

Janvier 2009

# GUIDE

sur la prise en compte de

# l'ENVIRONNEMENT

dans les installations

# PHOTOVOLTAÏQUES

au sol

– L'exemple allemand –

Ressources, territoires et habitats  
Énergie et climat Développement durable  
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent  
pour  
l'avenir**



# Guide

## sur la prise en compte de l'environnement dans les installations photovoltaïques au sol - l'exemple allemand -

VERSION ABREGEE et MODIFIEE  
du guide allemand original intitulé

« Leitfaden zur Berücksichtigung von Umweltbelangen bei der Planung von PV-Freiflächenanlagen » - élaboré pour le compte du Ministère Fédéral de l'Environnement, de la Protection de la nature et de la Sécurité nucléaire - novembre 2007

Version originale	<b>Mandant</b>	<b>Ministère Fédéral de l'Environnement, la Protection de la nature et de la Sécurité nucléaire</b> Service Z III 2 10178 Berlin	
	<b>Mandataire</b>	<b>Groupe de travail « Monitoring Photovoltaïque »</b> c/o Bosch & Partner GmbH Lister Damm 1 30163 Hanovre <b>Membres du Groupe de travail</b> <b>Bosch &amp; Partner GmbH</b> Lister Damm 1 30163 Hanovre <b>Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg</b> Industriestr. 6 70565 Stuttgart <b>Solar Engineering Decker &amp; Mack GmbH</b> Vahrenwalder Str. 7 30 165 Hannover <b>Institut für Energetik und Umwelt gGmbH</b> Torgauer Str. 116 04347 Leipzig <b>Cabinet d'avocats Bohl &amp; Coll</b> Franz-Ludwig-Straße 9 D-97072 Würzburg	
	<b>Élaboration du guide</b>	Dieter Günnewig	Bosch & Partner
Version française	<b>Traduction française</b>	Entreprise : Société Technicis Maître d'ouvrage : Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire	
	<b>Adaptation du document</b>	Marie-Cécile Degryse MEEDDAT - DGEC Cyril Pouvesle MEEDDAT - DGEC	

## Sommaire

<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>2</b>	
<b>Liste des figures</b> .....	<b>3</b>	
<b>0</b>	<b>Introduction à la version abrégée</b> .....	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Caractéristiques des installations photovoltaïques au sol</b> .....	<b>5</b>
1.1	Techniques d'installation .....	5
1.2	Surface nécessaire .....	7
<b>2</b>	<b>Profil d'impact selon le type de projet</b> .....	<b>9</b>
2.1	Typologie des pressions exercées par les installations photovoltaïques au sol	9
2.2	Analyse des impacts potentiels des installations photovoltaïques au sol sur l'environnement .....	16
<b>3</b>	<b>Critères de sélection du site d'implantation et cadrage préalable de l'étude d'impact</b> .....	<b>29</b>
3.1	Critères économiques et énergétiques lors du choix du site .....	29
3.2	Critères environnementaux lors du choix du site .....	29
3.3	Cadrage préalable de l'étude d'impact .....	31
<b>4</b>	<b>Développement de mesures de suppression, de réduction et de compensation des impacts négatifs identifiés</b> .....	<b>34</b>
4.1	Développement de mesures de suppression et de réduction impacts négatifs identifiés.....	34
4.2	Développement de mesures de compensation .....	36
<b>5</b>	<b>Indications en vue de la conception d'installations photovoltaïques au sol et la mise en place effective des mesures</b> .....	<b>38</b>
5.1	Indications pour la conception d'une installation photovoltaïque au sol .....	38
5.2	Indication pour la mise en place de mesures .....	39
<b>6</b>	<b>Recyclage / Remise en état</b> .....	<b>43</b>
6.1	Recyclage des modules.....	43
6.2	Remise en état des sites .....	43

## Liste des tableaux

- Tableau 1 :** Pressions exercées par les installations photovoltaïques au sol
- Tableau 2 :** Facteurs potentiels d'impact des installations photovoltaïques au sol
- Tableau 3 :** Impacts négatifs potentiels sur le patrimoine à protéger
- Tableau 4 :** Critères techniques et économiques à prendre en compte lors du choix du site
- Tableau 5 :** Zones présentant un faible potentiel de conflit (zones appropriées en Allemagne)
- Tableau 6 :** Exemples de questionnement sur la faune et la flore
- Tableau 7 :** Indications sur des mesures de suppression/ de réduction possibles
- Tableau 8 :** Exemples de mesures de compensation des impacts négatifs
- Tableau 9 :** Comparaison entre pâturage et la fauche pour le maintien de surfaces ouvertes

## Liste des figures

- Figure 1 :** Exemple de pose des câbles dans une tranchée – Phase chantier à Darrast, Bavière (photo : M. Mack)
- Figure 2 :** Comparaison de divers types d'installations
- Figure 3 :** Clôture de sécurité avec socle en maçonnerie (Photo : M. Reichmuth)
- Figure 4 :** Impact visuel d'installations photovoltaïques au sol (Photos : C. Herden, Bosch & Partner)
- Figure 5 :** Exemple de réduction des impacts paysagers par effet de masque végétal d'une installation photovoltaïque au sol (Commune d'Estenfeld 2004)

## 0 Introduction à la version abrégée

L'Allemagne a acquis une expérience importante en matière de développement des installations photovoltaïques au sol. En 2006, elle comptabilisait 159 parcs pour une puissance de 186,3 MWc. Le Ministère Fédéral de l'Environnement, de la Protection de la Nature et de la Sécurité Nucléaire a lancé un projet de suivi environnemental de ces installations qui a permis d'élaborer un guide en langue allemande publié en 2007.

Ce document a fait l'objet d'une traduction complète pour le Ministère français de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire. Toutefois, au vu des nombreuses spécificités réglementaires propres à l'Allemagne auxquelles il est fait référence dans le corps du texte, il a paru nécessaire, dans un objectif de clarté, de réaliser une version abrégée et plus adaptée à une lecture dans le cadre français. Cette version a notamment inclus certaines transpositions terminologiques, certaines interprétations ou certains compléments qu'il paraissait essentiels de faire apparaître pour une meilleure compréhension du document.

\* Le **premier chapitre** est consacré aux caractéristiques techniques de ce type d'installation. Il compare les différents modèles de parcs, leur surface et présente le type de fondation ou supports techniques nécessaires.

\* Le **second chapitre** présente les effets possibles sur l'environnement de ces installations. Les impacts environnementaux en résultant sont alors décrits, thématique par thématique.

\* Le **troisième chapitre** développe les critères de sélection du site d'implantation d'un parc photovoltaïque et la réalisation du cadrage préalable de l'étude d'impact.

\* Le **quatrième chapitre** présente les différentes mesures de réduction ou de compensation pouvant être prises, qui devront être examinées en fonction de l'implantation retenue.

\* Le **cinquième chapitre** décrit, en fonction des thématiques abordées, les différentes recommandations du groupe de travail dans le cadre du guide allemand.

\* Le **sixième chapitre** évoque brièvement le recyclage des modules et la remise en état du site.

