage.

Pour la production d'eau chaude sanitaire, il existe des chauffe-eaux solaires individuels (CESI) ou collectifs. Deux modes de montages existent pour les CESI :

- Le montage en **thermosiphon**, sans pompe de circulation et avec un ballon placé directement au-dessus des panneaux, est particulièrement adapté aux climats méditerranéens et tropicaux (pas d'appoint).



Figure 75 : Installation solaire en toiture

Source : Sylvain LE ROUX

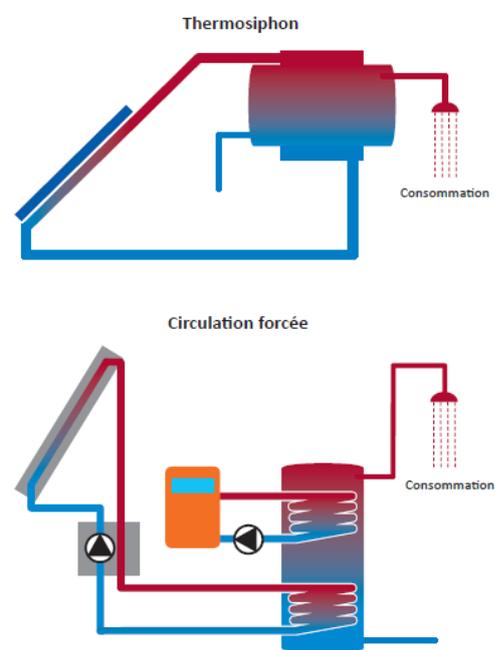


Figure 74 : Modes de montages des chauffe-eau solaires - Source : SER

- Le montage en **circulation forcée et chauffage d'appoint** permet de compléter la chauffe de l'eau par un système annexe (chaudière, résistance électrique, etc.). Il s'agit de la solution la plus courante en France où les CESI couvrent entre 50 % et 80 % des besoins en eau chaude sanitaire des foyers.

Les chauffe-eaux solaires collectifs sont l'extension du système individuel à des structures consommant des quantités d'eau plus importantes (immeubles, gymnases, hôpitaux, etc.). Le fonctionnement est sensiblement le même que pour des CESI, avec différentes solutions techniques permettant différents degrés d'individualisation des charges.

En plus des besoins en eau chaude, l'énergie solaire peut également couvrir une partie des besoins en chauffage. Des systèmes appelés « systèmes solaires combinés » permettent, comme l'illustre la figure suivante, de réaliser ces deux missions. En France, les SSC peuvent couvrir entre 10 % et 50 % des besoins des foyers en fonction des dimensions de l'installation et de l'ensoleillement.

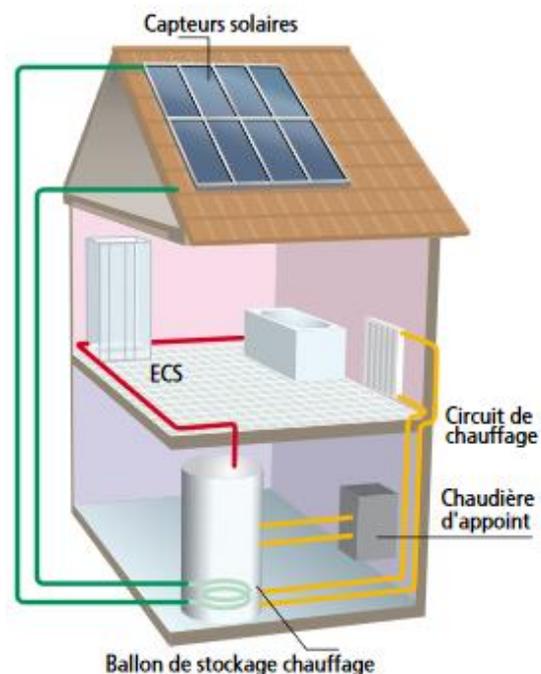


Figure 76 : Installation solaire thermique combinée (chauffage + eau chaude)

Source : ADEME

Maturité

Les installations solaires thermiques se développent dans le monde depuis les années 1990. En France métropolitaine, d'après le Syndicat des Energies Renouvelables, le marché a progressé de près de 40 % par an entre 1998 et 2006, puis de 20 % en 2007 et 2008. Les technologies utilisées sont en constante amélioration depuis plus de 20 ans et permettent aujourd'hui d'avoir une technologie mature pour des coûts corrects.

Coûts

L'installation d'un chauffe-eau individuel coûte entre 4 000 € et 6 000 € en fonction de ses dimensions et permet d'économiser jusqu'à 75 % sur la facture en eau chaude avec une durée de vie de 20 à 30 ans.

Un système solaire combiné coûte entre 10 000 € et 15 000 €. Il permet d'économiser jusqu'à 75 % sur la facture de chauffage et eau chaude pendant 20 à 30 ans.

Le coût d'une installation solaire collective varie fortement en fonction du bâtiment concerné, entre 700 € et 1 100 € par m² de capteur environ, mais peut permettre également de réaliser de très fortes économies sur les factures de chauffage et d'eau chaude.

Le solaire thermodynamique

Fonctionnement

Le solaire thermodynamique concentre le rayonnement direct du soleil à l'aide de miroirs pour chauffer un fluide à haute température et produire de la vapeur pour faire tourner une turbine et produire ainsi de l'électricité ou alimenter en énergie des procédés industriels :

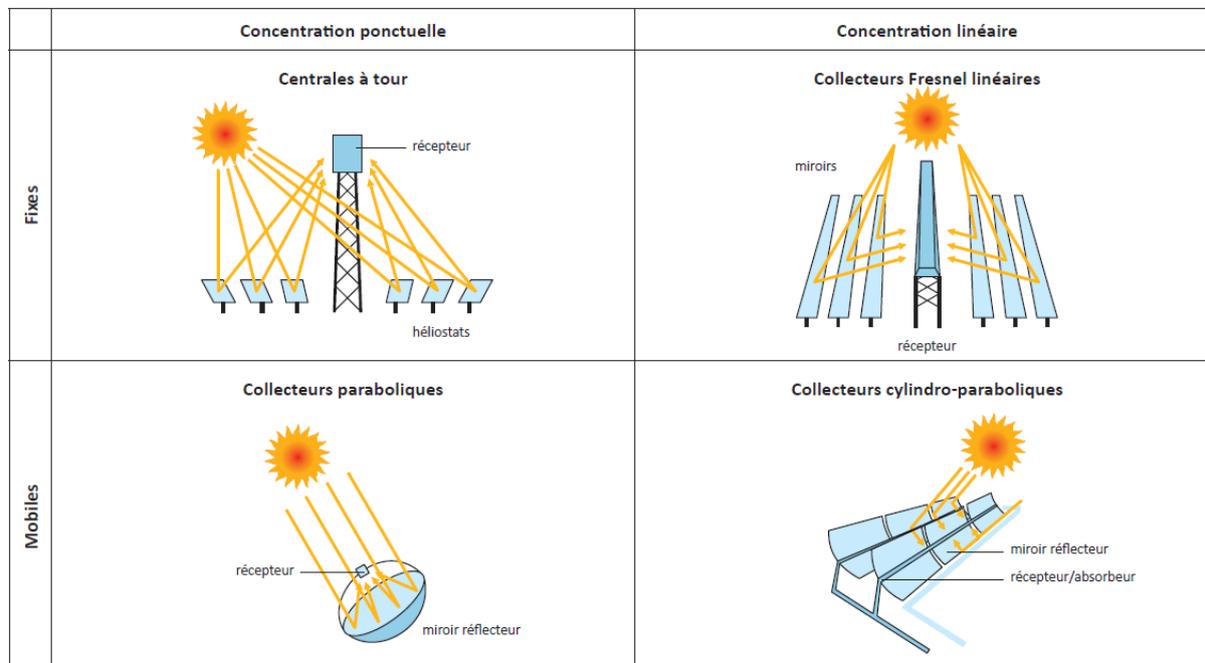


Figure 77 : Les systèmes de concentration

Source : Agence Internationale de l'Energie (AIE)

Différents fluides peuvent être utilisés (eau, huiles, air, gaz, fluides organiques, sels fondus), déterminant la température maximale admissible et influençant le choix de la technologie, ces matériaux et la commodité de stockage. Les installations thermodynamiques sont généralement de grande taille et présentent pour principal avantage de pouvoir stocker l'énergie sous forme de chaleur afin de la réutiliser ultérieurement, permettant une production quasi-continue en fonction de la technologie utilisée.

Maturité

Les premières centrales solaires à concentration se sont développées à la fin des années 1970. Les technologies ont depuis évolué et des unités plus récentes de plusieurs dizaines de MW sont actuellement à l'étude ou en construction dans différents déserts.

Coûts

Seules les très grosses installations sont aujourd'hui rentables et compétitives par rapport aux autres sources d'énergie existantes.

Le solaire photovoltaïque

Fonctionnement

Il s'agit des installations les plus courantes en France aujourd'hui. Des panneaux photovoltaïques, permettant de convertir l'énergie solaire en énergie électrique, sont reliés entre eux. Ils peuvent être posés directement sur un bâtiment, mais également sur ou intégrés à des structures non-consommatrices d'électricité (ombrière de parking, couverture de passage public, etc.) ou encore au sol, sur des structures adaptées. L'électricité produite peut être autoconsommée et/ou injectée sur le réseau.

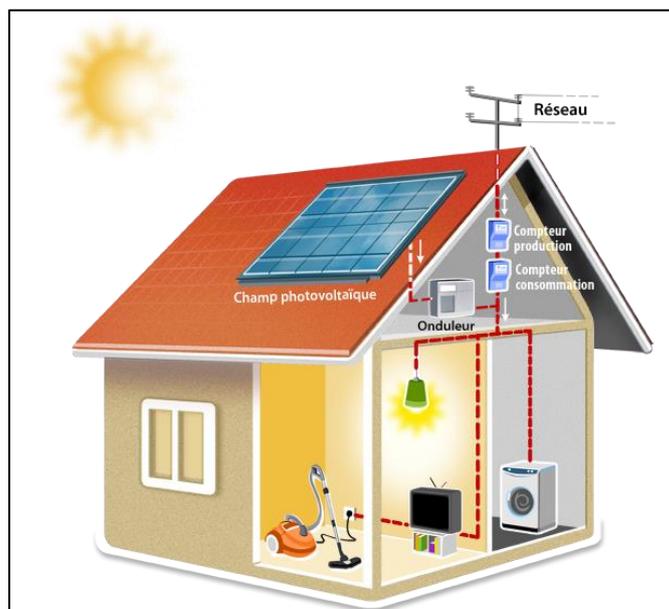


Figure 78 : Schéma d'une installation photovoltaïque (vente du surplus)

Source : Hepsul





Photographie 1 : Ombrières photovoltaïques pour vélos et voitures

Crédit photo : Sylvain LE ROUX

En cas de revente de l'électricité produite, les tarifs applicables pour les installations sur toiture dépendent de la puissance crête et du degré d'intégration au bâti des installations. Ils sont indexés chaque trimestre selon le volume de projets entrés en file d'attente au trimestre précédent.

Si le nombre de projets déposés est conforme à la trajectoire prévue de 200 MW/an pour le segment des toitures intégrées au bâti et de 200MW/an pour le segment des toitures intégrées simplifiées au bâti, cet ajustement consistera en une baisse du tarif d'achat de 2,6 % chaque trimestre (source : développement-durable.gouv.fr). Si le flux de nouveaux projets est moins important, la baisse sera moins marquée voire nulle. Si le flux est plus important la baisse sera accentuée.

Depuis mai 2016, au-delà de 100 kWc, les tarifs sont octroyés par appels d'offres. Les derniers tarifs d'achats applicables, en vigueur depuis le 11 mai 2017, se trouvent dans le tableau suivant.

Type de tarif	Type de l'installation	Puissance totale	Tarif d'achat (c€/kWh)			
			Du 01/10/17 au 31/12/17	Du 01/01/18 au 31/03/18	du 01/04/18 au 30/06/18	du 01/07/18 au 30/09/18
Ta	Intégration au bâti	≤3 kWc	18,48 + 3 = 21,48	18,44 + 2,25 = 20,69	18,55 + 1,5 = 20,05	18,55 + 0,75 = 19,30
		≤9 kWc	15,71 + 3 = 18,71	15,67 + 2,25 = 17,92	15,76 + 1,5 = 17,26	15,77 + 0,75 = 16,52
	Sur bâtiment et respectant les critères généraux d'implantation	≤3 kWc	18,48	18,44	18,55	18,55
		≤9 kWc	15,71	15,67	15,76	15,77
Tb	Sur bâtiment et respectant les critères généraux d'implantation	≤36 kWc	12,07	12,07	12,07	12,07
		≤100 kWc	11,36	11,26	11,24	11,25
		>100 kWc	0	0	0	0

Tableau 4 : Tarifs en vigueur au 30/08/2018 pour la production d'électricité photovoltaïque.

Le tarif d'achat dont l'installation pourra bénéficier est bloqué à la date de la demande complète de raccordement. Le bénéficiaire a alors 18 mois pour mettre en service son installation.

Aération

Dans le cas du photovoltaïque, une hausse de la température des panneaux induit une baisse de leur production. Cette baisse de production est spécifiée dans les caractéristiques des panneaux et est généralement de l'ordre de 0,4 % / °C. C'est pourquoi il est important de privilégier les systèmes permettant une bonne aération des panneaux.

Ainsi, dans le cas d'une installation intégrée au bâti sur une maison d'habitation ou l'isolation est importante et limite la circulation de l'air sous les panneaux on peut constater des pertes de production de l'ordre de de 5 % par rapport à une installation sur une grange ou en surimposition.

Maturité

Les premières applications du photovoltaïque concernaient l'électrification rurale (sites isolés) à partir des années 1970. Ce n'est que dans les années 90 que les systèmes connectés au réseau sont devenus réalisables et compétitifs pour représenter, en 2007, plus de 90 % de la puissance photovoltaïque installée. Depuis, le rendement des installations ne cesse d'augmenter alors que leur cout décroît fortement.

Au 31 décembre 2016, la puissance raccordée représentant 6 772 MW, soit une progression de 9.3 % en 1 an (Source : SER).

Il s'agit aujourd'hui d'une technologie mature et qui connaît un grand succès. De nombreux professionnels qualifiés ont développé leur activité autour de cette filière.

Coûts

Une installation photovoltaïque coute entre 0,6 et 2,5 € / kWc en fonction de la dimension de l'installation, de la technologie utilisée et du type d'installation. A titre d'exemple, une installation de 9 kWc coute entre 13 et 20 k€ HT, une installation de 36 kWc en surimposition coute entre 30 et 45 k€ HT.

Une étude de la Commission de Régulation de l'Energie (CRE) réalisée en Avril 2014 a étudié les couts des énergies renouvelables en France métropolitaine. D'après cette étude, le coût de production variait de 87,7 €/MWh à 681,4 €/MWh avec une moyenne de 386,4 €/MWh pour les installations existantes et de 152,5 €/MWh pour les installations en projets à l'époque. Ce cout a encore diminué de manière significative depuis grâce à de nouvelles avancées technologiques qui ont permis d'améliorer le rendement des panneaux tout en diminuant leurs prix. A titre indicatif, les lauréats du quatrième appel d'offre PV au sol de la CRE (été 2018) ont proposé une production à un cout inférieur à 60€/MWh.

Le cout de production de l'électricité photovoltaïque étant aujourd'hui compétitif par rapport au cout de l'électricité soutirée du réseau, l'autoconsommation devient de plus en plus utilisée. Pour les projets d'aménagement comme celui du quartier du pont des Tanneries, un cadre juridique récent permet de mettre en place des projets d'autoconsommation collective, permettant à des habitants d'un même lotissement d'acheter ensemble de l'électricité directement sur place.

L'énergie éolienne

Une éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en énergie mécanique grâce aux pales qui font tourner le rotor.

Il est important de distinguer le grand éolien, qui correspond à des machines de plus de 50 m de haut, du petit éolien. D'un point de vue technologique, il existe aujourd'hui deux types de petites éoliennes : les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal.

Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor :

- la densité de l'air,
- la surface balayée par le rotor,
- et la vitesse du vent.

Avant le lancement d'un projet, une étude plus précise et s'appuyant sur des données plus locales du potentiel du site (météo France, mât de mesure sur site, etc.) est recommandée afin de valider sa viabilité.

L'implantation d'une éolienne (petite ou grande) peut être motivée par l'exploitation d'une façon ingénieuse des effets aéroaccélérateurs microgéographiques décrits ici :

Effet Venturi (tunnel) :

Correspond à une augmentation de la vitesse d'un fluide lors du rétrécissement d'une conduite, d'après les lois de la conservation du débit et de Bernoulli. Cet effet est relativement utilisé en l'implantation d'éoliennes dans certaines vallées.

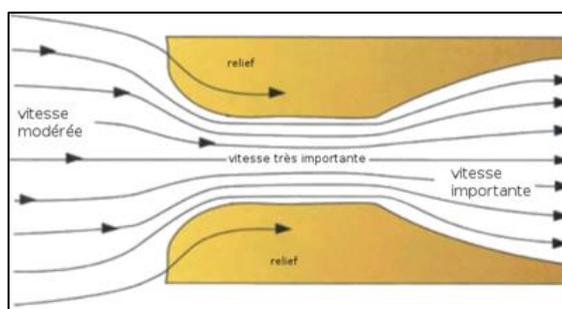


Figure 79 : représentation de l'effet tunnel par des lignes de courants d'un fluide

Source : http://eolienne.f4jr.org/effet_tunnel

Effet de colline :

Autre effet accélérateur de fluide, engendrant une variation du profil de vitesse due à une différence de pression entre l'avant et l'arrière d'un relief.