### Avertissement

**Ce document n'a pas, en soi, de valeur réglementaire et ne constitue pas un cadre pour l'instruction administrative des études d'impact en France. Il permet dans premier temps d'enrichir le questionnement environnemental lié au développement des installations photovoltaïques au sol. Ces dernières feront l'objet, au même titre que les éoliennes, d'un guide méthodologique de l'étude d'impact sur l'environnement. Ce futur guide adoptera une démarche partenariale et constituera un document de référence méthodologique.**

# 1 Caractéristiques des installations photovoltaïques au sol

## 1.1 Techniques d'installation

### 1.1.1 Des cellules solaires aux modules

Lors de l'utilisation active d'énergie solaire, les cellules solaires transforment les rayons directs et diffus du soleil en électricité. Selon l'épaisseur de la couche du matériau actif, on distingue aujourd'hui des cellules à couche mince et à couche épaisse. L'épaisseur des cellules à couche mince est environ 100 fois inférieure à ces dernières.

Les cellules à couche épaisse sont composées de silicium monocristallin (rendement d'environ 14-18 %) <sup>1</sup> ou polycristallin (rendement d'environ 13-16 %).

Les cellules à couche mince utilisés dans les installations photovoltaïques au sol sont composées de silicium amorphe (a-Si) (rendement d'environ 7-11 %), de silicium amorphe dans la technique dite triplex, ou de tellure de cadmium (CdTe, rendement d'environ 9-12 %).

Les cellules à couche mince nécessitent moins de matériau et consomment moins d'énergie lors de leur fabrication. Leurs rendements étant toutefois inférieurs à ceux des cellules en silicium cristallin, on leur a jusqu'à présent préféré des cellules solaires en silicium monocristallin ou polycristallin pour la réalisation d'installations photovoltaïques au sol.

Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche anti-reflets, pour minimiser la réflexion de la lumière à la surface. Grâce à la variation de l'épaisseur de la couche anti-reflets, diverses teintes sont possibles (bleu foncé à noir).

Pour garantir la protection contre les effets climatiques et mécaniques, les cellules solaires des modules standards sont enchâssées entre une vitre en verre trempé spécial à l'avant et un film plastique à l'arrière dans une couche protectrice transparente en éthylène-vinyle acétate (EVA).

Dans un module solaire, les cellules individuelles sont connectées électriquement à des unités de plus grande taille. Plusieurs modules sont raccordés à un générateur. L'électricité produite est acheminée vers un onduleur. Celui-ci convertit le courant continu en courant alternatif qui est ensuite injecté dans le réseau public via un compteur.

La puissance d'un module solaire est indiquée en Watt crête<sup>2</sup> (Wc) ou en kilowatt crête (kWc). Cette valeur décrit la puissance effective dans des conditions de test normalisées<sup>3</sup>, qui ne correspondent pas exactement aux conditions quotidiennes.

---

<sup>1</sup> Le rendement est la mesure de la capacité d'une cellule solaire à convertir le rayonnement capté en électricité.

<sup>2</sup> Le terme « crête » désigne une valeur maximale.

<sup>3</sup> température de la cellule : 25 °C, angle d'irradiation : 90°.

## 1.1.2 Mode de construction

### Montage sur supports et types d'installation

Pour le montage des modules solaires, des cadres en acier zingué, aluminium ou bois (par exemple du robinier) sont utilisés. Concernant la mobilité des supports, une distinction est faite entre les installations pivotantes et les installations fixes. Les installations pivotant autour d'un ou de deux axes suivent la course du soleil pendant la journée. Le mouvement rotatif est assuré soit par un mât central soit par une tourelle placée sur un socle.

Les installations fixes sont montées en série sur des cadres, de la même façon que pour des installations de toiture. Dans le cas d'une installation en plaine, il convient de laisser une distance suffisante entre les rangées afin de réduire au minimum la projection d'ombre sur les modules par les rangées qui les précèdent. La surface de montage est donc en général nettement supérieure à celle des modules.

On recherche également à réduire la hauteur des supports afin de minimiser la consommation de matériaux. Dans le cas d'installations photovoltaïques au sol en rangées fixes, les modules se trouvent en général entre 0,70 et 1,5 m au-dessus du sol. Cela permet de garantir la présence de lumière diffuse à la végétation qui pousse en dessous.

Des installations pivotantes sur un ou deux axes ont une distance par rapport au sol de 0,6 à 3 m, selon la position des tables modulaires.

### Fondation et ancrage

Les installations au sol en rangées sont en général ancrées dans le sous-sol à l'aide de pieux battus ou de vis taraudées et filetées (généralement profilés en acier zingué). Les fondations flottantes pour charges lourdes à traverses en béton préparé sur place sont utilisées plus rarement (lorsque le sous-sol résiste au battage (gros blocs subsistant d'anciennes fondations, traverses, restes de chaussées, etc.) et lorsque des résidus ne permettent pas d'enfoncer des pieux dans la terre, etc..).

Dans ce dernier cas, le point d'ancrage unique doit alors absorber une charge supérieure. Une fondation flottante exige des traverses plus lourdes et un ancrage, une structure plus coûteuse et/ou une plus grande profondeur. Une fondation sur des assises souterraines (« fondation immergée supportant des charges lourdes ») n'entre en ligne de compte que pour des installations plus petites (jusqu'à 0,3 MWc).

Pour les fondations d'installations pivotantes, on utilise des fondations flottantes qui supportent des charges lourdes (par exemple, pour le parc solaire du site « Weingut Erlasee » : le sol a été déblayé jusqu'à 50 cm, et des anneaux en béton d'un diamètre de 2,20 m et d'une hauteur de 1 m ont ensuite été posés ).

### Câblage souterrain

En général, les raccordements entre les cadres des modules et les onduleurs sont réalisés à l'aide de câbles enterrés. Les câbles sont posés sur une couche de 10 cm de sable au fond d'une tranchée dédiée aux câbles d'une profondeur de 70 à 90 cm. Les câbles sont posés côte à côte de plain-pied, la distance entre les câbles et la largeur de la tranchée dépendant de l'intensité du courant à prévoir.

La longueur des câbles dépend de la puissance. Pour des modules à couche épaisse, par exemple, les longueurs spécifiques des tranchées à câbles sont de l'ordre de 500 mètres/MWc. La pose en surface semble engendrer des surcoûts importants et une imperméabilisation du sol supplémentaire.



Figure 1 : Exemple de pose des câbles dans une tranchée – Phase chantier à Darrast, Bavière, (photo : M. Mack)

## 1.2 Surface nécessaire

La **surface totale** d'une installation photovoltaïque au sol correspond au terrain industriel, généralement clôturé, qui comprend les voies d'accès, les dépendances, la surface de montage des modules, et les autres surfaces libres. Cette surface dépend de divers facteurs (rendements, techniques utilisées, espace entre les rangées). Les caractéristiques du site (inclinaison du terrain, situation géographique), la nature du montage sur support (par exemple Mover ou installation fixe) et la hauteur des modules déterminent, entre autres, l'intervalle nécessaire entre les rangées de modules. **La surface moyenne des installations en Allemagne jusqu'à présent est d'environ 40 m<sup>2</sup>/kWc.** La surface nécessaire pour les installations techniques (onduleur notamment) est en général insignifiante par rapport à la surface totale. Si l'installation est protégée par une clôture, on aura besoin de 20 % à 25 % de surface de montage supplémentaires. Il faudra également construire des voies pour permettre l'accès de véhicules de maintenance aux modules, ainsi que des emplacements de parking et des zones de manœuvre.