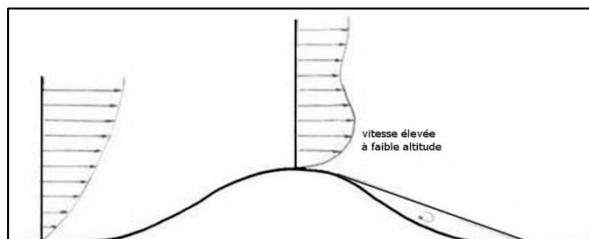


Figure 81 : Profil vertical de vent lors d'un effet colline avec pente « douce »

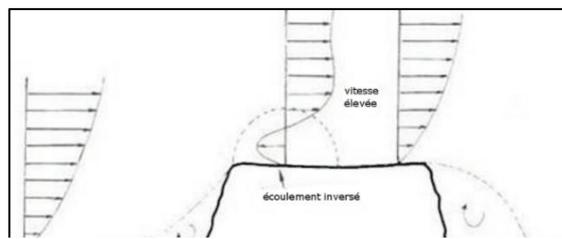


Figure 80 : Profil vertical de vent lors d'un effet colline avec une pente "raide"

Le petit éolien

Fonctionnement et maturité

Le petit éolien correspond à des machines de petite taille, à axe horizontal ou vertical. Les puissances peuvent être comprises entre 0,1 W et 250 kW pour des hauteurs inférieures à 50 m. Avec un taux de charge optimiste de l'ordre de 5 à 10%, on obtient une production d'environ 8 760 kWh/an pour une micro éolienne de 10 kW

Comme précisé précédemment, il existe deux grandes catégories d'aérogénérateurs : les aérogénérateurs à axe horizontal, et les aérogénérateurs à axe vertical.

Les premiers ont un rotor parallèle au sol et sont généralement munis de trois pales. Afin de suivre la direction du vent, la nacelle doit être équipée d'un dispositif de suivi. Afin d'optimiser la production, il est conseillé d'éviter les zones de turbulences (proximité de haies, bâtiments, etc.). Cette technologie est éprouvée et de nombreux modèles différents sont disponibles sur le marché.

Les secondes ont un rotor perpendiculaire au sol ce qui leur permet de capter le vent quel que soit sa direction. Ceci les rend plus modulables aux zones de vents irréguliers générant des turbulences. Cependant, leur rendement est moindre et il s'agit d'une technologie encore jeune.



Photographie 2 : éolienne à axe vertical (gauche) et éolienne à axe horizontal (droite) - Source : SER

L'électricité produite peut être revendue et/ou autoconsommée.

Coûts

Les couts sont très variables en fonction des technologies et des puissances installées. Pour les éoliennes à axe horizontal, les couts vont de 4 000 € à 10 000 € par kW installé. Pour les éoliennes à axe vertical, les couts sont plus élevés. Le temps de retour sur investissement pour le petit éolien varie entre 15 et 25 ans.

L'énergie hydraulique

Fonctionnement

Les centrales hydroélectriques permettent la production d'électricité en convertissant l'énergie générée par le courant. Elles se composent d'une prise d'eau équipée d'un seuil ou d'une retenue d'eau, et d'une installation de production (turbine, alternateur, transformateur). Il existe quatre grands types de centrales hydrauliques :

- **Les centrales de lac** : l'eau est captée par une série d'ouvrage dans les bassins en amont de la retenue puis stockée derrière un barrage. Elle est ensuite acheminée jusqu'aux turbines de la centrale en contrebas. Les centrales de lac permettent un stockage saisonnier de l'eau et d'assurer les surplus de la demande d'énergie en hiver.
- **Les centrales d'éclusée** : une retenue d'eau est créée grâce à un barrage. La réserve d'eau correspond à une période d'accumulation assez courte. Aux heures les moins chargées de la journée ou de la semaine, on reconstitue le stock. Ce type d'installation est utile durant les heures de plus forte consommation, en période de pointe.
- **Les centrales au fil de l'eau** : ce type de centrale ne nécessite pas de réservoir. Elle est placée directement sur le cours d'eau et produit une énergie de base, non modulable et non stockable injectée directement sur le réseau. L'électricité produite dépend du débit de l'eau qui traverse la centrale et varie donc en fonction de la météo et des saisons.
- **Les stations de transfert d'énergie par pompage** puisent, aux heures creuses, de l'eau dans un bassin inférieur, afin de remplir une retenue en amont (lac d'altitude). L'eau est ensuite turbinée en période de pointe.

Maturité

L'hydroélectricité est la seconde forme de production en France derrière l'énergie nucléaire. D'après l'ADEME, elle représentant 13 % de la production électrique française en 2009. Il s'agit d'une des plus anciennes productions électriques développées, et bénéficie de ce fait d'une très grande maturité technologique. En effet, la première turbine a été construite dès le milieu du XIXème siècle, et de nombreux barrages ont commencé à être construits en France dès l'entre-deux guerres.

Coûts

Le cout de l'hydroélectricité varie, comme pour toutes les autres sources d'énergie, en fonction de la technologie utilisée et des dimensions de l'installation. Pour de grosses installations, avec un bon rendement, l'électricité générée peut coûter moins de 15 € / MWh. Cependant, ce coût peut être jusqu'à 10 fois supérieur dans le cas de microcentrales.

La biomasse

La biomasse énergie correspond à la production d'énergie à partir du cycle de la matière vivante végétale ou animale. Il existe deux types de biomasse :

- la biomasse par combustion : les matières (bois, déchets végétaux) sont directement brûlés en produisant de la chaleur, de l'électricité ou les deux.
- la biomasse par méthanisation : les matières (fumier, boues de stations d'épuration, déchets ménagers, etc.) sont transformées en biogaz grâce à un processus de fermentation. Ce biogaz peut être ensuite utilisé directement, injecté sur le réseau de gaz ou brûlé afin d'être converti en chaleur et/ou en électricité.

À noter, que la biomasse est une énergie renouvelable, tant que sa consommation n'excède pas sa production.

Combustion de biomasse

Fonctionnement

Comme précisé plus tôt, le bois et/ou les déchets végétaux sont brûlés, générant ainsi de la chaleur. Cette chaleur peut être utilisée directement afin de chauffer une pièce, un bâtiment voire une zone de plus grande importance. Elle peut également être utilisée pour générer de l'électricité, en faisant tourner des turbines à l'aide de vapeur par exemple. Cette énergie est considérée comme renouvelable car les gaz à effet de serre émis lors de sa génération avaient été préalablement consommés lors de la croissance des matières consommées :

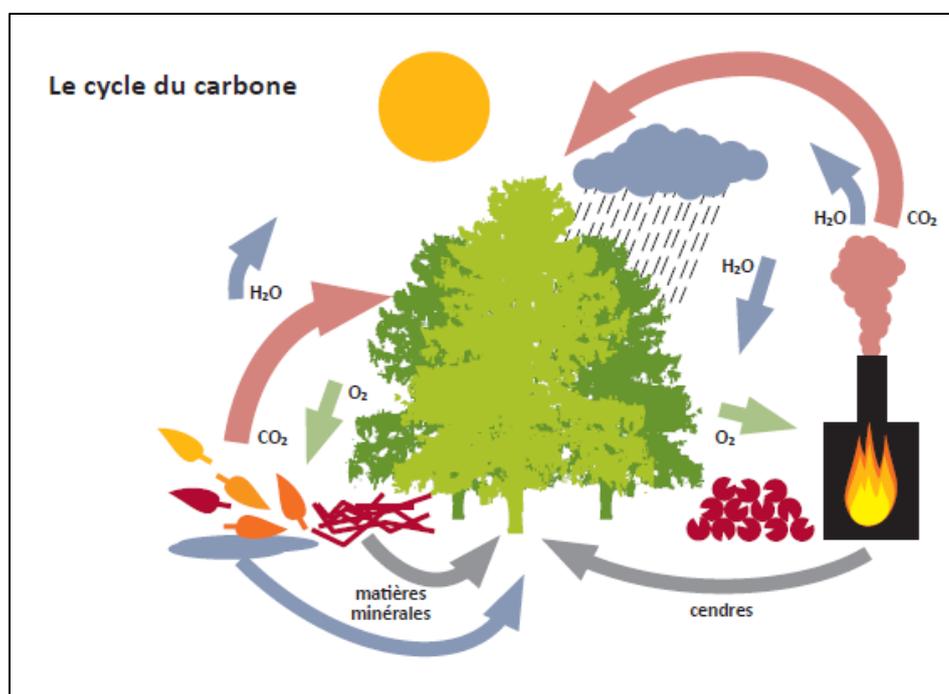


Figure 82 : Chauffage au bois et lutte contre les gaz à effet de serre (Source : ADEME)

De l'énergie peut également être générée par l'incinération de déchets ménagers : l'énergie fatale. Compte tenu de la teneur biomasse des déchets incinérés, 50 % de l'énergie produite par une usine d'incinération d'ordures ménagères est considérée comme renouvelable en France. L'incinération des déchets génère de la chaleur qui peut être utilisée directement et/ou convertie en électricité. Généralement, un « réseau de chaleur » est mis en place à l'échelle d'un quartier ou d'une ville afin de transporter la chaleur produite par l'incinérateur vers les principaux sites énergivores à proximité (industries, immeubles, etc.).

Au niveau domestique, la cheminée de base a évolué depuis les années 80 et a permis depuis le développement de différents appareils (poêles, inserts, chaudières, cuisinières) adaptés aux besoins du consommateur. Aujourd'hui, les poêles et les chaudières sont les appareils les mieux développés et les plus adaptés à la production de chaleur.

En cas de construction d'immeubles ou de lotissements, des systèmes de chauffages collectifs peuvent être mis en place au travers de chaufferies bois énergie. L'ADEME définit la chaufferie bois énergie comme « un local (bâtiment) dédié comportant une chaudière bois/biomasse dont la puissance est supérieure à 70 kW et un silo de stockage du combustible bois (plaquettes, granulés). Sous ces formes particulières, le bois a la faculté d'être transporté jusqu'au foyer de la chaudière de façon automatique et régulée. Les produits de combustion sont évacués par un conduit de fumée correctement dimensionné. » Ces systèmes collectifs permettent un approvisionnement direct et régulier ainsi qu'une réduction significative des coûts liés au chauffage. Des aides de l'état pour les porteurs de projets existent afin de favoriser le des systèmes de chauffages collectifs.

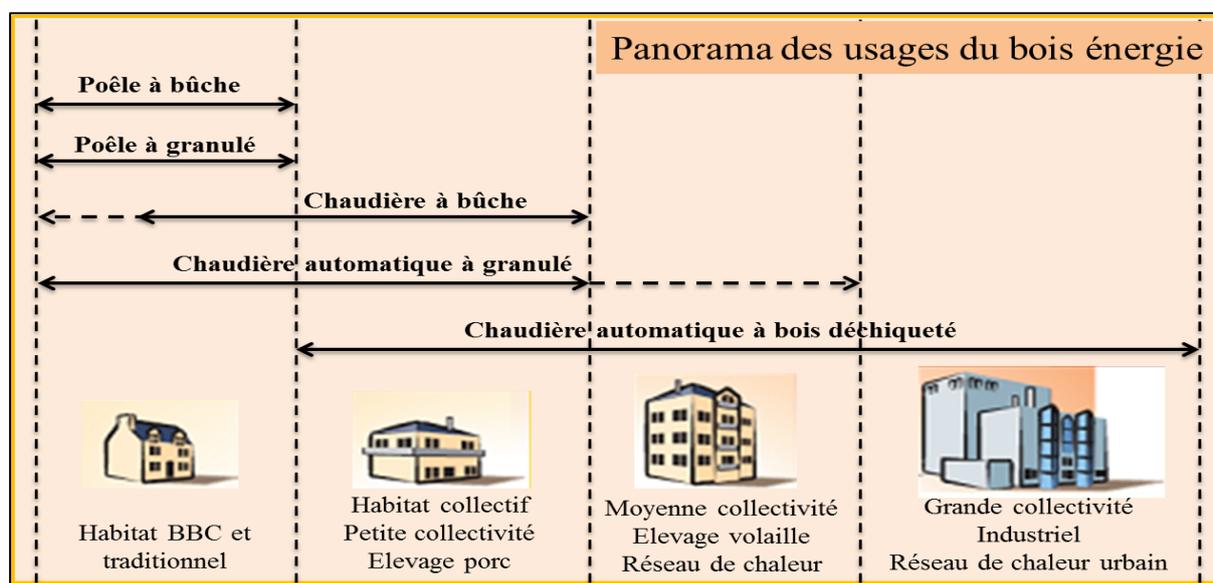


Figure 83 : Panorama des usages du bois énergie
(Source : AILE)

La maturité

Différentes technologies ont été développées au fil des ans et sont aujourd'hui commercialisées à très grande échelle. À titre d'exemple, en 2011, plus de 450 000 appareils de chauffage au bois individuels se sont vendus en France, dont plus de 50 % de poêles à bois et presque 45 % d'inserts, foyers fermés (source : ADEME / SER). Les chaufferies collectives ont commencé à se développer de

manière significative dans les années 2 000, avec presque 4 000 chaufferies collectives/tertiaires ou industrielles fonctionnant au bois installées en 2000 et 2010 pour une puissance cumulée d'environ 2 800 MW.

Le coût

Concernant les chaudières, une étude de la Commission de Régulation de l'Energie (CRE) réalisée en Avril 2014 a étudié les couts des énergies renouvelables en France métropolitaine. Bien que l'étude ne permette pas d'évaluer le cout de production de l'électricité et de la chaleur fournie, elle montre cependant que les projets ont un TRI après impôts de 5,5 à 9 % sur 20 ans.

Méthanisation

Fonctionnement

La méthanisation est un procédé de dégradation de la matière organique (lisier, fumier, purin, déchets verts, déchets agroalimentaires, cultures énergétiques...) en absence d'oxygène (fermentation dite anaérobie). Le processus de méthanisation permet la production de biogaz, composé de 50 à 70 % de méthane, grâce à un processus de fermentation des matières, appelées intrants. Ce biogaz peut soit être injecté directement sur le réseau de gaz, soit être brûlé afin de produire de la chaleur et/ou de l'électricité. Contrairement à la biomasse par combustion, la complexité du procédé et son coût empêchent son utilisation au niveau domestique, cependant la valorisation des intrants prend du sens dans le cadre de projets collectifs et/ou industriels.



Figure 84 : Exemple d'unité de méthanisation

Le développement en France est basé sur un développement progressif utilisant la codigestion de substrats différents (effluents d'élevage, déchets organiques et cultures) contrairement à d'autres pays, comme l'Allemagne, qui utilisent beaucoup de cultures énergétiques.

Maturité

La **biomasse par méthanisation** est une technologie récente puisque d'après l'ADEME, en janvier 2016, la France comptait un peu plus de 450 unités de méthanisation, dont une majorité d'entre elles « à la ferme ». Elle est cependant très développée à l'étranger, notamment en Allemagne qui compte plus de 9 000 installations. La faible utilisation de cultures énergétiques en France provoque des difficultés dans la réalisation des projets non seulement au niveau des risques en termes de continuité de l'approvisionnement en intrants, mais également par rapport à leur qualité et à leur pouvoir méthanogène. C'est pourquoi aujourd'hui, d'après l'ADEME, les modèles les plus performants sont la méthanisation à la ferme et les petits collectifs.

Le coût

Le coût d'une unité de méthanisation est très variable. Il dépend à la fois de la technologie utilisée, du type de production attendue (biogaz, électricité, chaleur, cogénération) et de la dimension de l'installation. De plus, ces technologies étant relativement récentes, les coûts sont dégressifs avec le temps. Une étude de l'Ademe Bourgogne menée en février 2013, évalue les coûts de la méthanisation en France entre 3 885 et 9 424 €/kW_{électrique} pour l'investissement et entre 544 et 2 015 €/kW_{électrique} pour le fonctionnement.

Potentiel sur le territoire françaisLe potentiel de développement de la **méthanisation** dépend des entrants possibles et des besoins thermiques en aval. Les matières présentant un pouvoir méthanogène sont les suivantes :

- Les déchets de collectivités :
 - tontes, feuilles, bio déchets des ménages
 - boue des stations d'épurations
- Les déchets de l'industrie agroalimentaire :
 - déchets de restaurateurs privés ou collectifs
 - restes ou invendus des moyennes et grandes surfaces de distributions, marchés
 - déchets d'abattoir
 - farine et fond de silo
 - sucreries
 - déchets de brasseries, vinasses, marc de raisin
- Les déchets agricoles :
 - fumiers, lisiers, fientes,
 - les résidus de cultures (pailles, tourteaux, pulpes, fanes, ...)

- les cultures (maïs ensilage, herbe ensilage, betterave, ...)
- algues
- Déchets de légumes ou de fruits, petit lait, huiles, graisses

La géothermie

Fonctionnement

Différents procédés permettent ainsi de récupérer la chaleur présente dans les sous-sols.

Les pompes à chaleur récupèrent l'énergie à **basse température (<30 °C)** afin de chauffer ou de rafraîchir des installations. Des capteurs enterrés verticalement ou horizontalement dans le sol permettent de récupérer la chaleur présente dans ces sols ou dans les nappes phréatiques. Dans le cas de capteur horizontal, une profondeur très faible (entre 0,6 et 1.2 m) suffit, cependant la surface nécessaire est importante et doit représenter 1,5 à 2 fois la surface à chauffer. Dans le cas d'installations verticales, l'emprise au sol est très faible, cependant la profondeur peut atteindre plusieurs dizaines ou centaines de mètres. L'installation de plusieurs sondes géothermiques sur un même site est possible afin d'obtenir un plus grand potentiel de chaleur terrestre.



Figure 85 : Capteurs horizontaux / Sondes géothermiques verticales / pompe à chaleur sur nappes ou sur aquifères

(Source : BRGM, SER)

Dans le cas de **températures basses et moyennes** (entre 30 et 150 °C), la chaleur contenue dans les aquifères profonds est directement utilisée afin de chauffer un quartier ou un ensemble de bâtiments. Un réseau de chaleur peut être utilisé afin de distribuer la chaleur dans les différents bâtiments. De la cogénération (électricité et chaleur) est possible, tout comme l'alimentation d'un réseau de chaleur.

Enfin, pour les hautes températures (>150 °C), la chaleur est utilisée afin de produire de l'électricité qui peut être utilisée localement ou injectée sur le réseau. En cas de source de vapeur, l'électricité est produite en injectant directement la vapeur dans une turbine. Si de l'eau suffisamment chaude est présente dans les sous-sols, elle est transformée en vapeur à l'aide d'un échangeur thermique. Sinon, un fluide (eau ou fluide secondaire organique) est chauffé à haute température avant de pouvoir générer la vapeur nécessaire au fonctionnement des turbines.

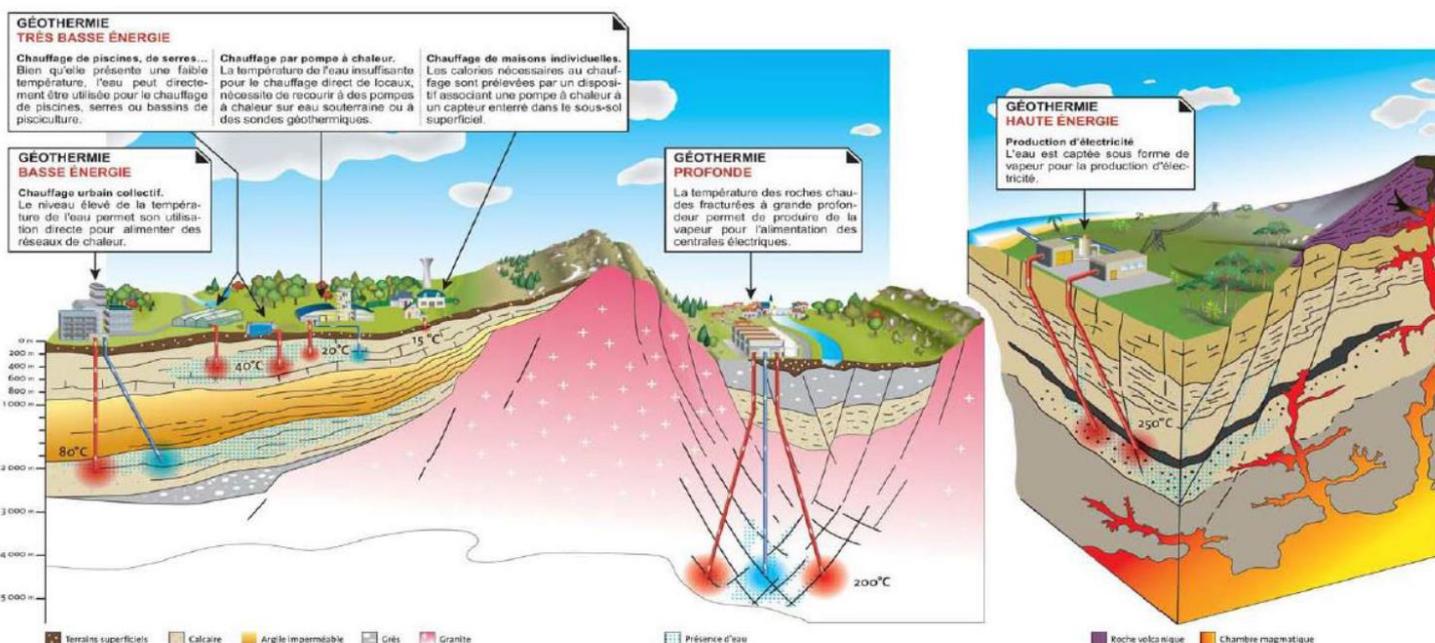


Figure 18 : Synthèse des techniques de géothermie
 (Source : BRGM, ADEME)

Maturité

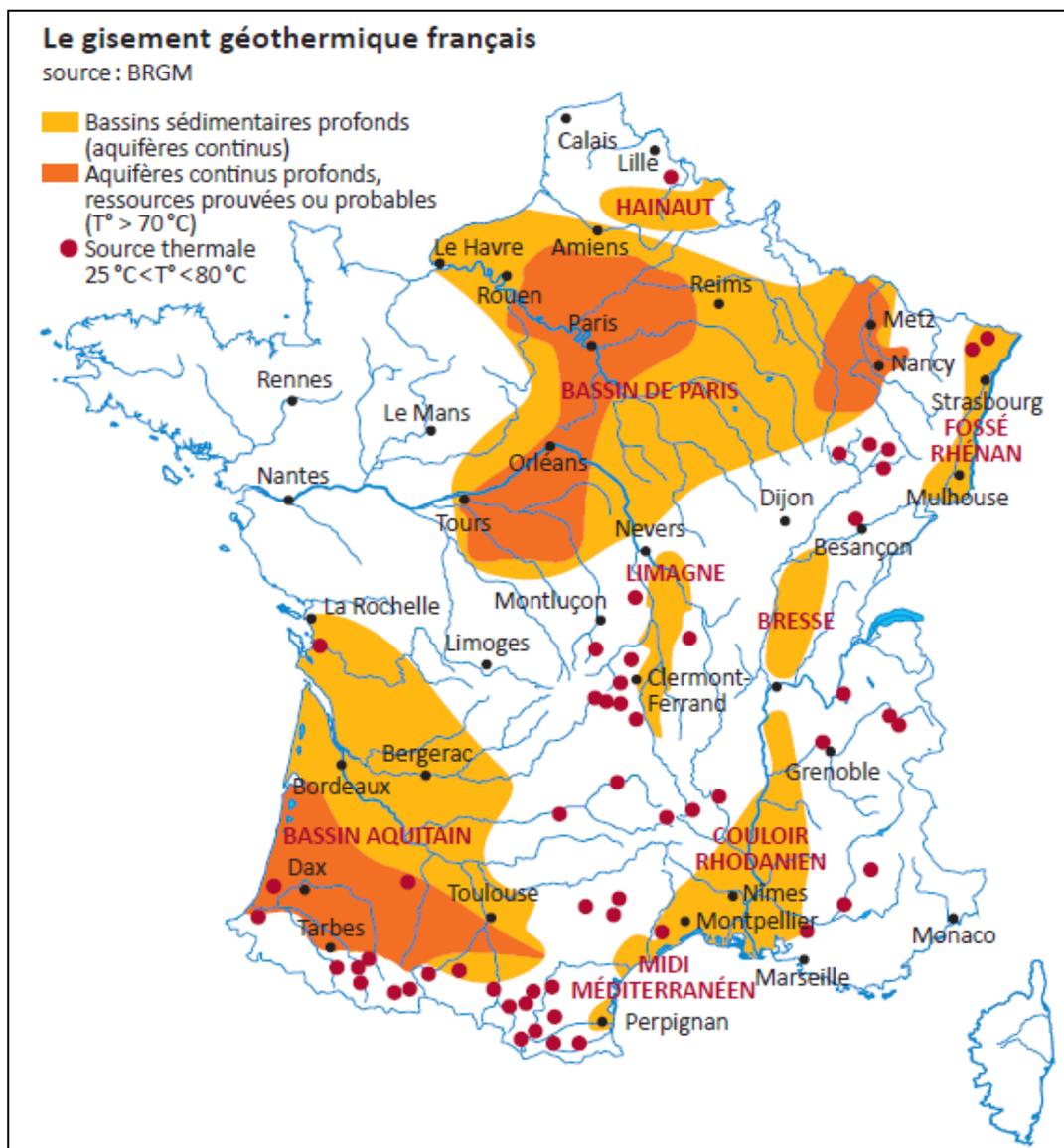
En France, la géothermie représente une puissance installée de plus de 2 300 MW_{thermiques} et une production de chaleur géothermique de 3 592 GWh en 2009. D'après l'AFPAC, près de 130 000 pompes à chaleur se sont vendues entre 2002 et 2011. Ainsi, il s'agit d'une technologie mature et, depuis plus de 10 ans, de nombreux acteurs reconnus se sont développés sur tout le territoire.

Coûts

Avec un coût compris entre 70 et 185 € / m² en fonction de la technologie choisie, un système géothermique coûte plus cher à mettre en place qu'un système de chauffage classique. Les coûts de fonctionnement sont cependant très limités (2,3 à 3,5 € / m²) pendant la durée de vie de l'installation, pouvant aller de 15 ans pour une pompe à chaleur à 40 ans pour des capteurs enterrés (source : ADEME).

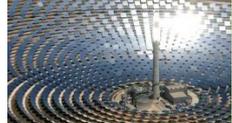
Potentiel sur le territoire français

D'après le BRGM et le SER, la France dispose d'un gisement géothermique en profondeur peu favorable. Notre pays se situait en 2010 au 3^{ème} rang européen en termes de capacité installée pour la production de chaleur.

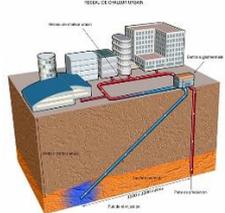
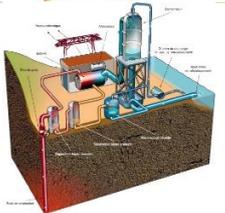


Carte 2 : Le gisement géothermique Français (Sources : BRGM, SER)

Synthèse technique

Energie	Illustrations	Avantages	Inconvénients
Efficacité énergétique du bâtiment			
Mesures Passives		Ne consomment pas d'énergie directement, et est bon marché	Dépendent des conditions météo et doivent être pensées tôt dans le projet d'un bâtiment
Pompe à chaleur		Bonne performance, COP ¹³ environ 4	Prix
L'énergie solaire			
Solaire thermique		Capacité de stockage dans un ballon d'eau chaude	Intermittente : fluctuations saisonnières, jour/nuit, et quotidienne selon la présence de nuage ou d'ombres
Solaire thermodynamique		Selon les technologies, des capacités de stockage de 0 à 12 heures	
Solaire photovoltaïque		Production instantanée	
L'énergie éolienne			
Grand éolien		Production instantanée; Rentabilité; Production importante	Intermittente : fluctuations saisonnières et quotidiennes; Gros investissements
Petit éolien		Production instantanée	Intermittente : fluctuations saisonnières et quotidiennes; Rentabilité très faible
L'énergie hydraulique			
Centrale de lac		Capacité de stockage de quelques centaines d'heures; rentabilité élevée	Investissements importants

¹³ Coefficient de performance. Si = 4, pour 1kWh fournit au compresseur 4kWh en sortie du condenseur.

Energie	Illustrations	Avantages	Inconvénients
Centrale d'éclusee		Capacité de stockage de quelques heures; Bonne rentabilité	Investissements importants
Centrale au fil de l'eau		Production instantanée; rentabilité variable	Intermittente: fluctuations saisonnières; Rentabilité variable
La biomasse			
Biomasse par combustion		Capacité de stockage élevée (dépend de la dimension de l'entrepôt); Rentabilité élevée	Production continue; besoin d'approvisionnement régulier
Biomasse par méthanisation		Capacité de stockage long; Aides de l'état	Manque de maturité et de recul de la filière; Complexité de l'exploitation (approvisionnement, main d'œuvre, etc.)
La Géothermie			
Géothermie basse température		Production instantanée; chauffage & refroidissement ; Bonne rentabilité	Investissement important; Peut connaître des variations saisonnières
Géothermie moyenne température		Bonne rentabilité si le gisement est présent ; Indépendant des conditions météo	Investissement important
Géothermie haute température		Bonne rentabilité si le gisement est présent ; Indépendant des conditions météo	Investissement important
Réseau de Chaleur			
Réseau de chaleur		Sureté ; Gestion efficace à grande échelle des énergies renouvelables.	Investissement à long terme

Synthèse des coût des différentes énergies

Le LCOE (Levelized Cost Of Energy) ou coût actualisé de l'énergie est le prix complet (investissement initial, maintenance, exploitation, etc...) d'une énergie sur la durée de vie de l'équipement produisant cette énergie.

Ce coût peut être calculé de la façon suivante :

$$LCOE = \frac{cost}{electricity} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

- I_t : Investissement à l'année t
- M_t : Dépense en Opérations et maintenance à l'année t
- F_t : Dépense de fioul à année t
- E_t : Production énergétique à l'année t
- i : Taux d'actualisation
- n : Durée de vie de l'équipement

L'étude « *Coûts des énergies renouvelables en France* » éditée par l'ADEME en 2016 ainsi que les résultats des derniers appels d'offres de la CRE donnent le LCOE de différentes technologies :

	Coût énergétique [€/MWh]
Cogénération biomasse	48 - 66
Solaire thermique collectif	104 - 209
Pompe à chaleur géothermique collective	56 - 114
Biomasse collective	64 - 110
Méthanisation	110 - 156
Photovoltaïque toiture industrielle (AO CRE 4eme période)	85,4
Photovoltaïque au sol (AO CRE 4eme période)	62,7
Ombrières photovoltaïques (AO CRE 4eme période)	83,8
Eolien Onshore (AO CRE 1ere période)	65,4
Petite hydroélectricité (AO CRE 1ere période)	81,2
Eolien Offshore (AO CRE 1ere période)	150
Electricité réseau	145
Chaleur réseau	67,5

Tableau 5 : Récapitulatif du coût énergétique de différentes filières d'énergies.

(Sources ; ADEME, CRE)

Partie 6 : Des exemples contemporains d'aménagement urbain durable

A travers les réflexions des chapitres précédents, il a été possible de dresser un tableau des différents principes d'aménagements urbains et d'infrastructures intégrant des critères positifs à la biodiversité, à la préservation des ressources naturelles (eau, sols, etc.), au paysage et au cadre de vie, à la maîtrise de l'énergie et au développement des énergies renouvelables, dans la perspective de construire ou reconstruire des « villes durables ». Mais concrètement, existerait-il, dès lors, des espaces urbains contemporains que l'on pourrait ainsi qualifier de durables ? Nos travaux nous ont amené à analyser plusieurs écoquartiers existants afin d'en présenter un retour d'expérience (cf. tableau ci-dessous). À l'étranger, les exemples du quartier de Vauban et du quartier de Bedzed sont très convaincants et datent déjà d'au moins une dizaine d'années. En France, les quartiers de Courtil-Brécard, de la Chênaie Bottière, de Beausoleil ou de La Verderie et Maison Neuve sont aussi éclairants.

Nom	Commune
Quartier Courtil-Brécard	Saint-Marc, agglomération de Saint-Nazaire
Quartier Sautron (projet)	Saint-Nazaire
Quartier Vauban	Freiburg-In-Brisgau (Allemagne)
Quartier BEDZED	Suddon (Angleterre)
Quartier de la Chênaie Bottière	Nantes
Lotissement de La Biche	Feytiat
Quartier Beausoleil	Vannes
Quartier La Verderie	Lons, Agglomération de Pau
Quartier Maison Neuve	Guérande

Quartiers étudiés

Nous présentons ici des monographies de deux écoquartiers étrangers qui existent depuis plus de 15 ans et pour lesquels nous avons de bons retours d'expérience. Une reportage photo des autres quartiers est proposé.

Le quartier Vauban

La ville allemande de Fribourg a transformé une friche militaire en un quartier durable exemplaire. La construction du quartier Vauban est un cas d'école couramment cité pour sa prise en compte de l'environnement et pour sa politique « sans voiture ». Une participation citoyenne forte a caractérisé la mise en œuvre de cet aménagement.

Les objectifs qui sont ressortis de cette planification sont multiples, ils prennent en compte une grande partie des cibles du développement durable :

- La protection de la nature : préservation du biotope de la petite vallée et du ruisseau, conservation des arbres les plus anciens.
- La mixité sociale.
- La mobilité : priorité des piétons, des cyclistes et des transports publics, offre de service et d'emploi.
- La diversité des fonctions : offre de commerces et de services, offre de services publics (garderies, école), offre d'emplois in situ.
- Un cadre de vie de qualité : création d'espaces verts, diversité architecturale.
- Les économies d'énergie et les énergies renouvelables : équipement d'un réseau de chaleur à partir d'une centrale de cogénération, construction de logements « basse consommation d'énergie ».

En matière d'énergie et de lutte contre le changement climatique, le quartier Vauban correspond en de nombreux points au modèle de développement urbain durable qui pourrait permettre d'atteindre des objectifs ambitieux de division par quatre des consommations d'énergie, à une petite échelle. Les urbanistes et les architectes y ont combiné la densité et la diversité des fonctions (habitat, commerces, école, bureaux...), la performance énergétique des bâtiments, l'orientation au sud, le développement des énergies renouvelables (solaire, bois et biogaz) et la mobilité durable (tramway, car-sharing, pistes cyclables...).

Des bâtiments à basse et très basse consommations d'énergie

Grâce à un cahier des charges restrictif, l'aménagement final est particulièrement dense - environ 13 000 habitants par km² vivent dans des immeubles collectifs de trois à cinq étages- constitué de bâtiments à basse consommation d'énergie, de constructions passives et, même, de constructions à énergie positive (voir figure suivante).

Les constructions selon le standard « habitat à basse consommation d'énergie »

Tous les bâtiments du quartier Vauban répondent au minimum à un standard « habitat à basse énergie » qui correspond à une consommation maximale de chauffage comprise entre 50 kWh et 65kWh/m²/an, soit une performance 30 % plus restrictive que la réglementation allemande. Ce groupe de bâtiments compacts qui représente 65 % environ des constructions est quatre fois moins consommateur que les logements existants antérieurs à 1984.

Les constructions selon le standard « Passiv-Haus »

Le premier bâtiment de logements collectifs correspondant à des critères de « Passiv Haus » a été construit à Fribourg, dans le quartier Vauban. C'est une initiative citoyenne qui a permis le développement du concept « Passivhaus Wohnen und Arbeiten »¹⁴. Environ un dixième des logements du quartier ont été édifiés selon ce standard. Il a ainsi été prouvé qu'il est possible de construire des logements dont les besoins en chauffage n'excèdent pas 15 kWh/m²/an et dont les surcoûts par rapport à un logement neuf conventionnel allemand sont seulement de 7 % (Darmstadt Institut).