Les installations pivotantes présentent des taux d'utilisation de la surface (m<sup>2</sup>/kWc) moyens à élevés. Les installations à deux axes avec environ 75 m<sup>2</sup>/kWc sont près de trois fois plus volumineuses (pour un rendement majoré jusqu'à 30 %) que les installations en rangées fixes.

Avec le développement continu de la technologie photovoltaïque, la hauteur de montage des installations et la surface modulaire des unités individuelles évoluent également. Une hauteur d'environ 6 m au-dessus du sol et une superficie de table modulaire de 50 m<sup>2</sup> (Mover) sont considérées aujourd'hui comme l'état actuel de la technique de série pour les

installations pivotantes. Les installations en rangées ont des hauteurs totales un peu plus faibles.

Figure 2 : Comparaison de divers types d'installations

	<p><b>Installation fixe en rangées</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Montée sur des cadres fixes, ne s'oriente pas vers le soleil.</li><li>• Ancrage/fondation : pieux battus ou vis, rarement socles en béton</li><li>• Assise en bois, acier zingué ou aluminium</li><li>• Nécessite une faible maintenance en raison de l'absence de moteurs et de dispositifs pivotants.</li></ul>
	<p><b>Installation sur 1 axe (Tracker)</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Les surfaces des modules se tournent vers le soleil dans un plan.</li><li>• Ancrage /fondation avec un socle en béton ou des vis d'ancrage.</li><li>• Mât central avec dispositif pivotant</li><li>• Assise en général en acier zingué</li><li>• Surface de modules par Tracker jusqu'à 35 m<sup>2</sup>; dans le cas d'un montage incliné, l'élévation est d'environ 6 m au-dessus du sol.</li></ul>
	<p><b>Installation sur 2 axes (p. ex. Mover)</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Les surfaces de modules s'orientent vers le soleil dans deux plans ; orientation optimale vers le soleil.</li><li>• Fondation : Socle en béton (flottant)</li><li>• Tourelle</li><li>• Assise en acier zingué</li></ul> <p>Surface de modules par Mover : jusqu'à 50 m<sup>2</sup> ; dans le cas d'un montage incliné, l'élévation est d'environ 6 m au-dessus du sol.</p>

## **2 Profil d'impact selon le type de projet**

### **2.1 Typologie des pressions exercées par les installations photovoltaïques au sol**

Cette section décrit les caractéristiques du projet susceptibles d'avoir des répercussions sur l'environnement. Cette liste est indicative et les impacts environnementaux d'une installation ne peuvent être déterminés qu'au cas par cas, en regard de l'état initial du site. Une distinction est faite entre les pressions liées à la construction, c'est-à-dire limitées à la période de chantier et les pressions liées à la nature de l'installation et à son exploitation.

**Tableau 1: Pressions exercées par les installations photovoltaïques au sol**

	<b>Phase de construction, (remise en état)</b>	<b>Nature de l'installation</b>	<b>Phase d'exploitation</b>
Consommation de surface, utilisation de surfaces	<b>X</b>	<b>X</b>	
Imperméabilisation du sol		<b>X</b>	
Tassement du sol	<b>X</b>		
Excavation, érosion du sol	<b>X</b>	<b>X</b>	
Pollutions chimiques	<b>X</b>		<b>X</b>
Pollutions sonores	<b>X</b>		<b>X</b>
Pollutions lumineuses		<b>X</b>	<b>X</b>
Vibrations	<b>X</b>		
Ombrage, assèchement		<b>X</b>	
Échauffement des modules		<b>X</b>	
Tensions électromagnétiques			<b>X</b>
Perception visuelle de l'installation		<b>X</b>	<b>X</b>
Maintenance			<b>X</b>

### **2.1.1 Pressions du projet liées à la construction de l'installation photovoltaïque**

La phase de construction comprend la mise en place du chantier et la réalisation des travaux de construction jusqu'à l'achèvement de l'installation. La mise en place du chantier peut avoir lieu sur le terrain même du projet. Une utilisation supplémentaire de la surface pour le chantier de construction n'est en général pas nécessaire. Les principaux impacts liés à la construction sont les suivants :

#### **a) Tassement et imperméabilisation partielle du sol**

L'accès du terrain nécessitera la construction de voies empierrées, en fonction des engins utilisés et des conditions locales du sol. Comme sur toutes les voies carrossables non goudronnées, le sol peut se tasser surtout par temps humide.

Dans le cas d'une installation en rangées ou avec Tracker, ancrée au sol avec des pieux battus, il sera indispensable d'utiliser une excavatrice de 20 tonnes en raison de la profondeur d'ancrage. Des engins de battage plus petits qui n'endommagent pas le terrain pourront servir pour des profondeurs d'ancrage plus réduites et des sols appropriés. Les installations Mover sont construites sur de grands socles de béton livrés par des véhicules de transport lourds, il en est de même pour les constructions modulaires préfabriquées. Des grues de chantier seront également utilisées pour la pose et le montage sur place.

#### **b) Déplacement de terre**

C'est surtout lors de la réalisation des tranchées à câbles (profondeur 0,70 m à 0,90 m) qu'il faut soulever de grosses quantités de terre. Ces déplacements de terre (c.-à-d. nivellements et remblais) servent parfois à compenser les différences de relief.

#### **c) Bruits, vibrations et pollutions temporaires**

Le chantier peut durer plusieurs mois selon la taille de l'installation. Pendant cette période, il faut s'attendre à des bruits liés aux activités des véhicules de transports, aux travaux de montage et aux engins de construction (p. ex. lors du montage et de l'ancrage des structures porteuses et des onduleurs), ainsi qu'à des vibrations (utilisation de pieux de battage). Pendant la phase de la construction, la circulation est plus intense sur les routes d'accès et provoque des nuisances sonores pour les riverains.

Les travaux de terrassement occasionnent des émissions de poussière diffuse notamment par temps sec. Ces nuisances sont limitées dans le temps et l'espace et peuvent être prévenues par des mesures courantes, comme l'arrosage des voies d'accès et du site.

Il faut en outre s'attendre à des gaz d'échappement provenant des engins de construction et véhicules de transport.

### **2.1.2 Pressions du projet liées à la nature de l'installation photovoltaïque**

Les impacts liés à l'installation découlent de la nature de l'installation mise en regard de la sensibilité du site et du milieu naturel.

### **a) Imperméabilisation du sol**

Une imperméabilisation du sol est causée par la pose de fondations, ainsi que la construction de bâtiments d'exploitation et d'aménagements (le cas échéant routes, parkings ou zones de manœuvre). Il faut en général compter un taux d'imperméabilisation inférieur à 5 % de la surface totale d'une installation photovoltaïque.