Un habitat passif est par définition un logement qui ne nécessite pas de chauffage actif conventionnel tel un chauffage central. Ce type de construction est qualifié de « passif » car il permet de maintenir un niveau de température confortable essentiellement grâce aux apports du rayonnement solaire, à l'isolation, au système de ventilation et aux gains internes. En général, dans les maisons passives individuelles, l'apport de chaleur restant se fait grâce au préchauffement de l'air délivré par le système de ventilation. Dans ce cas là, une petite cogénération fournit l'appoint de chauffage. Pour bénéficier du label passiv Haus, la construction doit afficher une consommation d'énergie de chauffage inférieure à 15 kWh/m². Or, les logements « Passiv Haus wohnen und arbeiten » respectent ce quota. Durant les deux années qui suivirent la construction, la demande de chauffage n'a pas excédé 13 kWh/m²/an. Les principes majeurs de cette forme de construction résident en 7 points :

- l'isolation thermique (l'enveloppe de ces bâtiments est au moins deux fois plus isolante que celle d'un bâtiment conventionnel),
- l'orientation au sud,
- le système de ventilation (l'air nouveau est acheminé vers l'immeuble après avoir récupéré dans le sol quelques calories, il est ensuite préchauffé à l'aide d'un échangeur de chaleur qui permet de ponctionner les calories de l'air chaud qui est évacué),
- les gains internes,
- les énergies renouvelables (60% de l'eau chaude est fournie par les panneaux solaires thermiques disposés sur le toit des immeubles. Des panneaux solaires photovoltaïques ont également été installés sur les bâtiments et utilisés comme visière contre le soleil d'été. Un système de collecteur des excréments et de l'urine dans un digesteur afin de produire du biogaz).

Les résultats de ces constructions passives sont très satisfaisants car, comme on l'a indiqué auparavant, la demande en chaleur n'excède pas 13 kWh/m²/an, la demande en eau chaude est de 23 kWh/m²/an mais rappelons qu'elle est fournie à 60 % grâce à l'énergie solaire. L'électricité nécessaire pour la ventilation représente 9 kWh/m²/an et le biogaz produit s'évalue à 5 kWh/an/m². Au total, un logement d'un immeuble de standard « Passivhaus Wohnen und Arbeiten » consommerait, tout compris, 53 kWh/m²/an alors que le taux d'un logement neuf se situerait plutôt aux alentours de 200 kWh/m²/an.

¹⁴ Traduction de l'allemand : « la maison passive pour habiter et pour travailler »

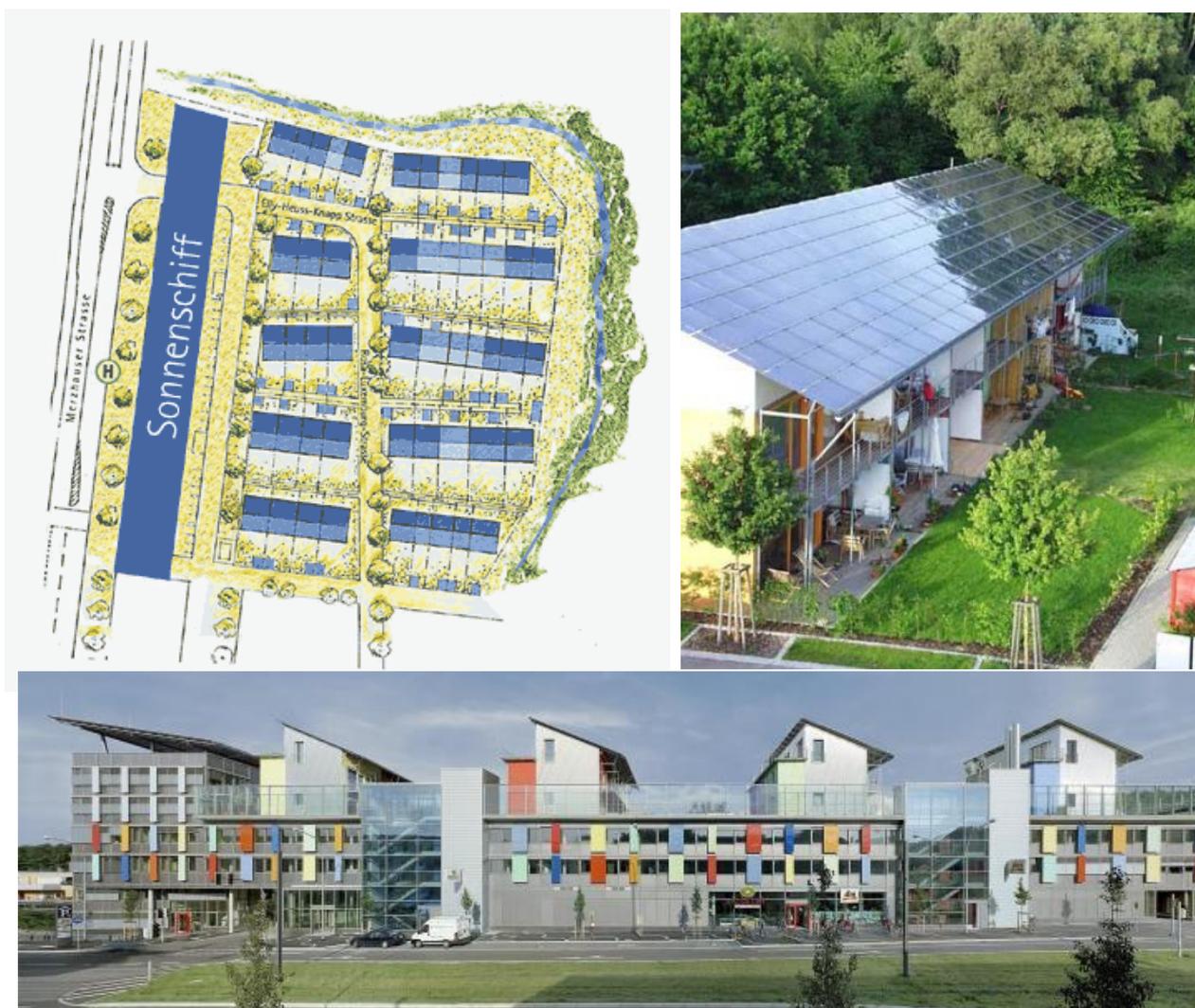
Plan de Vauban, quartier durable de Freiburg-im-Brigau

Mobilité et consommation d'énergie dans les bâtiments



Les bâtiments à énergie positive :

La partie Nord-Ouest du quartier Vauban se nomme le « village solaire ». C'est l'architecte Rolf Disch qui a enclenché et porté cette initiative d'un montant total de 23 millions d'euros. Deux hectares du quartier Vauban ont été investis par des bâtiments à énergie positive qualifiés de « Plusenergiehaus » par leur concepteur. L'opération du « Solarsiedlung » (le village solaire) s'est effectuée en deux temps. Dans un premier temps, cinquante-huit logements ont été construits selon les principes des « Plusenergiehaus ». Et dans un second temps, le navire solaire « Sonnenschiff » est sorti de terre.



La caractéristique d'un bâtiment « Plusenergiehaus » est de produire l'énergie nécessaire à son fonctionnement grâce aux énergies renouvelables et plus encore, de produire un surplus d'énergie qu'il est possible de revendre. En empruntant le porche sous le « sonnenschiff » qui permet d'aller de la rue principale, *Merzhauser strasse*, aux habitations « Plusenergiehaus », le concept de maison positive est tout de suite apparent. L'ensemble des maisons d'habitation est équipé d'une toiture photovoltaïque intégrée. Ainsi, chaque maison n'est autre qu'une centrale solaire d'une puissance de 3 à 12 kW en fonction de la taille du toit. Les bâtiments sont construits sur le principe de la maison passive. Ces maisons mitoyennes de deux ou trois étages sont très bien protégées thermiquement (40 cm de laine

de verre, suppression des ponts thermiques...), orientées parfaitement au sud, et possèdent une ventilation avec échangeur de chaleur...

Le Sonnenschiff, un bâtiment construit perpendiculairement aux lignes de maisons de solarsiedlung fait ainsi écran entre le village solaire et la rue *Merzhauser*. Ce grand bâtiment - 120 m de long pour 20 m de haut – accueille des bureaux, des commerces et des logements sous le même toit...« solaire », il va de soi. En effet, au rez-de-chaussée on trouve une supérette *Al Natura*¹⁵, une cafétéria, etc. tandis que les deux étages du dessus sont consacrés à l'activité de bureaux. L'Öko Institut¹⁶ y a des locaux, par exemple. Enfin, neuf maisons d'habitation « Plusenergiehaus » sont réparties sur le toit. La demande en énergie des bureaux et des commerces est également très basse mais pas autant que pour les « Plusenergiehaus » : elle atteint de 10 à 20 kWh/m²/an selon la situation du local dans le bâtiment. En effet, hormis les habitations en terrasse, ce grand bloc n'est pas orienté idéalement pour recevoir l'énergie solaire passive. Toutefois cette lacune est quelque peu compensée par la compacité du bâtiment, il y a de cette manière moins de pertes de chaleur que dans un bâtiment filiforme.

La demande restante en chauffage du « Solarsiedlung » est alimentée par 500 m² de panneaux solaires thermiques disposés sur le toit du navire solaire ainsi qu'une centrale de cogénération à base de copeaux de bois. Par ailleurs, environ 550 MWh sont produits annuellement grâce aux panneaux photovoltaïques de la section solaire de Vauban.

Un réseau de chaleur au bois

Exception faite des maisons passives et positives qui n'ont plus véritablement de besoins en chauffage, les bâtiments du quartier Vauban sont chauffés grâce à un réseau de chaleur équipé d'un système de cogénération. Cette centrale, alimentée à 80% par des copeaux de bois et à 20 % par du gaz naturel, produit, de façon combinée, de la chaleur et de l'électricité avec un très bon rendement de 75 %. Cette production d'électricité associée à celle générée par les toitures photovoltaïques permet de couvrir 65 % de la demande d'électricité du quartier.



¹⁵ Supermarché vendant essentiellement des produits naturels et biologiques.

¹⁶ Société de consulting en environnement et développement durable à l'échelle européenne

Un quartier à mobilité durable

Les porteurs de projet ont décidé de réaliser un quartier contraignant pour les déplacements en automobile qui favorise les transports en commun et les modes « doux » (vélo, marche). Le tramway est la colonne vertébrale du quartier, il relie le quartier au centre-ville en cinq à dix minutes. Les piétons et les cyclistes sont rendus prioritaires par rapport aux automobilistes. La circulation y est limitée à 30 km/h sur l'axe central la *Vaubanallee* et à 10 km/h dans l'ensemble des rues desservant les résidences. Les deux seules voies sur lesquelles il est autorisé de circuler à 50 km/h sont en périphérie du quartier *Merzhauser strasse* et *Wiesental strasse* (voir carte suivante).

Parallèlement, dans la plus grande partie du quartier, il n'est pas possible de se garer sur la voirie. Un nouveau concept de stationnement y est appliqué. Les aménageurs ont pris le parti de renoncer aux garages et places de stationnement individuelles devant les logements. Pour les habitants qui n'ont pas renoncé à posséder une voiture – la majorité d'entre eux en fait - des places de parking collectif à étage en périphérie du quartier sont proposées à l'achat en même temps que les logements. Enfin, plusieurs véhicules de car-sharing sont parqués dans le quartier.

A l'échelle d'un quartier, Vauban réunit les meilleures conditions pour atteindre les objectifs de réduction des consommations d'énergie et des gaz à effet de serre que le GIEC préconisait dans son dernier rapport sur le changement climatique. Les aménageurs ont su traiter aussi bien les questions d'architecture, d'urbanisme, de production d'énergie ou de mobilité. Le seul bémol de cette opération concerne l'appropriation des lieux par les habitants. En effet, il semble que les objectifs de mixité sociale n'aient pas été atteints : le quartier a été investi par une certaine catégorie de la population (« écologistes » et classes moyennes « intellectuelles »).

Le quartier de Bedzed (Sutton)

Le quartier Bedzed (Beddington Zero Energy Development) est le premier et le plus important quartier « zéro émission de carbone » du Royaume-Uni. Il a été mis en œuvre par Peabody Trust, une association de promotion immobilière de Londres, et Bio régional Development Group en partenariat avec l'architecte Bill Dunster et les Ingénieurs de construction d'ARUP qui ont mis au point le concept ZED (Zero Energy Development).

Ce quartier, à 25 min du cœur de Londres en train, est un modèle de développement urbain durable qui regroupe, dans un aménagement dense, 82 logements et 2 500 m² de locaux de commerces et de bureaux. Tout a été pensé pour y réduire les besoins en énergie et en eau, pour faciliter le recyclage des déchets et des eaux usées, pour limiter les déplacements en automobile des habitants, mais aussi pour réduire l'énergie et les pollutions liées à la construction du quartier et à son fonctionnement. L'accent a notamment été mis sur l'énergie grise liée à l'alimentation.

Les architectes ont conçu des bâtiments très économes en énergie orientés au sud. La chaleur solaire passive et la lumière naturelle sont captées à travers des verrières en double vitrage qui s'étendent sur trois étages. Combiné à une isolation renforcée et un système de ventilation passive (cheminées colorées), cela a permis d'éviter l'installation d'un chauffage central. Les besoins en chauffage sont dix fois moins importants à BEDZED que dans des logements conventionnels (source : Bio Regional).

L'énergie consommée sur place provient à 100 % de ressources renouvelables. Une installation de cogénération de 130 KW fonctionnant à partir de déchets de bois fournit la demande en chaleur et en électricité. 777 m² de panneaux photovoltaïques sont installés sur les toits des bâtiments et intégrés dans les verrières. Cela produit suffisamment d'électricité pour alimenter 40 véhicules. Des bornes de charge pour voitures électriques équipent certaines places de parking. Les véhicules automobiles sont parkés en frontière du quartier, dont le cœur reste piéton. D'ailleurs, seulement 84 places de parking sont disponibles contre 180 pour une opération immobilière standard de même ampleur. La conception du quartier a, de manière plus générale, fait l'objet d'un plan de mobilité pour réduire les besoins en déplacements, promouvoir les transports publics (proximité de la gare) et offrir des alternatives à l'automobile. Le quartier est multifonctionnel. Les résidents peuvent habiter et avoir leur emploi sur le même site – c'est une solution optimisée pour les professions libérales. Le quartier est équipé en loisirs (bar, salle de sport, centre culturel) et propose les services d'une crèche. Les commerces alimentaires les plus proches étant à 2 km, les résidents sont incités à faire leurs courses « en ligne » par internet. Les produits sont alors livrés à plusieurs familles en même temps afin de limiter le nombre de déplacements. Ce système de livraison coordonnée est valable pour les produits de supermarché et pour les produits frais locaux. Un système de voiture partagé (ZED cars) permet aux habitants de se libérer de la voiture tout en y ayant accès si un trajet le nécessite. Ce plan de mobilité devrait permettre d'éviter l'émission de 1,3 tonnes de CO₂ par habitant par an.

Nous nous attardons sur cet exemple précisément car lors de la conception de ce quartier, les porteurs de projet ont considéré l'impact des consommations indirectes. Produire et transporter les aliments représente une part importante de l'énergie induite par le fonctionnement des territoires. Le

projet Bedzed a intégré cette variable afin qu'un réseau de producteurs de produits frais locaux approvisionne en aliments les résidents. D'autre part, des petites parcelles agricoles jouxtent les habitations et certains des habitants cultivent leurs propres fruits et légumes.

Aussi, les matériaux de construction ont été sélectionnés dans le but de minimiser les impacts environnementaux. Les structures en acier et en bois ont été récupérées sur des chantiers de démolition. Plus de la moitié des matériaux utilisés proviennent d'une zone d'un rayon de 35 miles afin de minimiser le transport de marchandises.

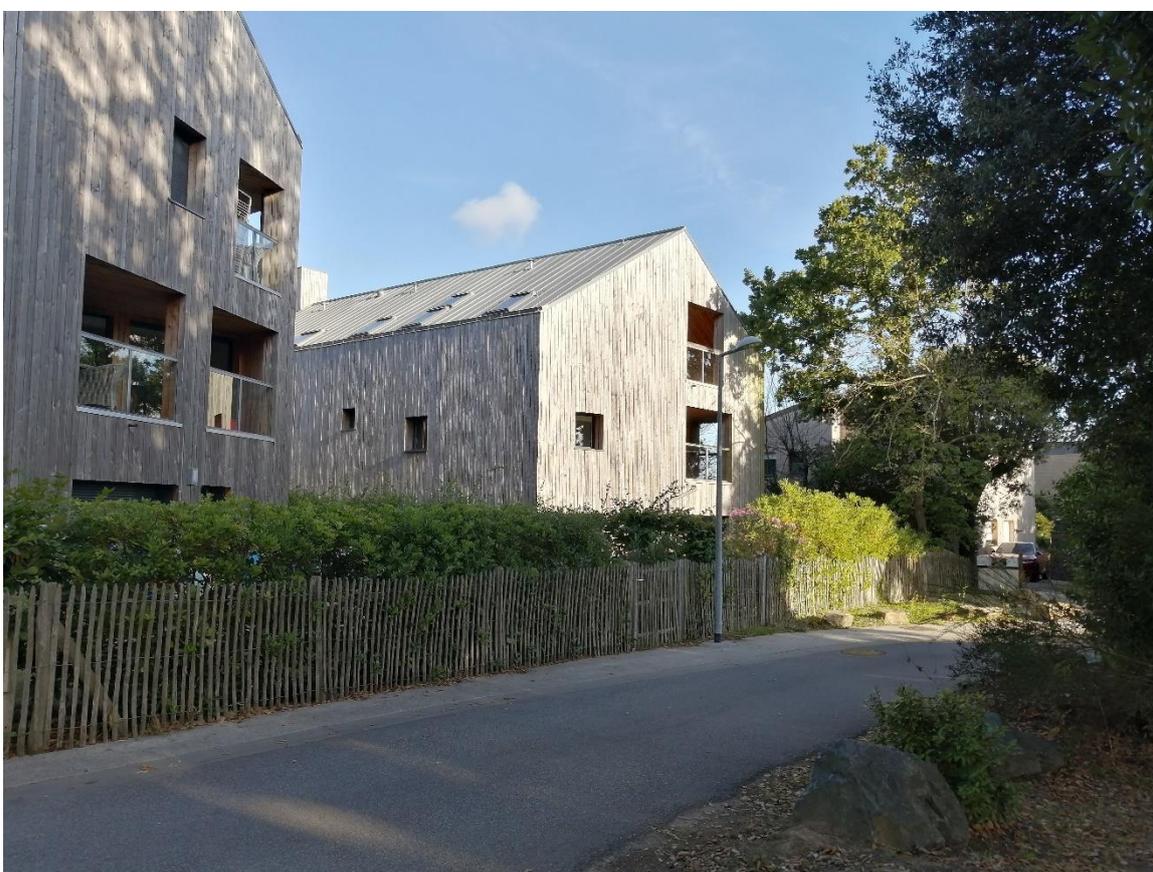


Le quartier Beausoleil à Vannes





Le quartier Courtil-Bécard à Saint-Nazaire





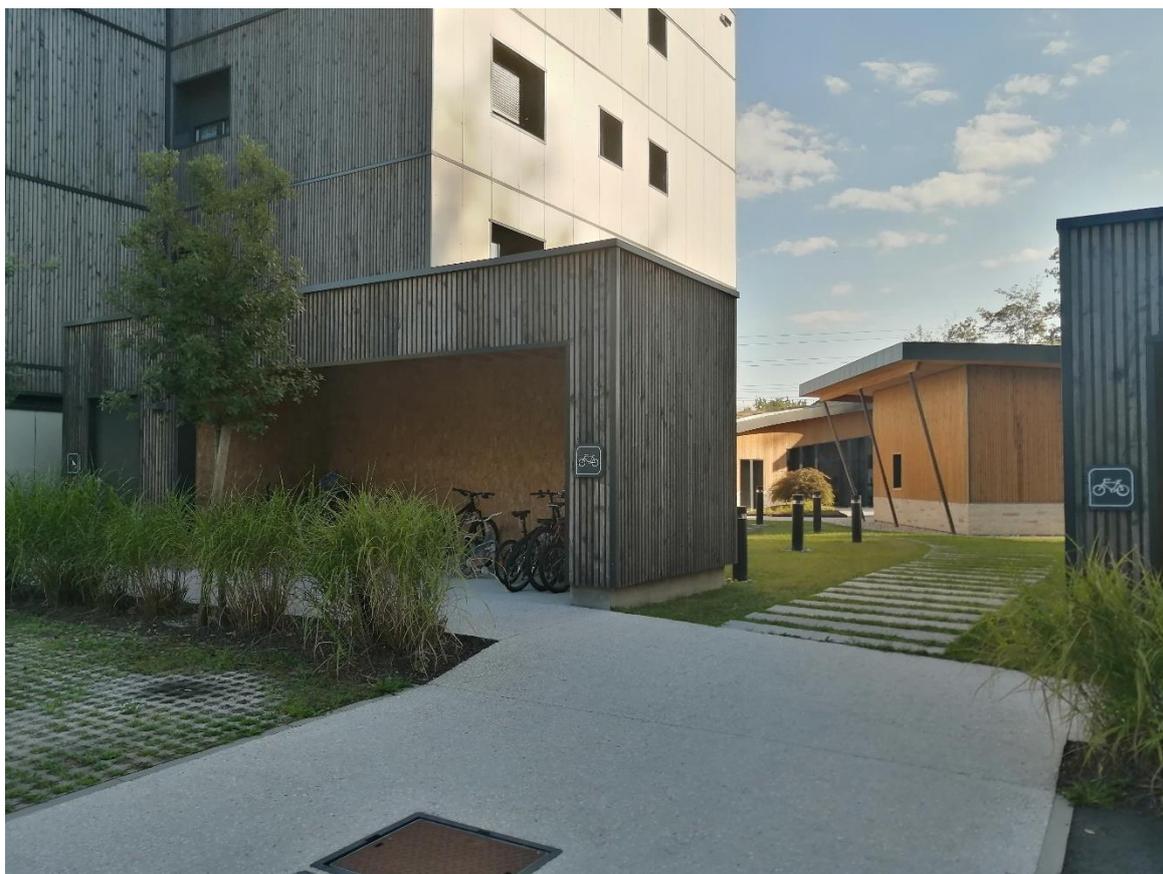
Le quartier La Bottière-Chênaie à Nantes







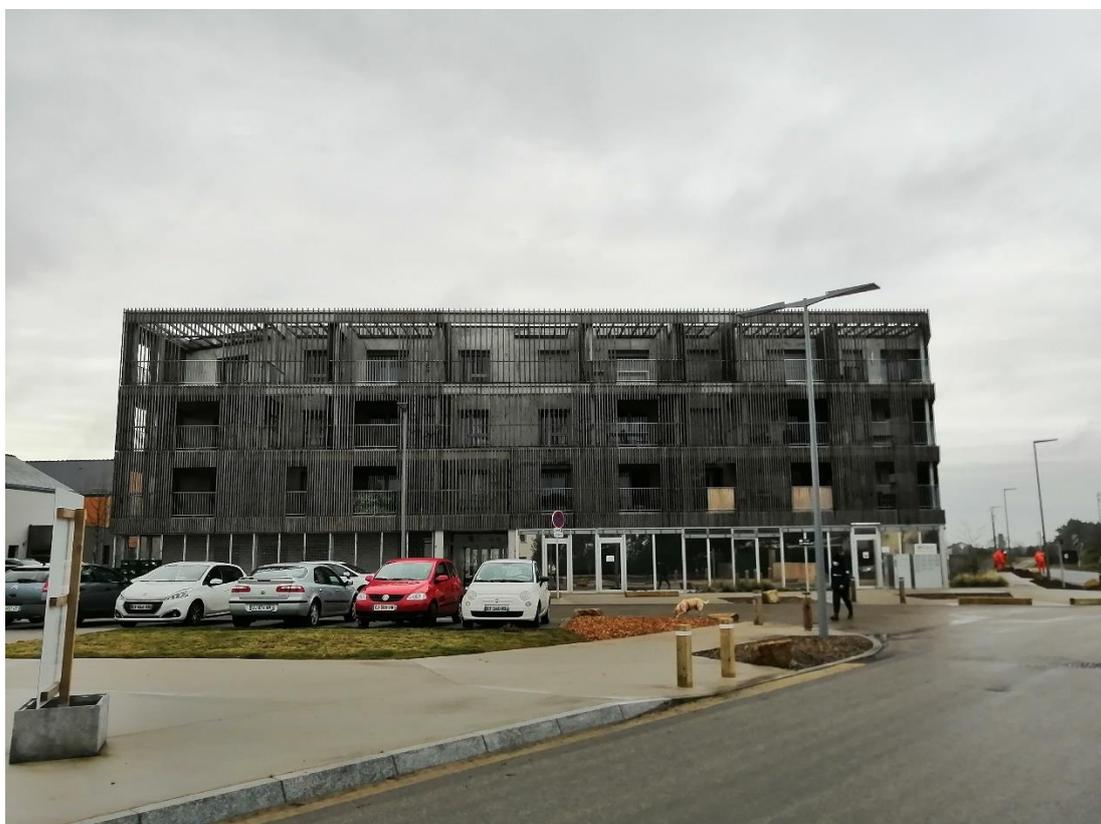
Le quartier La Verderie à Pau







Le quartier maison neuve à Guérande







Bibliographie

Bibliographie générale

- Poujade, Gérard (1960-....), Un éco-quartier dans une commune de moins de 2000 habitants, c'est possible ! Le Séquestre-Tarn, un pas en avant vers le durable / Gérard Poujade, Albi : un Autre reg'art, impr. 2009
- Ordre des géomètres-experts (France), Association des maires de France et des présidents d'intercommunalité - Éco [plus] quartier [égal] quartier durable [Texte imprimé] : sensibilisation et approche méthodologique : pourquoi, comment / Ordre des géomètres-experts ; AMF, Association des maires de France, Paris : Publi-Topex, [2010]
- Ville durable éco-quartier [Texte imprimé] : palmarès ... / Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer ; [direction de l'ouvrage Luciana Ravanel] - Archives d'architecture moderne ; Paris, [200.]-2009
- La nature en ville : comment les pratiques aménagistes s'adaptent en continu à l'impératif écologique. Etude à partir de cinq projets du Grand Ouest français - Sabine ELMOUALY Doctorante CIFRE, Université Rennes 2 & Agence Aubépine, Rennes Guy BAUELLE Professeur d'aménagement de l'espace - Urbanisme, Université Rennes 2 Président de l'Institut d'aménagement et urbanisme de Rennes (IAUR) guy.baudelle@univ-rennes2.fr Laurence LE DU-BLAYO Maître de conférences HDR en géographie Université Rennes 2 & ESO-Rennes,UMRCNRS6590
- Marine Legrand. La mise en ordre écologique des parcs urbains. Savoirs, pratiques et paysages : Exemple d'un grand parc francilien. Anthropologie sociale et ethnologie. Muséum national d'Histoire Naturelle (Paris, France), 2015. Français. (tel-01310791)
- Les urbanistes et l'approche écologique de la nature en ville : une conciliation possible ? Laure Cormier, Ecole d'Urbanisme de Paris, Université Paris-Est Créteil Val de Marne / Lab'urba
- La ville végétale : Une histoire de la nature en milieu urbain (France, XVIIe-XXIe siècle), Charles-François MATHIS, Emilie-Anne PÉPY, Champ Vallon - 376 pages
- La nature en ville : l'improbable biodiversité Paul Arnould, Yves-François Le Lay, Clément Dodane et Inès Méliani, Dans Géographie, économie, société 2011/1 (Vol. 13), pages 45 à 68
- Alban Bourcier, « Le paysage au service de la biodiversité dans la ville durable », Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Hors-série 14 | septembre 2012, mis en ligne le 15 septembre 2012, consulté le 28 août 2019. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/12390> ; DOI : 10.4000/vertigo.12390
- Restaurer la nature pour atténuer les impacts du développement : Analyse des mesures compensatoires pour la biodiversité, Gilles Martin, Nathalie Frascaria-Lacoste, Julien Hay, Harold Levrel, Sylvain Pioch Quae, 9 juil. 2015 - 320 pages

- Fabien Roussel, « Valoriser l'écologie pour légitimer le paysage ? », EchoGéo [En ligne], 47 | 2019, mis en ligne le 24 avril 2019, consulté le 28 août 2019. URL : <http://journals.openedition.org/echogeo/17344> ; DOI : 10.4000/echogeo.17344
- Christophe Schwartz, Geoffroy Séré, Marie Stas, Anne Blanchart, Jean-Louis Morel, et al.. Quelle ressource Sol dans les villes pour quels services et quels aménagements ? Innovations Agronomiques, INRA, 2015, 45, pp.1-11. (hal-01282566)
- Robin Chalot, « Écologie et urbanisme : comment les experts du vivant peuvent-ils contribuer à la conception du cadre urbain ? », VertigoO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Débats et Perspectives, mis en ligne le 18 novembre 2015, consulté le 28 août 2019. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/16561> ; DOI : 10.4000/vertigo.16561
- Pauline Fabre, Anne-Caroline Prévot et Luc Semal, « Le Grand Paris, ville durable ? Limites pour la biodiversité urbaine dans un projet de métropolisation emblématique », Développement durable et territoires [En ligne], Vol. 7, n°1 | Avril 2016, mis en ligne le 11 avril 2016, consulté le 28 août 2019. URL : <http://journals.openedition.org/developpementdurable/11131> ; DOI : 10.4000/developpementdurable.11131
- Sylvain Rode, « Reconquérir les cours d'eau pour aménager la ville », Cybergeog : European Journal of Geography [En ligne], Aménagement, Urbanisme, document 806, mis en ligne le 30 janvier 2017, consulté le 28 août 2019. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeog/27933> ; DOI : 10.4000/cybergeog.27933
- Benoît Théau, Bedzed, un quartier écologique pilote [Images animées] ; Fribourg-en-Brisgau, le choix d'une ville durable, réal. Les réalisations du développement durable ; [DL 2006]

Energie

- ADEME, Agrosup Dijon, Universität Rostock « *Analyse des coûts d'investissement en méthanisation agricole* »,
- ADEME « *Les avis de l'Ademe - Méthanisation (Novembre 2016)* »
- ADEME, ARENE Ile-de-France « *Consommation d'énergie des cafés, hôtels et restaurants franciliens* »
- ADEME, Ministère de l'Environnement, de l'énergie et de la mer, « *Coûts des énergies renouvelables en France* »
- ADEME, Pôle énergies 11 « *Petit éolien, le guide* »,
- ADEME « *Pompes à chaleur en habitat collectif et tertiaire* », Règles de l'Art du Grenelle Environnement 2012
- « *Production d'eau chaude sanitaire collective* », Règles de l'Art du Grenelle Environnement 2012.
- ADEME « *Les systèmes de chauffage et d'eau chaude collectifs* »,
- ADEME « *Les énergies renouvelables et de récupération* »

- ADEME « Centre de ressources sur les bilans de gaz à effet de serre »
- ADEME « Bilan environnemental du chauffage domestique au bois, note de synthèse »
- AFPG, « Géothermie assistée par pompe à chaleur, étude technico-économique »
- Hespul « Les chiffres clés de l'énergie dans un projet d'aménagement »
- Observ'ER « Le baromètre 2016 des énergies renouvelables électriques en France »
- CETE de l'Ouest, CETE Méditerranée, CERTU, DREAL Rhône-Alpes « Etudes sur les énergies renouvelables dans les nouveaux aménagements - Conseils pour la mise en œuvre de l'article L.128-4 du Code de l'Urbanisme »
- CRE « Cout et rentabilité des énergies renouvelables en France métropolitaine »
- RTE, SER, ENEDIS, ADEeF « Panorama de l'électricité renouvelable en 2015 »
- Sylvain LE ROUX « Analyse des stratégies locales et essai de prospective pour les villes moyennes européennes »
- Ti'éole énergies-éoliennes « Le petit éolien : ce qu'il faut savoir pour se raccorder au réseau »
- Via Sèva « L'annuaire des réseaux de chaleur et de froid »

Biodiversité

- Bruxelles Environnement, 2010.- Réaliser des façades vertes. 14p.
- Bruxelles Environnement, 2019.- Recommandations techniques Bâti & Biodiversité : Clôtures favorables au passage de la faune. - Bruxelles Environnement, 4p.
- Capitales Françaises de la Biodiversité, 2016.- Création d'un Conseil local de la Biodiversité à Rennes. [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur :
- <http://www.capitale-biodiversite.fr/experiences/creation-dun-conseil-local-de-la-biodiversite-rennes>
- Carsignol J., 2006.- Routes et passages à faune, 40 ans d'évolution.- Bagnex : Sétra, 57p.
- Conseil d'Architecture d'Urbanisme et de l'Environnement et Ligue pour la Protection des Oiseaux.- Haies et plantes nourricières.- [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur :
- <http://biodiversiteetbati.fr/FT2.htm>
- Environnement Magazine, 2016.- Les conseils locaux de la biodiversité fleurissent.- [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur :
- <https://www.environnement-magazine.fr/biodiversite/article/2016/03/30/46900/les-conseils-locaux-biodiversite-fleurissent>
- Le Blévec M., Dallemagne H., Porcher-Déchar C., Poëys A-L., Bouillé E., 2012.- Guide technique d'aménagement et de gestion des zones humides du Finistère.- Conseil général du Finistère, Service des espaces naturels et des paysages, 252p.

- Ligue pour la Protection des Oiseaux.- Biodiversité & chantiers : comment concilier nature et chantiers urbains ? - [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : <http://biodiversiteetbati.fr/Files/Other/Biodiversite-et-chantier.pdf>
- Objectif Zéro Phyto.- Le fleurissement raisonné des villes.- [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : <http://www.zerophyto.fr/fleurissement.htm>
- Sciences-Po Lille, 2014.- Rétablissement des continuités écologiques sur les infrastructures de transport existantes : Présentation des résultats de l'appel à projets opérationnel MEDDE/DGALN/DEB.- 32p.
- Sétra, 2007.- Faune et trafic : Manuel européen d'identification des conflits et de conception de solutions. Bagneux : Sétra, 179 p.
- Yvelines Conseil Général, 2011.- Catalogue des revêtements adaptés aux véloroutes, voies vertes, pistes cyclables et bandes cyclables.- Yvelines Conseil Général, 36p.