Dans le cas d'une fondation sur pieux, le taux d'imperméabilisation est inférieur à 2 % et est déterminé presque exclusivement par la surface au sol du bâtiment d'exploitation. Dans le cas d'une fondation flottante (en béton), le taux d'imperméabilisation (bâtiment d'exploitation compris) est inférieur à 5 %. Des installations à deux axes sur une fondation flottante présentent globalement une imperméabilisation un peu plus réduite que des installations en rangées avec fondation flottante.

### **b) Recouvrement du sol**

La surface recouverte par une installation est la projection de la surface modulaire sur le plan horizontal. Pour une installation fixe en rangées, la proportion de surface recouverte représente, selon le type de cellules, 30 % à 35 % de la surface de montage proprement dite. Pour des installations pivotantes, il n'y a pas de surface recouverte au sens propre du terme, puisqu'elle varie.

Le recouvrement du sol provoque de l'ombre et l'assèchement superficiel du sol par la réduction des précipitations sous les modules. L'eau qui s'accumule aux bords des modules peut en outre provoquer une érosion du sol lorsqu'elle s'écoule en des endroits localisés. L'intensité des impacts dépend du type d'installation (pivotante ou non), ainsi que de la hauteur et de la taille des unités modulaires.

La dimension de la surface en permanence ou en partie ombragée d'une installation change en fonction de la course du soleil et peut se calculer avec exactitude. Dans le cas d'une installation fixe, les surfaces situées en dessous des modules sont ombragées toute l'année. Elles reçoivent toutefois de la lumière diffuse en raison de la hauteur minimale des modules (généralement respectée) d'environ 0,80-1,00 m au-dessus du sol. Les surfaces entre les rangées de modules sont ombragées surtout quand le soleil est bas.

Dans le cas des installations pivotantes, il y a peu de surfaces ombragées en permanence en raison de l'orientation variable. Les calculs relatifs aux installations Mover montrent que 6 à 8 % seulement de la surface modulaire présentent une ombre permanente.

Une concentration d'eau de pluie le long du bord inférieur de tables modulaires fixes peut provoquer des rigoles d'érosion. Le dommage causé par l'égouttement d'eau à la bordure des tables modulaires dépend du nombre de modules superposés à l'intérieur d'une rangée modulaire individuelle. En général, les installations se composent de deux ou trois rangées, de quatre rangées dans des cas isolés. On relève les valeurs caractéristiques suivantes. Pour les installations à deux rangées, 1 m courant de bord d'égouttement permet d'écouler environ 3 m<sup>2</sup> de surface de précipitation. Pour les installations à quatre rangées, on observe 5,50 m<sup>2</sup> de surface de précipitation par mètre. En dehors de la force et de la quantité d'eau

tombant sur le sol, la nature du sol et l'inclinaison du terrain influencent la formation de rigoles d'érosion.

### c) Effets optiques

Les installations photovoltaïques peuvent créer divers effets optiques, dont les impacts sur les différentes composantes de l'environnement seront détaillés dans le paragraphe 2.2. :

- miroitements sur les surfaces dispersives (modules) et les surfaces lisses moins dispersives (constructions métalliques) ;
- reflets créés par des miroitements sur les surfaces de verre lisses réfléchissantes ;
- formation de lumière polarisée due à la réflexion.

**Miroitements** : Les phénomènes de réflexion pénalisent les performances techniques de l'installation. La pose d'une couche anti-reflets sur les cellules et l'utilisation de verres frontaux spéciaux permet de diminuer ce phénomène, qui reste cependant marginal. Les verres de haute qualité laissent passer environ 90 % de la lumière. Environ 2 % sont diffusés et absorbés et 8 % seulement réfléchis. Les couches anti-reflets modernes peuvent augmenter la transmission solaire jusqu'à plus de 95 % et ramener la réflexion en dessous de 5 %. Par ailleurs, quand le soleil est bas (angle d'incidence inférieur à 40°), les réflexions augmentent et, avec une incidence de 2°, la réflexion des rayons du soleil est totale.

Le miroitement ne concerne pas uniquement les surfaces modulaires. Les éléments de construction (cadres, assises métalliques) peuvent également refléter la lumière. Ces éléments n'étant pas orientés systématiquement vers la lumière, des réflexions sont possibles dans tout l'environnement. Sur les surfaces essentiellement lisses, la lumière de réflexion se diffuse moins intensément.

**Reflets** : Les éléments du paysage se reflètent sur les surfaces réfléchissantes. Les structures de l'habitat ainsi réfléchies peuvent, par exemple, simuler un biotope pour des oiseaux et les inciter à s'approcher en volant, et donc représenter un danger. Les modules Wafer fréquemment utilisés n'ont qu'une très faible capacité de réflexion en raison de leur couleur et de la structure de leur surface. Les modules à couche mince peuvent par contre présenter un fort potentiel de réflexion à cause des surfaces en verre généralement lisses, de leur couleur foncée et dans certaines conditions lumineuses.

**Polarisation de la lumière** : La lumière du soleil est polarisée par la réflexion sur des surfaces lisses brillantes (par exemple la surface de l'eau, les routes mouillées). Le plan de polarisation dépend de la position du soleil. Certains insectes (p. ex. abeilles, bourdons, fourmis, quelques insectes aquatiques volants) ont cette aptitude bien connue de percevoir la lumière polarisée dans le ciel et de se guider sur elle. Comme la réflexion de la lumière sur les surfaces modulaires risque de modifier les plans de polarisation de la lumière réfléchie, cela peut provoquer des gênes chez certains insectes et oiseaux, qui risquent de les confondre avec des surfaces aquatiques.

#### d) Perception visuelle

Le montage respecte des modèles géométriques stricts, et forme des points ou des lignes selon le type d'installation. La hauteur maximale des modules d'une installation est de 6,00 m (cas des « Mover »). Les modules d'une installation photovoltaïque au sol sont en général souvent concentrés sur la surface disponible afin de minimiser les frais de câblage. En général, la pose des câbles de raccordement au réseau est souterraine pour des raisons de coûts. En Allemagne, il n'existe aucune installation raccordée en surface, mais cette solution pourrait être envisagée dans le cas de conditions topographiques défavorables par exemple.

#### e) Clôture

Partout où il est possible de retirer des modules de leur ancrage, les compagnies d'assurance exigent généralement une clôture d'au moins 2,00 m de haut avec système d'alarme et dispositifs de surveillance. L'obligation de clôturer n'est pas nécessaire aux installations dont il est impossible de retirer des modules sans les détruire (p. ex. modules collés sur le cadre) ni aux installations qui se trouvent sur un terrain surveillé ou protégé d'une autre manière. Il est à noter que les clôtures provoquent l'isolation des biotopes et un effet de barrière.