Sol et eau

- Bruxelles Environnement, 2010. - La noue. - [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : www.guidebatimentdurable.brussels
- Bruxelles Environnement, 2010. - Le bassin en eau. - [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : www.guidebatimentdurable.brussels
- Bruxelles Environnement, 2010. - Le bassin sec. - [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : www.guidebatimentdurable.brussels
- Bruxelles Environnement, 2010. - Le massif. - [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : www.guidebatimentdurable.brussels
- Chocat B., 2015. – Faut-il infiltrer les eaux pluviales en ville ? – GRAIE, 17p.
- Communauté Urbaine de Bordeaux, 2014. - Les solutions compensatoires d'assainissement pluvial : Guide de conception/réalisation à l'usage des professionnels. [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : <https://www.bordeaux-metropole.fr/>
- DDT de l'Allier, 2015. - Guide sur les travaux en cours d'eau et les zones humides.- [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : http://www.allier.gouv.fr/IMG/pdf/DOCT_151208_guide_travauc_CE_v2.pdf
- Goulmy F., 2007. - Impacts et implication du busage sur le milieu aquatique bas-normand.- [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : <http://www.aappma-saint-lo.com/index.php/les-publications/63-les-buses>
- Grand Lyon, Fiche n°08 : Stockage sur toiture. - [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : http://www.economie.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/fichiers/site_eco/200806_gl_eaux_pluviales_pro_fiche_08_stockage_toiture.pdf

- Iweva A., Raby D, Lesavre J., Boutin C., Dodane P-H., Liénard A., Molle P., Beck C., Sadowski G-A., Merlin G., Dap S., Ohresser C., Poulet J-B., Reeb G., Werckmann M. et Esser D., 2005. - Épuration des eaux usées domestiques par filtres plantés de macrophytes : recommandations techniques pour la conception et la réalisation. Macrophytes et traitement des eaux, 45 p.
- Ligue pour la Protection des Oiseaux, 2016. - Responsabiliser les propriétaires de chat pour mieux protéger la petite faune sauvage.
- Lille Métropole, Fiche n°3 : Les noues et fossés. - [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : http://services-urbains.lillemetropole.fr/public/doc/eauxPluviales/06_Fiche_Technique_3.pdf
- Lille Métropole, Fiche n°4 : Les bassins. - [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : http://services-urbains.lillemetropole.fr/public/doc/eauxPluviales/07_Fiche_Technique_4.pdf
- Lille Métropole, Fiche n°5 : Les chaussées à structure réservoir. - [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : http://services-urbains.lillemetropole.fr/public/doc/eauxPluviales/08_Fiche_Technique_5.pdf
- Lille Métropole, Fiche n°7 : Les tranchées. - [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : http://services-urbains.lillemetropole.fr/public/doc/eauxPluviales/10_Fiche_Technique_7.pdf
- Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie et ministre des affaires sociales, de la santé et du droit des femmes, 2015. - Arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, à l'exception des installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5. – Journal officiel n°190 du 19 août 2015. - [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000031052756&categorieLien=id>
- Ministre de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer et ministre de la santé et des sports, 2009. Arrêté du 7 septembre 2009 fixant les prescriptions techniques applicables aux installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5. - Journal officiel n°0234 du 9 octobre 2009. - [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000021125109&categorieLien=id>
- Müller G., Wuthier S., de Montmollin B. et Perroche S., 2004. – Guide nature en ville : Les revêtements perméables, Conseils pour la réalisation et l'entretien. - Ville de Neuchâtel. [en ligne] [consulté en juillet 2020]. Disponible sur : http://www.vssg.ch/documents/040500_Neuchatel_Guide_RevetementsPermeab-150704.pdf
- Rodier J., Legube B. et Merlet N., 2016. – Analyse de l'eau, contrôle et interprétation – 10^{ème} édition. - Malakoff : © Dunod Editeur, 1805 p. ISBN : 978-2-10-075678-0

- Sauve A., Glatard F., Faucon P. et Damas O., 2014. - Aménagement et choix des végétaux des ouvrages de gestion des eaux pluviales de proximité : liste de plantes. - ONEMA et PLANTE & CITE
- Service public de Wallonie.- Concilier faune sauvage et éclairage extérieur. [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : <http://biodiversite.wallonie.be>
- SYMASOL, 2016. - Gestion des eaux pluviales : Guide pour la mise en œuvre de techniques alternatives. - [en ligne] [consulté en juillet 2020] Disponible sur : https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content_files/document/brochure-symasol_isbn_web.pdf

Sites web

- <http://www.eco-quartiers.fr/#/fr/les-cles/les-outils-de-l-amenageur/>
- <http://www.ecoquartierbeausoleil.com/>
- <http://www.nantes-amenagement.fr/projet/bottiere-chenais/#localisation>
- <https://detours.canal.fr/bitume-vegetal-reparer-routes-sud-de-france/>
- <http://www.ecoquartiers.logement.gouv.fr/>
- <http://www.ecoquartiers.logement.gouv.fr/carte-interactive/>
- <https://www.actu-environnement.com/ae/news/ecoquartiers-nouveau-label-rural-renouvellement-urbain-28061.php4>
- <https://e-rse.net/eco-quartiers-exemple-france-grenoble-londres-26052/>
- <http://www.nantes-amenagement.fr/projet/bottiere-chenais/>
- <http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/ecoquartier-de-la-bottiere-chenais-a-nantes-a1056.html>
- <http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/atelier-regional-ecoquartier-du-vendredi-4-a3983.html>
- http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/1-ad4_prezieq_ruraux_change_4nov2016.pdf
- <http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/atelier-regional-ecoquartier-quels-couts-pour-un-a3852.html>
- <http://www.connaissancedesenergies.org/bilan-electrique-de-la-france-que-retenir-de-2016-170216>
- <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11455#c19156>
- http://www.iddri.org/Publications/Les-cahiers-du-CLIP/clip_15.pdf
- <http://reseaux-chaaleur.cerema.fr/enquete-nationale-2015-du-chauffage-urbain-et-de-la-climatisation-urbaine>
- http://www.grid.unep.ch/FP2011/step1/pdf/003_Dones_a_2003.pdf

- http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/couts_energies_renouvelables_en_france_edition_2016.pdf
- <http://www.inelia.fr/realisations-projets/ombriere-photovoltaique-en-autoconsommation-de-340kwc-sur-le-parking-du-leclerc-langon/>
- <https://www.kelwatt.fr/prix/tarif-bleu-edf>
- <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/enquete-les-prix-de-vente-de-la-chaleur-en-2011-ademeamorce>
- http://www.ipsos.fr/sites/default/files/doc_associe/2016_barometre_edened-ipsos_bienetreau travail_avril2016.pdf
- <https://www.effinergie.org/web/>
- <https://www.observatoirebbc.org/>

Annexes

Annexe 1 : Dimensionnement des buses et dalots pour le franchissement des cours d'eau

Annexe 2 : Infiltration des eaux pluviales

Annexe 3 : Calcul du volume des ouvrages de rétention

Annexe 4 : Cadre réglementaire sur l'assainissement et éléments techniques pour la conception de filtres plantés de macrophytes

Annexe 5 : Espèces herbacées métropolitaines conseillées pour les parterres, massifs et plates-bandes

Annexe 6 : Essences favorables aux oiseaux et aux insectes

Annexe 7 : Passage sous voirie pour la petite faune

Annexe 8 : Liste non exhaustive des macrophytes métropolitains pouvant être utilisés dans les ouvrages de gestion des eaux pluviales et les filtres plantés

Annexe 1 : Dimensionnement des buses et dalots pour le franchissement des cours d'eau

L'ouvrage de franchissement doit être dimensionné de façon à accepter un débit de crue biennal ou décennal (débits de référence pour le dimensionnement des petits ouvrages d'hydraulique, mais une période de retour plus importante peut éventuellement être choisie en fonction des enjeux). Deux méthodes sont présentées ci-après afin d'estimer le débit de crue : la méthode rationnelle et la méthode Crupedix. Les dimensions de l'ouvrage sont ensuite calculées avec la formule de Manning-Strickler.

Méthode rationnelle

La méthode rationnelle permet le calcul du débit de pointe à l'exutoire d'un bassin versant pour une période de retour donnée. Cette méthode est particulièrement utilisée en hydraulique urbaine.

1. Calcul du temps de concentration t_c (en mn) (formule de Kirpich) :

Sur un bassin versant, le temps de concentration correspond au temps mis par une goutte d'eau pour parcourir la distance entre le point le plus éloigné de l'exutoire et ce dernier. La formule de Kirpich est adaptée au milieu rural.

$$t_c = 0,0195 \frac{L_1^{0,77}}{I_1^{0,385}}$$

Avec :

- L_1 : longueur du plus long parcours en ruissellement en m
- I_1 : pente pondérée sur ce parcours en m/m

2. Calcul de l'intensité de pluie i (en mm/mn) :

$$i = a \cdot t_c^b$$

Avec :

- t_c : temps de concentration en mn
- a et b : coefficient de Montana pour la période de retour choisie (avec b négatif)

3. Calcul du débit de crue Q_p (en m³/s) :

$$Q_p = 0,167 \cdot C \cdot i \cdot A^{1-e}$$

Avec :

- A : surface du bassin versant en ha
- C : coefficient de ruissellement
- e : coefficient d'abattement spatial = 0,05
- i : intensité en mm/mn

Méthode de Crupedix

La méthode de Crupedix permet d'estimer le débit instantané de pluie pour une période de retour de dix ans, sur un bassin rural de taille comprise entre 2 et 2 000 km².

1. Calcul de la précipitation journalière de période de retour 10 ans P₁₀ (en mm)

$$P_{10} = a \cdot t_c^{1-b} = a \cdot (1440)^{1-b}$$

Avec :

- a et b : les coefficients de Montana pour la période de retour 10 ans
- t_c : le temps de concentration en mn

2. Calcul du débit de pointe Q_p (en m³/s)

$$Q_p = S^{0,8} \cdot \left(\frac{P_{10}}{80}\right)^2 \cdot R$$

Avec :

- S : surface du bassin versant en km²
- P₁₀ : précipitation journalière de fréquence décennale en m
- R : paramètre régional (R=0.33 dans grands fonds de vallon karstiques, sinon tend vers 1 dans les petits bassins versants très ruisselants)

L'incertitude de la méthode est relativement grande. L'intervalle de confiance à 90% est [Q/2 ; 2Q].

Manning-Strickler

La formule de Manning-Strickler donne :

$$Q = S \times K \times R_H^{2/3} \times I^{1/2}$$

Avec :

- Q : le débit de crue en m³/s
- S : la section de la conduite en m²
- K : le coefficient de Strickler qui dépend de la nature de la conduite (ex : K=70 pour une conduite en béton)
- I : la pente hydraulique en m/m
- R_H : le rayon hydraulique en m, qui correspond au rapport de la surface mouillée et du périmètre mouillé

Pour un ouvrage circulaire, le diamètre d est donc calculé de la manière suivante :

$$d = \sqrt[8/3]{\frac{Q_p}{0,3117 \cdot K \cdot I^{1/2}}}$$

Pour un ouvrage carré, la largeur l est donc calculé de la manière suivante :

$$l = \sqrt[8/3]{\frac{Q_p}{0,4 \cdot K \cdot I^{1/2}}}$$

À ce résultat doivent être ajoutés 30 cm pour le dépôt du substrat dans l'ouvrage.

Annexe 2 : Infiltration des eaux pluviales

Pourquoi infiltrer les eaux pluviales ?

La gestion des eaux pluviales par infiltration permet de :

- Lutter contre les phénomènes d'inondation,
- Lutter contre l'assèchement des sols susceptible de provoquer des déformations du terrain et donc des dégâts aux bâtiments,
- Lutter contre les îlots de chaleur urbains en mettant plus d'eau à disposition de la végétation et en favorisant sa croissance,
- Réalimenter les nappes phréatiques et ainsi reconstituer des réserves mobilisables pendant les périodes de sécheresse (Chocat, 2015).

L'infiltration peut être assurée par différents ouvrages : les noues, les bassins secs, les revêtements de chaussée poreux, les tranchées, les structures réservoir, etc.

Cadre réglementaire :

- L'infiltration des eaux pluviales relève de la rubrique 2150 de la « Nomenclature eau » et peut donc être soumise à une procédure de Déclaration ou d'Autorisation au titre de la Loi sur l'eau.

Rubrique 2150

Rejet d'eaux pluviales dans les eaux douces superficielles ou sur le sol ou dans le sous-sol, la surface totale du projet, augmentée de la surface correspondant à la partie du bassin naturel dont les écoulements sont interceptés par le projet, étant :

- 1° Supérieure ou égale à 20 ha : **(A) : projet soumis à Autorisation** : [cliquez ici](#) .
- 2° Supérieure à 1 ha mais inférieure à 20 ha : **(D) : projet soumis à Déclaration** : [cliquez ici](#) .

- L'infiltration des eaux pluviales doit être compatible avec les orientations du SDAGE et du SAGE des bassins versants concernés. Le SAGE peut notamment détailler les conditions dans lesquelles l'infiltration des eaux est possible, au vu du contexte local.
- L'infiltration est proscrite dans les périmètres de protection rapprochés (PPR) des captages.
- Des prescriptions spéciales peuvent s'appliquer dans les aires d'alimentation de captages (AAC).

Conditions hydrogéologiques :

- La perméabilité du sol (K) doit être comprise entre 10^{-5} et 10^{-2} m/s pour assurer l'infiltration de l'eau (ou conductivité hydraulique de l'ordre de 2.10^{-5} m/s) ;
- Une étude géotechnique doit être réalisée afin de vérifier la faisabilité d'un mode de gestion des eaux de pluie par infiltration (mesures *in situ* pour la détermination de la perméabilité des différentes couches du sol, caractérisation de la nappe sous-jacente éventuelle, etc.).

Conditions défavorables à l'infiltration :

- Lorsque le sol présente une conductivité hydraulique particulièrement élevée (sol très perméables) ou des cheminements préférentiels (systèmes karstiques) car des transferts de pollution rapides vers la nappe peuvent survenir ;
- En présence d'une nappe superficielle peu profonde. L'interface d'infiltration et le niveau le plus haut de la nappe doivent être séparés par une distance minimale d'un mètre (le niveau le plus haut de la nappe peut être déterminé directement par piézométrie au printemps) ;
- Sur des sols pollués ou dans des zones présentant de forts risques de pollution (zones industrielles générant des pollutions chroniques, bord d'autoroutes, etc.).

Essai de perméabilité : méthode de Porchet

La méthode de Porchet (ou méthode à niveau constant) consiste à calculer le coefficient de perméabilité d'un sol via la réalisation de trous à faible profondeur afin de mesurer la vitesse à laquelle l'eau s'infiltré dans le sol, en conditions de saturation.

Cette méthode permet de mesurer la perméabilité locale et plusieurs points sont donc nécessaires afin d'obtenir des mesures représentatives de l'ensemble du terrain. Un minimum de 3 points est recommandé et davantage peuvent être réalisés en fonction de l'homogénéité présumée du terrain.

Matériel :

- un réservoir de saturation (25 litres) ;
- un réservoir de mesure (2,5 litres) ;
- une cellule régulation de niveau ;
- un chronomètre électronique ;
- des tuyaux souples ;
- une tarière de 15 cm de diamètre.

Méthode :

1. Creuser un trou de diamètre connu, à l'aide de la tarière manuelle, sur une profondeur de 50 cm à 1 m.
2. Placer la cellule de régulation au fond du trou et la connecter au réservoir de saturation. La cellule permettra de réguler automatiquement le niveau d'eau à 15 cm au-dessus du fond. Le niveau doit être maintenu pendant environ 4 heures afin de placer le sol en condition de saturation.
3. Au bout de ces 4 heures, connecter la cellule de régulation au réservoir de mesure. Relever sur le réservoir de mesure la quantité d'eau à rajouter afin de maintenir le niveau d'eau constant et ceci pendant 10 minutes.

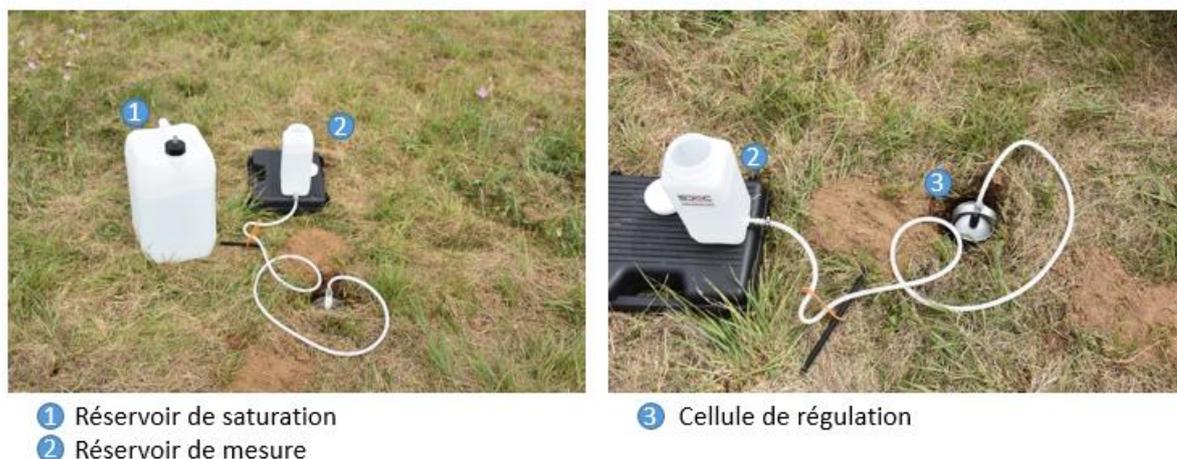


Figure 86 : Dispositif de mesure de la perméabilité par la méthode de Porchet

Le coefficient de perméabilité K (en m/s) s'exprime :

$$K = \frac{V_{10}}{t \times S_m} = \frac{V_{10}}{600 \times S_m}$$

Avec :

- V_{10} : le volume d'eau rajouté en 10 minutes (en m^3),
- S_m : la surface mouillée (en m^2),
- t : temps pendant lequel le niveau a été maintenu constant (en s).

La surface mouillée S_m d'un trou rond de diamètre d s'exprime :

$$S_m (m^2) = \pi \times r^2 + 2 \times \pi \times r \times h = \pi \times r (r + 2h)$$

Avec $\pi = 3,141\ 592$ et $h = 0,25$ m.

La figure ci-après illustre les classes de perméabilité et les types de sol en fonction de la valeur du coefficient de perméabilité obtenu.

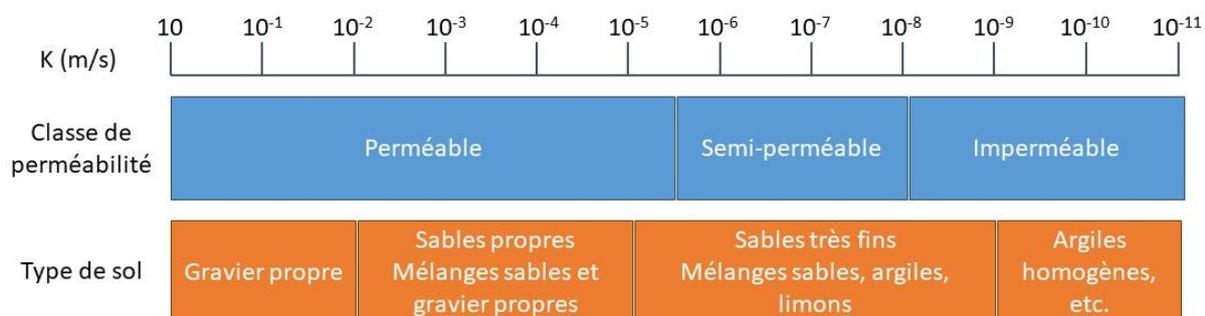


Figure 87 : Type de sol et classe de perméabilité en fonction du coefficient de perméabilité

Annexe 3 : Calcul du volume des ouvrages de rétention

La méthode de calcul du volume de rétention présentée ci-après est la « méthode des pluies ». Elle permet une première approche pour le dimensionnement des ouvrages de rétention stricte ou d'infiltration grâce au calcul du volume d'eau pluviale qui doit être stocké. Elle s'applique au dimensionnement des toitures stockantes, noues, bassins secs et en eau, tranchées, structures réservoirs.