Figure 3 : Clôture de sécurité avec socle en maçonnerie (Photo : M. Reichmuth)

#### f) Échauffement des modules et dégagement de chaleur

Les fabricants de modules solaires s'efforcent de réduire l'échauffement au minimum, car l'élévation de la température réduit le rendement des cellules solaires. En général, les modules chauffent jusqu'à 50°C, et à plein rendement, la surface des modules peut parfois atteindre des températures supérieures à 60 °C. Toutefois, contrairement aux installations sur les toits, les installations photovoltaïques au sol bénéficient d'une meilleure ventilation à l'arrière et chauffent donc moins. Les supports en aluminium sont moins sujets à l'échauffement. Ils atteignent des températures d'environ 30 °C dans des conditions normales.

### **2.1.3 Impacts du projet liés à l'exploitation**

Les impacts du projet liés à l'exploitation englobent tous les phénomènes se manifestant lors de l'exploitation et de la maintenance d'une installation photovoltaïque au sol.

#### **Pollutions chimiques**

Les supports et constructions porteuses des modules peuvent dégager dans certaines conditions des quantités minimales de substances dans l'environnement. L'acier utilisé pour le montage des modules a un revêtement zingué anticorrosion. Par temps de pluie, le contact de l'acier zingué avec l'eau peut entraîner un lessivage des ions de zinc dans la nappe phréatique.

#### **Bruits**

Les moteurs des installations pivotantes font du bruit en fonctionnant. Selon les exploitants, le niveau sonore des « Mover » est de 30 dB (A), ce qui correspond au tic-tac d'un réveil. Ces bruits sont émis du lever au coucher du soleil (env. toutes les 10 minutes pendant 3-5 secondes). À la fin de la journée (environ une heure après le coucher du soleil), les modules s'arrêtent selon la commande de l'installation.

#### **Champs électriques et magnétiques**

Les modules solaires et les câbles de raccordement à l'onduleur créent la plupart du temps des champs continus (électriques et magnétiques). Les onduleurs et les installations raccordés au réseau de courant alternatif, le câble entre l'onduleur et le transformateur, ainsi que le transformateur lui-même créent de faibles champs de courant continu (électriques et magnétiques) dans leur environnement.

#### **Maintenance**

Il y a actuellement peu de retour d'expérience exploitable concernant la nécessité de maintenance (réparations, remplacement de pièces, etc.) des installations photovoltaïques au sol. Dans le cadre d'un fonctionnement normal, il faut en général compter deux opérations de maintenance par an. Par rapport à d'autres types d'installations, les installations pivotantes sont exposées à un risque plus élevé de dysfonctionnement en raison de la technique de commande.

L'état actuel des connaissances ne permet pas d'indiquer dans quelle mesure un « repowering » (échange des modules existants contre des modules plus puissants pour des raisons économiques) s'impose. Compte tenu de l'évolution rapide de la technique des modules, cette possibilité n'est toutefois pas totalement à exclure.

L'encrassement des modules par la poussière, le pollen ou la fiente peut en général porter préjudice au rendement. Les propriétés antialissures des surfaces des modules et l'inclinaison habituelle de 30° permettent un auto-nettoyage des installations photovoltaïques au sol par l'eau de pluie. Dans la pratique, les installations photovoltaïques au sol étudiées n'ont pas eu besoin d'un nettoyage manuel de grande envergure.

## 2.1.4 Tableau synthétique

**Tableau 2 : Facteurs potentiels d'impact des installations photovoltaïques au sol**

	Description des effets	Evaluation des effets
<b>Phase de construction de l'installation photovoltaïque</b>	<b>Imperméabilisation partielle / temporaire du sol</b> (voies d'accès empierrées pour l'accès à l'installation ou routes de chantier, lieux d'entreposage et de garage)	Surface imperméabilisée temporairement ou définitivement en m <sup>2</sup>
	<b>Tassement du sol</b> (par l'utilisation de véhicules lourds de chantier et de transport)	Surface en m <sup>2</sup> concernée par le déplacement des engins
	<b>Déplacement et mélange de terre</b> (en raison de la pose de câbles enterrés et du modelage du terrain)	Surface concernée en m <sup>2</sup> , volume déplacé en m <sup>3</sup>
	<b>Bruits, vibrations et pollutions</b> (en raison de la circulation sur le chantier et des travaux de construction)	Bruit en dB (A), vibrations, apport de poussière : évaluation qualitative
<b>Nature de l'installation photovoltaïque</b>	<b>Imperméabilisation du sol</b> (fondations, bâtiments d'exploitation, éventuellement chemins d'accès, parkings, etc.)	Surface en m <sup>2</sup> imperméabilisée durablement
	<b>Recouvrement du sol</b> (par des modules) : - ombre - modification de l'écoulement des eaux de surface - érosion due à l'écoulement de l'eau	Surface en m <sup>2</sup> , évaluation qualitative
	<b>Lumière</b> - miroitements - reflets - polarisation de la lumière reflétée	Évaluation qualitative
	<b>Perception visuelle</b> - nuisance visuelle - illusion d'optique	Hauteur des modules en m ; Présence de cône de visibilité
	<b>Clôture</b> - confiscation de surface - découpage / effet de barrière	Surface utilisée en m <sup>2</sup> ou ha ; longueurs de clôture en mètres linéaires, évaluation qualitative des surfaces restantes
<b>Phase de fonctionnement<sup>4</sup> (exploitation)</b>	<b>Bruits, pollutions</b>	Évaluation qualitative et temporelle
	<b>Dégagement de chaleur</b> (échauffement des modules)	Évaluation qualitative
	<b>Champs électriques et magnétiques</b>	Évaluation qualitative
	<b>Maintenance</b> (maintenance et entretien réguliers, réparations imprévues, remplacement de modules)	Nombre d'opérations de maintenances /an ou mois prévues

<sup>4</sup> Une évaluation quantitative peut également être réalisée pour le bruit, le dégagement de chaleur ou les champs électriques

## 2.2 Analyse des impacts potentiels des installations photovoltaïques au sol sur l'environnement

L'état actuel des connaissances conduit à penser des impacts potentiellement importants peuvent se produire sur le sol et le cadre naturel :

- « sol » en raison des travaux de terrassement et de l'utilisation en surface d'engins de construction et de véhicules de transport lourds mais aussi d'une possible utilisation de sols dédiés à l'agriculture;
- « paysage ou cadre naturel » en raison de la prégnance visuelle notamment sur des zones étendues ou exposées.

Un mauvais choix du site (par exemple utilisation de zones de haltes pour oiseaux migrateurs) et la transformation d'une grande surface peuvent avoir aussi des impacts sur la biodiversité. Les conflits avec les biens à protéger (eau, climat) et les riverains sont plutôt minimales et se limitent essentiellement à la durée de la phase de construction.

Les effets environnementaux seront positifs si un projet réquisitionne des surfaces peu appropriées pour la protection des espèces et de leur biotope et les revalorise pour favoriser leur vocation de zones de refuge de biodiversité. Les paragraphes suivants présentent les impacts attendus pour chacun des thèmes environnementaux.

### 2.2.1 Flore

Les sites d'implantation des installations photovoltaïques au sol sont modifiés du fait de la construction des modules et des installations accessoires.

L'évaluation de l'impact de ces changements du point de vue de la protection de l'environnement dépend des conditions spécifiques au site (état initial). L'utilisation antérieure du sol, le caractère des biotopes avant l'installation photovoltaïque et la gestion prévue des surfaces d'exploitation après la construction de l'installation photovoltaïque au sol jouent un rôle décisif. C'est pourquoi on distinguera le cas des installations implantées sur des surfaces à caractère agricole de celui des installations implantées sur des sites industriels ou militaires.

#### **« Cas des installations implantées sur des surfaces à caractère agricole »**

Suite aux travaux de construction, on peut laisser la végétation recoloniser naturellement le milieu. Cette forme de végétalisation souhaitable pour la protection de la nature garantit une diversité maximale d'espèces et d'associations végétales. Les premières années se caractérisent par une nette rareté de la végétation. Il pousse d'abord des plantes sauvages annuelles qui étaient des commensales de cultures antérieures. Au cours des années suivantes, les plantes rudérales bisannuelles, mais aussi vivaces pluriannuelles prolifèrent. Aux herbes sauvages succèdent des plantes vivaces et une composition des espèces très uniforme apparaît sur de petites surfaces.

La consommation de cette végétation pionnière par des moutons est difficilement envisageable c'est pourquoi un semis est parfois réalisé pour améliorer l'utilisation comme pâturage.

Le développement de la végétation sur les surfaces est essentiellement déterminé par la présence de substances nutritives dans le sol et par le type d'exploitation agricole (récolte de fourrage ou pâturage). On constatera par exemple l'apparition d'espèces nitrophiles lors du pâturage.

L'ombre projetée par les modules en rangées ou dans les installations pivotantes ne semble pas induire une absence totale de végétation. Les installations photovoltaïques ordinaires actuelles respectant une hauteur de 80 cm au sol permettent aux plantes de pousser de manière homogène dans la mesure où la pénétration de lumière diffuse est possible même en dessous des tables modulaires.

Le recouvrement du sol par des modules a pour autre effet de le protéger de l'eau de pluie. L'apport naturel d'humidité est en conséquence réduit en dessous des modules, et l'écoulement relativement orienté de l'eau de pluie peut créer en même temps des zones plus humides. Les analyses existantes n'ont fourni jusqu'à présent aucune preuve significative d'une modification durable de la végétation due à ce phénomène (p. ex. surfaces nues suite à la sécheresse sous les modules).

#### **« Cas des centrales solaires implantées sur des sites industriels ou militaires »**

Les anciens sites industriels ou militaire<sup>5</sup> peuvent présenter un potentiel de conflit avec l'installation photovoltaïque, qui est relativement élevé dans certaines conditions, en particulier s'il s'agit de surfaces relativement peu imperméabilisées anciennement dédiées à une utilisation militaire qui n'a pas perturbé des biotopes fragiles et/ou rares (p. ex. formation de biotopes de sols arides et secs).

Dès la phase de la construction, l'activité du chantier et la réalisation de tranchées pour les câbles risquent d'endommager la couverture végétale antérieure. Le chantier risque d'entraîner une modification durable de la composition végétale. L'utilisation de fondations en béton réduit de manière durable la surface végétale.

Le recouvrement de la végétation existante par des modules photovoltaïques risque, sur ce type de terrain et selon la fragilité de la végétation, de faire disparaître la composition végétale initiale en modifiant les conditions lumineuses et hydriques. Il faut s'attendre également à de nettes différences des effets du recouvrement en fonction du type d'installation utilisé.

## **2.2.2 Faune**

### **a. Oiseaux**

L'occupation de surfaces par des constructions ou installations et les changements d'utilisation du sol qui leur sont liés sont susceptibles d'entraîner des effets tant positifs que négatifs sur l'avifaune.

Une partie des espèces d'oiseaux existantes continuera à vivre ou nicher au sein des installations, mais il faut s'attendre à des dégradations temporaires dues à la construction. D'autres espèces pourront perdre entièrement ou partiellement leur biotope si celui-ci est

---

<sup>5</sup> Ce cas est relativement spécifique à l'Allemagne

endommagé. Certaines espèces pourront être particulièrement affectées (p. ex. l'alouette des champs, le pipit rousseline ou le busard Saint-Martin).

- Effets sur l'utilisation de l'espace

Les suivis au sein des sites allemands révèlent que de nombreuses espèces d'oiseaux peuvent utiliser les zones entre les modules et les bordures d'installations photovoltaïques au sol comme terrain de chasse, d'alimentation ou de nidification. Certaines espèces comme le rouge-queue noir, la bergeronnette grise et la grive litorne nichent sur les supports d'assises en bois, tandis que d'autres espèces comme l'alouette des champs ou la perdrix ont pu être observées en train de couvrir sur des surfaces libres entre les modules. En dehors des espèces nicheuses, ce sont surtout des oiseaux chanteurs provenant de bosquets voisins qui cherchent leur nourriture dans les surfaces des installations. En automne et en hiver, des colonies plus nombreuses d'oiseaux chanteurs (linottes mélodieuses, moineaux, bruants jaunes, entre autres) élisent domicile sur ces surfaces. Les zones non enneigées sous les modules sont privilégiées en hiver comme réserves de nourriture. Des espèces comme la buse variable ou le faucon crécerelle ont été observées en train de chasser à l'intérieur d'installations. Les modules photovoltaïques ne constituent pas des obstacles pour les rapaces.

- Effets optiques

Comme les observations des comportements le révèlent, les modules solaires eux-mêmes servent souvent de poste d'affût ou d'observation pour les oiseaux. Les mouvements des modules sur des installations pivotantes ne provoquent pas un envol soudain des oiseaux. Il n'y a aucun indice de perturbation des oiseaux par des **miroitements** ou des **éblouissements**.

Les observations permettent de conclure que les installations photovoltaïques au sol peuvent avoir des effets tout à fait positifs pour une série d'espèces d'oiseaux. C'est en particulier dans des paysages agricoles soumis à une exploitation intensive que les installations photovoltaïques (en général) de grande taille peuvent devenir des biotopes précieux pour l'avifaune, par exemple l'alouette des champs, la perdrix, la bergeronnette printanière et sans doute aussi la caille, l'ortolan et le bruant proyer, dans la mesure où ils constituent des refuges, et pour les raisons évoquées plus haut. Des espèces d'oiseaux des champs qui n'ont pas besoin de grandes zones ouvertes (p. ex. le pipit farlouse ou tarier des prés) en bénéficient probablement aussi.

On entend souvent dire que des oiseaux aquatiques ou limicoles pourraient prendre les modules solaires pour des surfaces aquatiques en raison des **reflets** (spectre lumineux modifié et polarisation) et essayer de s'y poser. Les chaussées ou parkings mouillés donnent lieu à un phénomène similaire. Pour des espèces comme les plongeurs, cela poserait un problème car ils peuvent difficilement prendre leur envol depuis le sol. L'examen d'une installation photovoltaïque au sol de grande envergure à proximité immédiate du canal Main-Danube et d'un immense bassin de retenue occupé presque toute l'année par des oiseaux aquatiques n'a toutefois révélé aucun indice d'un tel risque de confusion. On a pu observer des oiseaux aquatiques tels que le canard colvert, le harle bièvre, le héron cendré, la mouette rieuse ou le cormoran en train de survoler l'installation photovoltaïque. Aucun changement dans la direction de vol (contournement, attraction) n'a été observé.