Choix de la période de retour

Le maître d'ouvrage choisit le niveau de risque, c'est-à-dire une fréquence de pluies, contre lequel il veut se protéger. La fréquence de pluies est exprimée sous la forme d'une période de retour T qui correspond à l'intervalle de temps qui sépare deux évènements pluvieux de même intensité. La norme NF EN 752 donne des valeurs indicatives en fonction de l'emplacement du projet, exprimées dans le tableau ci-dessous.

Emplacement	Période de retour
Zones rurales	10 ans
Zones résidentielles	20 ans
Centres villes – Zones industrielles ou commerciales	30 ans
Métro – Passages souterrains	50 ans

Tableau 6 : Exemples de fréquences de précipitations. Source : NF EN 752.

Calcul de la surface active S_a reprise par l'ouvrage

La surface active représente la part de la surface sur laquelle l'eau de pluie va ruisseler. Cette part de ruissellement dépend des capacités d'infiltration de la surface.

$$S_a = \sum S_i \times Cr_i$$

Avec

- S_i : une surface de nature i (exemple : sol perméable avec végétation, sol pavé imperméable, etc...)
- Cr : le coefficient de ruissellement de la surface de nature i, qui correspond au rapport entre la hauteur ruisselée et la hauteur précipitée sur la surface

Le tableau ci-dessous présente les différentes valeurs des coefficients de ruissellement en fonction de la nature de la surface.

	Nature de la surface	Coefficient de ruissellement
Imperméable	Pavage, chaussée revêtue, pistes ciment	Entre 0,7 et 0,95
	Toiture et terrasse	Entre 0,7 et 0,95
	Sol imperméable avec végétation ¹	

	Pente < 2%	Entre 0,10 et 0,18
	2% < pente < 7%	Entre 0,18 et 0,25
	Pente > 7%	Entre 0,25 et 0,35
Perméable	Sol perméable avec végétation ²	
	Pente < 2%	Entre 0,01 et 0,1
	2% < pente < 7%	Entre 0,1 et 0,15
	Pente > 7%	Entre 0,15 et 0,2
¹ Terrain argileux compact		
² Terrain sableux et limoneux		

Tableau 7 : Valeurs des coefficients de ruissellement en fonction de la nature de la surface

Le coefficient de ruissellement peut aussi être donné en fonction du type d'occupation du sol, comme présenté dans le tableau ci-après.

Type d'occupation du sol	Coefficient de ruissellement
Commercial	Entre 0,70 et 0,95
Résidentiel	
- lotissements	Entre 0,30 et 0,50
- collectifs	Entre 0,50 et 0,75
- habitat dispersé	Entre 0,25 et 0,40
Industriel	Entre 0,50 et 0,90
Parcs et jardins publics	Entre 0,10 et 0,25
Terrains de sports	Entre 0,20 et 0,35
Terrains vagues	Entre 0,05 et 0,20
Terres agricoles	
- drainées	Entre 0,10 et 0,13
- non drainées	Entre 0,03 et 0,10

Tableau 8 : Valeurs des coefficients de ruissellement en fonction du type d'occupation du sol

Attribution de la surface disponible S_d

Lorsqu'il y a infiltration des eaux de pluie, une surface disponible pour l'ouvrage de rétention est d'abord attribuée. La méthode de calcul est itérative, elle permet de vérifier que la surface attribuée est suffisamment grande, ou au contraire, trop importante.

Détermination du débit de fuite Q_f suivant la capacité d'absorption mesurée

Le débit de fuite est le débit auquel l'eau est évacuée de l'ouvrage de rétention.

Avec infiltration :

$$Q_f = S_{\text{infiltration}} \times K$$

$$\text{Avec } S_{\text{infiltration}} = S_d$$

Avec K le coefficient de perméabilité (en m/s)

Avec rejet à débit régulé :

Le débit de fuite est fixé par un SDAGE ou par un document d'urbanisme local.

Détermination du volume nécessaire de stockage Vn selon la méthode des pluies

Temps de remplissage :

$$t = \left(\frac{60000 \times Q_f}{S_a \times a \times (1 - b)} \right)^{\frac{-1}{b}}$$

Avec :

- t en minutes
- Q_f en m³/s
- S_a en m²
- a et b les coefficients de Montana¹⁷ correspondant à une période de retour et une plage de durée de pluie

Si le temps de remplissage obtenu est bien dans l'intervalle de validité des coefficients de Montana utilisés (t < 360 min), le calcul est valide. Sinon, le temps de remplissage est recalculé avec d'autres coefficients.

Exemple : Le temps de remplissage est calculé avec les coefficients de Montana de l'intervalle 30 minutes à 6 heures. Le temps obtenu est égal à 162 minutes. Il est bien compris entre 30 minutes et 6 heures. Le calcul est donc valide.

Volume d'eaux pluviales à stocker :

$$V = S_a \times \frac{a \times t^{1-b}}{1000} - 60 \times Q_f \times t$$

Avec V en m³

Dans le cas d'une rétention stricte, le volume à stocker correspond au volume de l'ouvrage de rétention.

Si il y a infiltration, le volume d'eaux pluviales à stocker est ensuite comparé au volume maximal de l'ouvrage de rétention (i.e calculé avec les paramètres les plus défavorables et la surface disponible attribuée précédemment) :

- Si le volume à stocker est environ égal au volume disponible, le dimensionnement est correct ;
- Si le volume disponible est largement supérieur au volume nécessaire de stockage, les dimensions de l'ouvrage peuvent être diminuées ;
- Si le volume à stocker est supérieur au volume disponible, les dimensions doivent être augmentées.

¹⁷ Les coefficients de Montana sont fournis par Météo France.

Annexe 4 : Cadre réglementaire sur l'assainissement et éléments techniques pour la conception de filtres plantés de macrophytes

Cadre réglementaire général

L'assainissement consiste en l'évacuation et le traitement des eaux usées. Les eaux usées domestiques désignent les eaux vannes (eaux des toilettes) et les eaux grises (ou eaux ménagères : salle-de-bain, cuisine, etc.). Étant donné leur charge en polluants, elles doivent être épurées afin de limiter la dégradation de la qualité du milieu récepteur dans lequel elles seront rejetées.

Il existe 2 méthodes d'assainissement :

- L'évacuation dans un réseau public d'assainissement collectif,
- La récupération par un système d'assainissement non collectif, aussi appelé assainissement autonome ou individuel.

Les zones d'assainissement collectif et non collectif sont délimitées dans le zonage d'assainissement défini par la commune ou la communauté de communes, après enquête publique.

Dans les zones d'assainissement collectif, le rôle de la commune est d'assurer la collecte, le stockage, l'épuration et le rejet ou la réutilisation de l'ensemble des eaux usées collectées, par l'intermédiaire du SPAC (Service Public d'Assainissement Collectif).

Dans les zones d'assainissement non collectif, la commune est compétente par l'intermédiaire du SPANC (Service Public d'Assainissement Non Collectif). Elle doit assurer le contrôle de ces installations et peut décider d'assurer des prestations facultatives comme le traitement des matières de vidange. Les propriétaires peuvent également demander à la commune de prendre en charge l'entretien et les travaux de réalisation et de réhabilitation des installations d'ANC.

Législation sur l'assainissement collectif et non collectif recevant une charge brute de pollution organique supérieure à 1,2 kg/j de DBO5

L'arrêté du 21 juillet 2015 est le principal texte réglementant l'assainissement collectif et les systèmes d'assainissement non collectifs de grande capacité (plus 1,2 kg DBO5 / j soit plus de 20 EH environ). Il fixe notamment :

- Les règles applicables au système de collecte des eaux usées :
 - Desservir l'ensemble des immeubles raccordables présents dans la zone d'assainissement collectif,
 - Éviter les apports d'eaux claires parasites¹⁸ pouvant entraîner des dysfonctionnements du système d'assainissement,
 - Ne pas provoquer, dans le cas d'un réseau unitaire, de rejets directs d'eaux usées au milieu récepteur.

¹⁸ Eaux météoriques (eaux de pluie) ou eaux permanentes (eaux de nappes) qui s'infiltrent dans le réseau au niveau des anomalies structurelles (cassures, etc.), des défauts d'assemblage, des mauvais branchements, etc.

- Les prescriptions concernant la conception de la station d'épuration :
 - Prendre en compte les perspectives de développement,
 - Évaluer le rapport coût/bénéfice des différentes solutions techniques possibles,
 - Caractériser les eaux usées collectées et les volumes à traiter,
 - Évaluer l'importance des variations saisonnières.
- Les performances à atteindre en fonction de la charge reçue par la station et de la sensibilité du milieu récepteur :

Paramètre	Charge à traiter en kg de DBO5 par jour			
	< 120	≥ 120 à 600	> 600 à 6000	> 6000
DBO5 ⁽¹⁾	35 mg/L ou 60%	25 mg/L ou 80%	25 mg/L ou 80%	25 mg/L ou 80%
DCO ⁽¹⁾	200 mg/L ou 60%	125 mg/L ou 75%	125 mg/L ou 75%	125 mg/L ou 75%
MES ⁽¹⁾	50 %	35 mg/L ou 90%	35 mg/L ou 90%	35 mg/L ou 90%
N global ⁽²⁾	-	-	15 mg/L ou 70%	10 mg/L ou 70%
P total ⁽²⁾	-	-	2 mg/L ou 80%	1 mg/L ou 80%

(1) Pour les paramètres DBO5, DCO, MES, les concentrations rédhibitoires sont respectivement : 70, 400 et 85 mg/L pour une charge <120 et 50, 250 et 85 pour une charge > 120.

(2) Valeurs moyennes annuelles pour les rejets dans un milieu récepteur sensible à l'eutrophisation.

Tableau 9 : Performances minimales des stations de traitement des eaux usées

Source : (Rodier et al, 2016)

- Les règles relatives à l'auto-surveillance des installations :
 - Surveillance du déversoir d'orage,
 - Surveillance du système de traitement des eaux usées,
 - Périodicité des contrôles,
 - Surveillance complémentaire de la présence de micropolluants et de l'incidence du rejet sur la qualité du milieu récepteur.

Législation sur l'assainissement non collectif

Les informations présentées ci-après s'appliquent aux systèmes d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5 (moins de 20 équivalents habitants).

Définition : L'arrêté du 7 septembre 2009 fixant les prescriptions techniques applicables aux installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5, définit l'installation d'assainissement non collectif (ANC) comme « toute installation d'assainissement assurant la collecte, le transport, le traitement et l'évacuation des eaux

usées domestiques ou assimilées au titre de l'article R. 214-5 du code de l'environnement des immeubles ou parties d'immeubles non raccordés à un réseau public de collecte des eaux usées ».

Raccordement au réseau public : Le raccordement au réseau public est obligatoire même si l'immeuble est équipé d'un système d'assainissement non collectif conforme.

Contrainte d'implantation : L'implantation d'une installation d'ANC est interdite à moins de 35 mètres d'un captage d'eau destinée à la consommation humaine.

La norme NF DTU 64.1 P1-1 préconise d'implanter l'installation d'ANC à une distance minimale de 5 m par rapport aux immeubles et de 3 m par rapport aux limites séparative de voisinage.

Conformité des installations : La conformité des projets d'installations neuves doit être évaluée par le SPANC (Service Public d'Assainissement Non Collectif). Celui-ci fournit une attestation de conformité qui doit être jointe au permis de construire. Les installations réglementaires sont les installations avec traitement par le sol en place ou par un massif reconstitué (tranchées et lits d'épandage, lits filtrants drainés ou non drainés) et les installations composées de dispositifs agréés (filtres plantés, filtres compacts et microstations). Les dispositifs agréés doivent garantir les concentrations maximales suivantes en sortie de traitement : 30 mg/l en matières en suspension (MES) et 35 mg/l pour la DBO₅.

Dimensionnement : Pour équiper une maison avec un système d'assainissement non-collectif, l'arrêté du 7 mars 2012 stipule la règle 1 équivalent-habitant = 1 pièce principale. La pièce principale est, au sens de l'article R. 111-1-1 du code de la construction et de l'habitation, toute pièce destinée au séjour ou au sommeil, de plus de 7 m². Cette règle ne s'applique pas aux établissements recevant du public (dimensionnement suivant capacité d'accueil) et aux maisons d'habitation individuelles pour lesquelles le nombre de pièces principales est disproportionné par rapport au nombre d'occupants (dimensionnement suivant les besoins réels).

Entretien et surveillance : Les installations d'assainissement non collectif doivent être entretenues régulièrement par le propriétaire de l'immeuble et vidangées par des personnes agréées. Le SPANC effectue un contrôle périodique des installations pour repérer les défauts d'entretien et d'usure.

Éléments techniques pour la conception des filtres plantés de roseaux

Les filtres à écoulement vertical

Description :

Les filtres à écoulement vertical sont alimentés en surface et les eaux usées percolent verticalement à travers le substrat. Les stations d'épuration à filtres plantés de roseaux à écoulement vertical sont généralement constituées de deux étages en série eux-mêmes constitués de deux à trois filtres en parallèle fonctionnant en alternance. L'alternance des filtres permet de limiter le colmatage grâce à des phases de repos pendant lesquelles la matière organique accumulée est minéralisée. La rotation s'effectue tous les 3 à 4 jours.

Au niveau du 1^{er} étage, les matières en suspension sont retenues à la surface du filtre, où elles s'accumulent, et les micro-organismes y assurent les processus de dégradation biologique des matières organiques dissoutes. Le 1^{er} étage contribue donc majoritairement à la dégradation de la fraction

carbonée, bien qu'une légère nitrification soit observée. Le 2^{ème} étage permet d'affiner la dégradation des matières carbonées et de compléter la nitrification.

Dans les filtres à flux vertical, l'oxygénation est assurée par 3 mécanismes :

- l'alimentation par bâchées créant un phénomène de convection lors des déplacements de l'eau dans le massif filtrant ;
- la diffusion gazeuse, depuis l'atmosphère par la surface et depuis les drains
- l'apport d'oxygène par les racines des macrophytes.

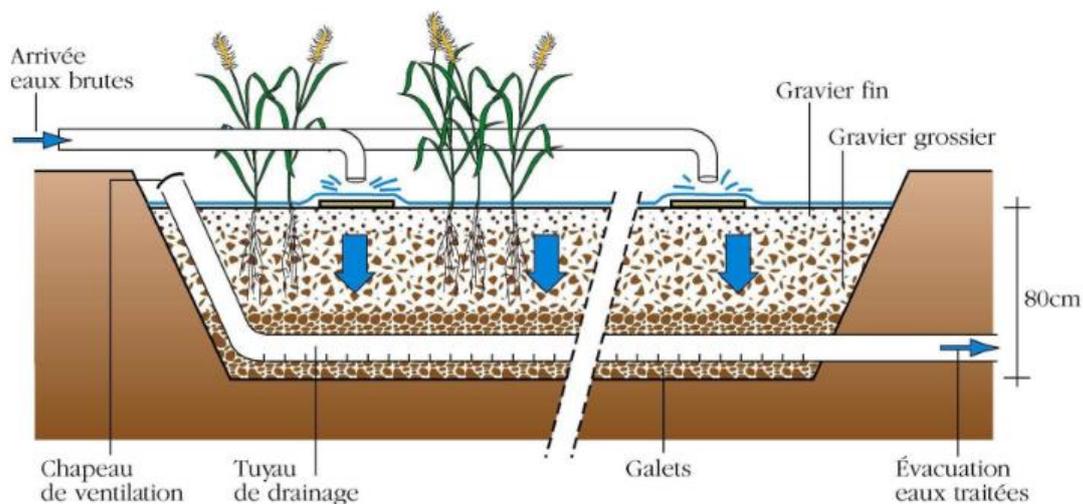


Figure 88 : Coupe transversal schématique d'un filtre planté à écoulement vertical

Source : Agence de l'eau RMC

Dimensions :

Surface utile totale	2 à 2,5 m² / habitant
Dont premier étage	1,2 à 1,5 m ² / habitant
Dont deuxième étage	0,8 à 1,0 m ² / habitant

Tableau 10 : Surface des filtres à flux vertical

Source : Iweva et al, 2005

Les surfaces mentionnées s'appliquent à des populations permanentes.

Matériaux de garnissage des filtres :

	1^{er} étage	2^{ème} étage
Couche filtrante	40 cm de gravier fin 2/8 mm	30 cm à 60 cm de sable alluvionnaire siliceux
Couche de transition	10 à 20 cm de graviers 5/10 mm	10 à 20 cm de graviers 3/20 mm

Couche drainante	10 à 20 cm de graviers 20/60 mm	10 à 20 cm de graviers 20/60 mm
-------------------------	---------------------------------	---------------------------------

Tableau 11 : Matériaux de garnissage pour les filtres à flux vertical
Source : Iweva et al, 2005

Plantation : 4 à 6 plants / m² (Iweva et al, 2005)

Les filtres à écoulement horizontal

Description :

Le filtre planté de roseaux à écoulement horizontal est complètement saturé en eau. L'alimentation se fait en continu et l'eau circule horizontalement, sous la surface du substrat. Un système de siphon en sortie permet de régler la hauteur d'eau dans le filtre afin d'assurer sa saturation.

Dans les filtres horizontaux, l'oxygénation est faible car elle résulte uniquement des apports provenant des racines des macrophytes. Les conditions anaérobies participent à la dégradation des matières carbonées et des nitrates.

Le filtre horizontal ne peut recevoir que des eaux prétraitées ou très peu chargées étant donné le fort risque de colmatage. Il est donc généralement placé en aval d'un filtre à écoulement vertical (2^{ème} étage) pour affiner le traitement de la matière carbonée, des germes et des nitrates.