- Effarouchement

Par leur aspect, les installations photovoltaïques peuvent créer des **effets de perturbation et d'effarouchement** et par conséquent dans certaines conditions dévaloriser l'attrait de biotopes voisins de l'installation, qui étaient favorables à l'avifaune. Ces effets ne sont pas à exclure, en particulier pour des oiseaux des prés comme le courlis cendré, la barge à queue noire, le chevalier gambette et aussi le vanneau huppé. Il en est de même des oiseaux migrateurs qui se reposent en grand nombre dans des espaces agricoles, par exemple des espèces d'oies nordiques (oies cendrées, oies rieuses, oies des moissons et bernaches nonnettes), des cygnes de Bewick et cygnes chanteurs, grues, vanneaux huppés ou surtout dans les zones côtières, des pluviers dorés.

L'effet d'effarouchement dépend de la hauteur des installations, du relief et de la présence de structures verticales avoisinantes (p. ex. clôtures, bosquets, lignes aériennes, etc.). En raison de la hauteur totale jusqu'à présent encore relativement réduite, il ne faut pas s'attendre à un **comportement d'évitement** de grande envergure. Les éventuelles perturbations se limitent ainsi à la zone de l'installation et à l'environnement immédiat. Ces surfaces peuvent perdre leur valeur d'habitat de repos et de nidification. Il n'est toutefois pas possible de quantifier cet effet actuellement (p. ex. en terme de distance).

#### **b. Insectes**

Un mode de gestion extensif de la surface de l'installation représente une nette amélioration de vie pour la majorité des espèces concernées, en particulier dans les paysages initialement fermés. Le type de revégétalisation et les pratiques agricoles utilisées pour le pâturage ou la récolte de fourrage (p. ex. choix de la période de fenaison) exercent une influence non négligeable sur la qualité des nouveaux biotopes pour les invertébrés.

- Cas des sauterelles

Le peuplement et l'utilisation de ces surfaces par des espèces diurnes ont été examinés avec l'exemple des sauterelles. Des comptages montrent que les espèces de sauterelles se tiennent de préférence dans les zones ensoleillées pendant le jour et évitent les zones ombragées sous les modules. D'autres espèces animales privilégient un biotope ombragé du fait de l'écran qui s'est formé. Il n'est donc pas possible de conclure à une détérioration du biotope.

- Cas des biotopes sensibles

Dans le cas d'installation sur des surfaces de conversion militaires avec une végétation pelouse sèche, les conditions abiotiques prédominantes peuvent changer considérablement en raison de l'ombre provoquée par les panneaux. Les conditions de vie changeraient pour les espèces aimant la chaleur et la sécheresse (p. ex. sauterelles, cincidèles champêtres, apoïdes, etc.). Il pourrait se produire une modification de l'utilisation de l'espace par les espèces, avec une distinction entre les zones ensoleillées et ombragées. L'ampleur possible de telles détériorations ne peut être déterminée qu'au cas par cas, selon l'espèce animale, le site du projet (p. ex. structure de l'habitat, extension, pollution antérieure, ainsi que la dimension de la surface régulièrement ombragée par rapport aux surfaces non ombragées) et les structures ombragées existantes éventuelles (bosquets).

- Cas des insectes aquatiques

Certains insectes aquatiques volants se guident principalement sur la lumière polarisée pour chercher de nouveaux plans d'eau. Il n'est donc pas à exclure que ces insectes soient également attirés par des modules photovoltaïques. D'autres espèces d'insectes volants comme les coléoptères et chrysomèles se guident sur la lumière polarisée et peuvent être également attirés.

### **c. Mammifères**

Les surfaces d'installations où les modules sont peu denses offrent un environnement attrayant pour les petits mammifères grâce aux zones protégées de la pluie.

Des observations révèlent qu'en raison des effets liés au chantier (bruits, odeurs, pollutions lumineuses nocturnes ou présence humaine) des mammifères de grande et moyenne taille évitent les installations photovoltaïques au sol pendant la phase de construction, même en l'absence de clôture. Les observations faites jusqu'à présent montrent, après une certaine période d'accoutumance, et en l'absence de clôture; que des unités modulaires assez volumineuses semblent ne pas avoir d'effet dissuasif ou d'évitement pour des mammifères de grande et moyenne taille.

La clôture du terrain d'exploitation qui entoure généralement les installations photovoltaïques afin de les protéger contre le vol, empêche surtout des mammifères plus gros (par exemple sangliers, chevreuils, cerfs) de pénétrer dans la zone d'une installation photovoltaïque. En plus de la confiscation du biotope, les axes de liaison et corridors de passage traditionnellement empruntés risquent d'être interrompus (effet de barrière).

Il faudrait garantir en général une ouverture dans la clôture pour les mammifères de petite et moyenne taille. Les atteintes à des espèces comme les lièvres, renards ou blaireaux seraient ainsi minimisées (le lièvre par exemple est très attaché à son territoire qui occupe environ 30 ha). Une détérioration des habitats a des répercussions considérables sur la taille de la population et doit donc être évitée.

### **2.2.3 Sol**

Pendant la phase de construction, il faut s'attendre à des modifications du sol. Elles sont cependant très variables selon le type d'installation, la méthode de pose et la taille des modules.

Un compactage net du sol est possible dans le cas de projets incluant des pièces préfabriquées volumineuses (par exemple fondations en béton, grandes installations modulaires) qui ne peuvent être montées qu'avec de lourds engins. Des tassements se produisent particulièrement lorsque des véhicules ont roulé sur le sol à un moment défavorable (par exemple en cas d'humidité persistante). Le compactage et la pollution du sol par des engins de chantier peut entraîner un changement durable de la structure du sol et des facteurs abiotiques du site (eau, air et substances nutritives) ainsi que de la facilité d'enracinement.

Un déplacement de terre détruit totalement la structure du sol existante. Cela se produit surtout lors du creusement de tranchées à câbles et de surfaces de fondations, mais aussi en cas de modification du relief du terrain.

Les fondations des supports de modules représentent une autre source de conflit. Il faut s'attendre à des atteintes relativement minimales dues aux fondations de pieux de plus en plus utilisés (tubes métalliques enfoncés ou vissés dans le sol). Des « fondations lourdes » plus volumineuses (par exemple fondations rondes en béton ou fondations continues) nécessitent davantage de place et occasionnent une imperméabilisation plus importante du sol.

Divers aménagements sont nécessaires pendant la période de construction : création de routes de chantier (en général empierrées), de lieux d'entreposage ou de stationnement de grues, etc. Selon la nature du sous-sol, ces aménagements représentent une détérioration supplémentaire du sol : érosion de la surface, tassement du sol, incorporation de matériaux étrangers au site.

La formation d'une couche fermée de végétation immédiatement après la fin des travaux, réduit les risques d'érosion importante du sol par le vent ou l'eau.