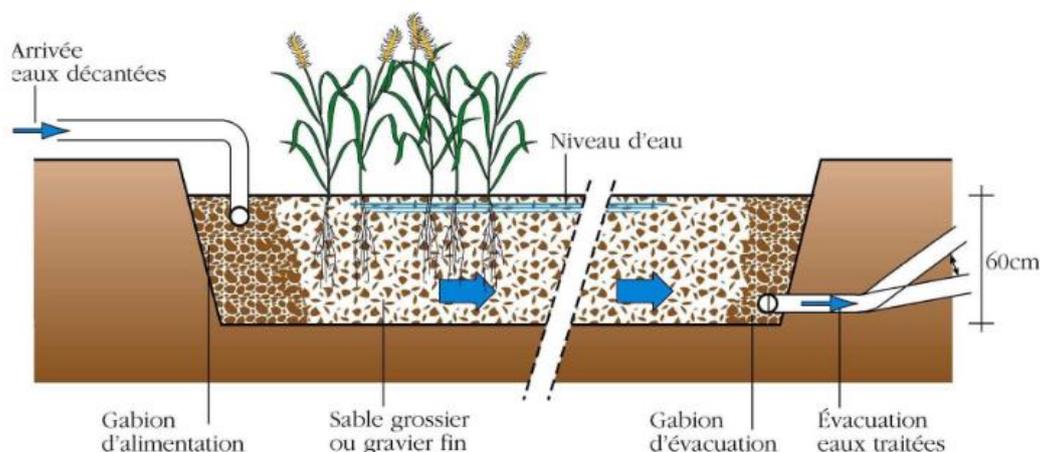


Figure 89 : Coupe transversal schématique d'un filtre planté à écoulement horizontal

Source : Agence de l'eau RMC

Dimensions :

La surface du lit s'exprime (Iweva et al, 2005) :

$$S = \frac{Q \times \ln\left(\frac{C_E}{C_S}\right)}{K}$$

Avec :

- Q : le débit journalier à traiter
- C_E : la concentration initiale
- C_S : la concentration de rejet

- K : la constante de dégradation, qui dépend du paramètre à abattre, de la température et de la porosité du matériau

Matériaux de garnissage des filtres :

Le lit est garni d'un matériau de granulométrie 4/8 mm sur une profondeur maximale de 60 cm (Iweva *et al*, 2005).

Plantation : 4 à 6 plants / m² (Iweva *et al*, 2005)

Annexe 5 : Espèces herbacées métropolitaines conseillées pour les parterres, massifs et plates-bandes

Plante	Cycle de vie	Besoins/Caractéristiques
<i>Coquelicot</i> <i>Papaver rhoeas</i>	Annuelle Floraison de mai à juillet	Idéal en prairie fleurie. Pollen apprécié des abeilles, fleurs appréciées des papillons et graines pour les oiseaux.
<i>Centauree jacée</i> <i>Centaurea jacea</i>	Vivace Floraison de juin à septembre	Belle floraison. Idéale en prairie fleurie. N'aime pas les sols humides et les milieux trop ombragés.
<i>Marjolaine</i> <i>Origanum vulgare</i>	Vivace Floraison juillet à septembre	Sol sec. Fleurs mellifères.
<i>Bourrache</i> <i>Borrago officinalis</i>	Annuelle Floraison d'avril à septembre	Sol riche et ensoleillé, pas d'entretien. Fleur comestibles et mellifères.
<i>Amourette</i> <i>Briza media</i>	Vivace Floraison de mai à août	Pas d'entretien, sur milieu pauvre et sec, se ressème seule.
<i>Laîche à épis pendants</i> <i>Carex pendula</i>	Vivace Floraison de mai à juin	Pas d'entretien. Milieu sec.
<i>Lotier corniculé</i> <i>Lotus corniculatus</i>	Vivace Floraison de mai à septembre	Utilisé comme engrais vert (fixe l'azote). Sol sec, exposition ensoleillée.
<i>Marguerite</i> <i>Leucanthemum vulgare</i>	Vivace Floraison de mai à septembre	Idéale en prairie fleurie. Sol drainé et ensoleillé.
<i>Mauve musquée</i> <i>Malva moschata</i>	Vivace Floraison de juin à septembre	Peu d'arrosage mais régulier. Bien en prairie fleurie, exposition ensoleillée et sols plutôt secs et drainés.
<i>Campanule gantelée</i> <i>Campanula trachelium</i>	Vivace Floraison de juillet à août	Inflorescence fournie et agréable en fleurissement. Mi-ombre, milieux calcaires et riches en humus.
<i>Vipérine</i> <i>Echium vulgare</i>	Bisannuelle Floraison de juin à septembre	Se ressème seule. Aime les lieux secs, ensoleillés et caillouteux. Fleurs riches en nectar.
<i>Fenouil</i> <i>Foeniculum vulgare</i>	Vivace ou bisannuelle Floraison d'août à novembre	Sol sec ou bien drainé. Parfum anisé. Se ressème seul. Fleurs mellifères.
<i>Bouillon blanc</i> <i>Verbascum thapsus</i>	Bisannuelle Floraison de juin à septembre	Très robuste, pas d'entretien, emplacement ensoleillé. Grande taille
<i>Onagre bisannuelle</i> <i>Oenothera biennis</i>	Bisannuelle Floraison de juin à septembre	Sols secs et pauvres. Les fleurs attirent les papillons nocturnes.
<i>Cabaret des oiseaux</i> <i>Dipsacus fullonum</i>	Bisannuelle Floraison de juillet à août	Floraison à partir de la 2ème année, attire insectes et oiseaux. Grande taille. Terrains secs, pierreux, sablonneux.

<i>Berce commune</i> <i>Heracleum vulgare</i>	Vivace Floraison d'avril à juin	Grandes inflorescences, semer au printemps, plante structurante. Peut être envahissante sur sol riches.
<i>Silène enflée</i> <i>Silene vulgaris</i>	Vivace Floraison de mai à septembre	Sols très drainants (sablonneux). Appréciée des papillons de nuit.
<i>Lychnis fleur de coucou</i> <i>Lychnis flos-cuculis</i>	Vivace Floraison de mai à août	Arrosage modéré mais régulier, aime les milieux humides.
<i>Tanaisie</i> <i>Tanacetum vulgare</i>	Vivace Floraison de juillet à octobre	Feuilles très odorantes, éloignent les insectes, (insecticide naturel).
<i>Digitale pourpre</i> <i>Digitalis purpurea</i>	Vivace ou bisannuelle Floraison de juin à septembre	Aucun entretien. Plante toxique, feuillage irritant.

Source : zerophyto.fr

Annexe 6 : Essences favorables aux oiseaux et aux insectes

Essences les plus attractives pour les oiseaux	Essences les plus attractives pour les insectes
1. Sureau noir (<i>Sambucus nigra</i>)	1. Saule (<i>Salix sp.</i>)
2. Sorbier des oiseaux (<i>Sorbus aucuparia</i>)	2. Chêne (<i>Quercus sp.</i>)
3. Merisier (<i>Prunus avium</i>)	3. Bouleau (<i>Betula sp.</i>)
4. Sureau rouge (<i>Sambucus racemosa</i>)	4. Aubépine (<i>Crataegus monogyna</i>)
5. Églantier (<i>Rosa sp.</i>)	5. Peuplier (<i>Populus sp.</i>)
6. Aubépine monogyne (<i>Crataegus monogyna</i>)	6. Prunellier (<i>Prunus spinosa</i>)
7. Bourdaine (<i>Rhamnus frangula</i>)	7. Pin (<i>Pinus sp.</i>)
8. Cornouiller sanguin (<i>Cornus sanguinea</i>)	8. Pommier (<i>Malus sylvestris</i>)
9. Pommier (<i>Malus sylvestris</i>)	9. Aulne glutineux (<i>Alnus glutinosa</i>)
10. Prunellier (<i>Prunus spinosa</i>)	10. Orme (<i>Hulmus sp.</i>)

Source : Biodiversité & bâti

Annexe 7 : Passage sous voirie pour la petite faune

Les passages non spécialisés

Les passages sous voirie pour la petite faune sont de simples tunnels cylindriques ou rectangulaires d'un diamètre ou d'une largeur de 0,4 à 2 m. Les passages non spécialisés sont des conduits destinés à un grand nombre d'espèces. Ils sont aménagés tous les 300 m environ.

Emplacement

- L'installation de tunnels pour la petite faune est plus aisée lorsque la route ou la voie ferrée est construite en remblais mais les passages peuvent également s'adapter aux infrastructures situées au niveau du sol.
- Si les espèces cibles empruntent des chemins préférentiels, les passages doivent être placés le plus près possible de ceux-ci.

Dimensions

Les dimensions qui permettent le passage du plus grand nombre d'animaux sont de 1,5 m de diamètre pour les conduites cylindriques et de 1 à 1,5 m de largeur pour les tunnels rectangulaires. Les dimensions sont bien sûr adaptées en fonction des espèces susceptibles d'emprunter le tunnel (loutre, blaireaux, hamster, etc.). En outre, les passages de petite taille sont plus difficiles à entretenir. Le dimensionnement doit également prendre en compte la nécessité d'aménager le sol de façon naturelle (terre, roche, sable).

Conception

- Les tunnels rectangulaires sont préférables pour la plupart des espèces car les parois verticales permettent un meilleur guidage. Ils sont cependant plus coûteux que les conduits cylindriques et moins faciles à mettre en place sous les infrastructures existantes.
- Le sol du tunnel doit être aussi naturel que possible. Dans le cas d'un ouvrage cylindrique, il doit être aménagé de façon à former un plan horizontal pour faciliter le passage des animaux.
- L'accès au passage doit être dégagé, à la fois pour l'équipe d'inspection et pour les animaux.
- Le passage doit être conçu avec une pente suffisante pour éviter la stagnation d'eau (pente minimale de 1% et maximale de 50%).
- L'entrée du passage doit être préservée de toutes nuisances humaines et notamment de l'éclairage artificiel.

Entretien

Un entretien régulier est nécessaire pour assurer l'efficacité du passage sur le long terme. Les actions suivantes sont indispensables :

- Une inspection du tunnel et des dispositifs de guidage autour de l'entrée 2 à 10 fois par an pour enlever les débris qui se sont accumulés (feuilles mortes, déchets, pierres, etc.)
- Une fauche et un débroussaillage réguliers autour des entrées pour assurer l'accès au passage tout en maintenant une végétation minimale favorable aux animaux.

Les crapauducs

Les batrachoducs ou crapauducs sont des passages conçus spécialement pour la traversé des amphibiens. Ils permettent de sécuriser les migrations pré et postnuptiales des adultes reproducteurs et les déplacements massifs de juvéniles. Ils sont aménagés dans le cadre de projets neufs ou sur des voiries existantes lorsqu'une forte mortalité est avérée.

Nombre de passages et distance entre les passages

L'aménagement de ce type d'ouvrage, qui représente un investissement lourd, doit faire l'objet d'une étude préalable afin de réaliser un diagnostic fiable et précis sur les effectifs et les conditions de migration des espèces présentes. Cette étude permettra notamment de définir le nombre de passages nécessaires et l'espacement entre ceux-ci.

La méthode de la barrière piège est couramment utilisée et permet une bonne estimation des schémas de déplacement et des effectifs d'un peuplement. Il s'agit d'installer une barrière (grillage fin ou bâche d'environ 50 cm de hauteur) le long de la voirie sur une détermination selon la zone de migration des amphibiens. Des seaux sont enterrés le long de cette barrière à intervalle régulier (20 m environ) afin de piéger les amphibiens. Les seaux sont ensuite relevés une à deux fois par jour et les amphibiens sont identifiés, sexés, comptés puis relâchés en sécurité.

D'après le Cerema (2019), un espacement optimal de 25 à 30 m est généralement recommandé, tout particulièrement pour les urodèles. Si la longueur de voirie à équiper est importante, la distance entre les passages peut être portée à 60 m au maximum.

Conception

Le crapauduc est constitué de deux éléments :

- Le collecteur, construit le long de la chaussée. Il fait office de barrière et de guide. Il peut s'agir d'un collecteur en U (caniveau d'une profondeur minimale de 40 cm) dans lequel tombent les amphibiens ou d'un collecteur en L (muret de 40 à 60 cm de haut) qui bloque l'accès à la chaussée ;



Figure 90 : Collecteur en U. Source: © Conseil départemental de l'Isère

- Les passages sous chaussées régulièrement disposées sur toute la longueur du collecteur, à intervalles réguliers.

Le crapauduc répond aux mêmes exigences de conception et d'entretien que les passages à faune non spécifiques.

Exemples d'aménagements et coûts associés :

Issus de « Rétablissement des continuités écologiques sur les infrastructures de transport existantes »,
Science Po Lille, 2014.

Batrachoduc du Gaumont

Porteur de projet : Communauté de communes du Val de Moselle (57)

Espèces cibles : Crapaud commun, Sonneur à ventre jaune, Grenouille verte, Grenouille rousse, Triton alpestre, Triton crêté

Description du projet : Construction sous une route départementale existante. Aménagement de 14 traversées en béton, de 110 x 55 cm, implantés à 2 m sous la chaussée et espacés de 30m.

Coût d'investissement : 548 676 €

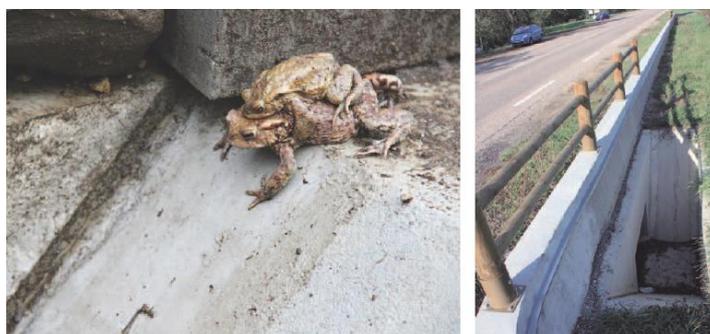


Figure 91 : Batrachoduc et migration. Source : © J.DEMANGE

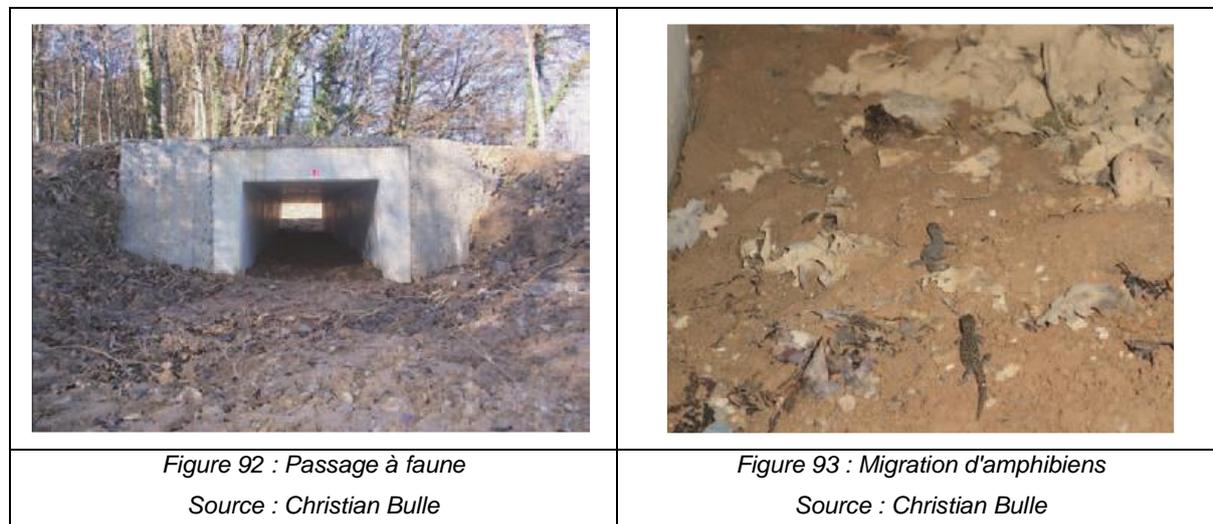
Construction de passages à petite faune sous la route départementale 14

Porteur de projet : Département du Doubs (25)

Espèces cibles : Triton palmé, Triton alpestre, Triton crêté, Rainette verte, Salamandre tachetée, Grenouille rousse, Grenouilles vertes, Crapaud commun et Grenouille agile

Description du projet : Construction sous une route départementale existante. Aménagement de 9 tunnels en béton à double sens et de 670 m de parois de guidage en acier galvanisé.

Coût d'investissement : 212 000 €



Annexe 8 : Liste non exhaustive des macrophytes métropolitains pouvant être utilisés dans les ouvrages de gestion des eaux pluviales et les filtres plantés

Nom scientifique	Nom vernaculaire	Type de milieux	pH
<i>Caltha palustris</i>	Populage des marais	Eaux stagnantes	Neutre
<i>Carex sp.</i>	Laïches	Grande amplitude écologique selon les espèces	Variable
<i>Epilobium hirsutum</i>	Épilobe hirsute	Bord des eaux et fossés	Basique
<i>Iris pseudacorus</i>	Iris jaune	Bord des eaux et marais	Basique
<i>Juncus effusus</i>	Jonc épars	Lieux humides Tolère de grandes variations d'humidité	Légèrement acide
<i>Lycopus europaeus</i>	Chanvre d'eau	Lieux humides	Légèrement basique
<i>Lysimachia vulgaris</i>	Lysimaque jaune	Bord des eaux Tolère de grandes variations d'humidité	Basique
<i>Lythrum salicaria</i>	Salicaire	Bord des eaux, lieux humides Tolère de grandes variations d'humidité	Légèrement basique
<i>Mentha aquatica</i>	Menthe aquatique	Sols lourds Lieux humides ou inondés	Neutre
<i>Myosotis scorpioides</i>	Myosotis des marais	Praires marécageuses, bord des eaux Sols lourds et compacts	Basique
<i>Phragmites australis</i>	Roseau phragmite	Marais et bord des eaux	Neutre
<i>Typha latifolia</i>	Massette	Mares, étangs, rivières	Légèrement basique

Source : Sauve *et al*, 2014 et Tela Botanica