#### **2.2.4 Eau**

Si la nappe phréatique n'est pas impactée suite aux travaux de terrassement (pose de câbles) ou à la pose de fondations dans des zones où la nappe est peu profonde, il ne faut pas s'attendre à ce qu'elle subisse non plus des impacts lors du fonctionnement. Une manipulation correcte de matières dangereuses pour l'eau et une maîtrise des pollutions doivent également éviter une contamination de la nappe phréatique.

L'intensité des précipitations qui atteindra le sol entre et sous les modules variera en fonction de la force du vent. Cependant, on ne constate pas de difficulté majeure d'infiltration dans le sol des précipitations malgré les imperméabilisations ponctuelles du terrain d'installation et le recouvrement par des modules.

#### **2.2.5 Climat/air**

##### **Changement de la fonction d'équilibre climatique local des surfaces**

La construction dense de modules sur des surfaces est susceptible d'entraîner des changements climatiques locaux. Les mesures ont révélé que les températures en dessous des rangées de modules pendant la journée sont nettement inférieures aux températures ambiantes en raison des effets de recouvrement du sol. Pendant la nuit, les températures en dessous des modules sont par contre supérieures de plusieurs degrés aux températures ambiantes. Il ne faut cependant pas en déduire une dégradation majeure des conditions climatiques locales.

##### **Formation d'« îlots thermiques »**

Les surfaces modulaires sont sensibles à la radiation solaire, ce qui entraîne un réchauffement rapide et une élévation des températures. Les températures maximales atteignent autour de 50°-60° et peuvent être dépassées en été par des journées très ensoleillées. La couche d'air qui se trouve au-dessus des panneaux se réchauffe en raison

de cette hausse des températures (par ailleurs indésirable du point de vue énergétique). L'air chaud ascendant occasionne des courants de convection et des tourbillonnements d'air. Il ne faut pas s'attendre à des effets de grande envergure sur le climat dus à ces changements micro-climatiques, bien que ces changements de température puissent influencer positivement ou négativement à petite échelle l'aptitude des surfaces à devenir des habitats pour la faune et la flore.

### **2.2.6 Paysage / cadre naturel**

Les installations photovoltaïques au sol occasionnent un changement du cadre naturel en raison de leur taille, de leur uniformité, de leur conception et des matériaux utilisés. Même si un parc solaire peut paraître esthétique pour des raisons personnelles, il s'agit néanmoins, par son aspect technique, d'un objet étranger au paysage, qui est donc susceptible de porter atteinte au cadre naturel.

L'ampleur des impacts dépend de la structure spécifique du paysage concerné. C'est pourquoi une procédure au cas par cas, qui doit tenir compte du degré de diversité, de spécificité et d'esthétique du cadre naturel s'impose toujours afin d'évaluer les impacts.

#### **a. Visibilité des installations photovoltaïques au sol**

La visibilité d'une installation photovoltaïque au sol dans le paysage dépend de plusieurs facteurs, entre autres des facteurs liés à l'installation (comme les propriétés de réflexion et la couleur des éléments), des facteurs liés au site (situation à l'horizon, illusion d'optique), ainsi que d'autres facteurs comme la luminosité (position du soleil, nébulosité).

Dans l'ensemble, les installations sont généralement bien visibles. Lorsque la surface des modules est visible depuis le point d'observation, l'installation présente une plus grande luminosité et une couleur qui diffère dans le cadre naturel, sous l'effet de la réflexion de la lumière diffuse. Les structures porteuses réfléchissantes, sont moins voyantes que les surfaces des modules, même s'il peut se produire une réflexion directe des rayons du soleil sur ces structures lorsque celui-ci est très bas. Enfin, si les modules apparaissent dans la ligne d'horizon, il se produit une surélévation de celle-ci (illusion d'optique) à faible distance ou en présence de modules particulièrement hauts. Les installations deviennent ainsi très perceptibles dans le cadre naturel.

#### **b. Nature et intensité de la perception dans le paysage**

Il existera toujours un effet dominant à proximité de l'installation en l'absence de mesures de camouflage. L'installation attire déjà l'attention en raison de sa taille et de ses particularités techniques reconnaissables. Les différents éléments de construction peuvent en général être identifiés individuellement. Les facteurs liés à l'installation tels que la couleur, ou encore la position du soleil ont ici peu d'influence sur le niveau d'impact à faible distance.

Plus l'éloignement augmente, plus les éléments individuels ou les rangées d'une installation fusionnent et deviennent indiscernables. L'installation prend alors la forme d'une surface plus ou moins homogène qui se détache alors nettement de l'environnement. La dissimulation de l'installation dépend du relief ou de la présence d'éléments du paysage spécifiques (bosquets, forêt, bâtiments, etc.).

À très grande distance, les installations ne sont plus perçues que comme un élément linéaire qui attire l'attention surtout par sa luminosité, généralement plus élevée que celle de l'environnement. La portée de la zone visible dépend ici fortement du relief et de l'intégration de l'installation dans ce relief. Une forte visibilité est notamment attendue dans les cas suivants :

- dans le cas d'une installation dans une plaine et sans végétation (ces effets sont en partie évitables avec une végétalisation appropriée des abords) ;
- dans le cas d'un relief vallonné et d'une installation photovoltaïque située sur des pentes ;
- et dans le cas d'un relief accidenté et d'une installation photovoltaïque sur des surfaces exposées.



Figure 4 : Impact visuel d'installations photovoltaïques au sol (Photos : C. Herden; Bosch & Partner)

## 2.2.7 Impacts sur la population

Les principaux aspects qui nécessitent la prise en compte de la population riveraine sont :

- **La santé et le bien-être.** En ce qui concerne des installations photovoltaïques au sol, ce sont avant tout des impacts négatifs possibles liés aux bruits de la construction, des effets optiques (miroitements, etc.) et des effets des champs électromagnétiques qui sont envisageables.

- **Le cadre de vie.** Les installations photovoltaïques peuvent entrer en conflit avec d'autres usages du sol, en particulier lorsqu'il y a utilisation de surfaces à proximité d'habitations, modification des voies de communication ou restriction d'accès à des surfaces (par la mise en place de clôtures).
- **La fonction « de repos » (ou récréative).** Il ne faut s'attendre à des impacts négatifs sur cette fonction qu'en cas d'utilisation par les installations photovoltaïques d'espaces essentiels à ces activités ou de limitation, du fait des installations, de leur accessibilité ou de leur qualité.
- **La fonction agricole des espaces.** Les installations photovoltaïques sur des surfaces agricoles entrent en concurrence avec la production alimentaire de ces espaces.

Quelques effets fréquemment cités dans le contexte d'installations photovoltaïques au sol et les impacts négatifs potentiels qui en résultent pour l'homme sont décrits ci-après.

### Effets optiques

Les modules solaires réfléchissent une partie de la lumière. Les modules s'orientant vers le soleil, les éblouissements n'affectent pas de la même façon tous les sites qui se trouvent à proximité d'une installation. Dans le cas d'installations fixes (inclinaison de 30°), les rayons du soleil sont réfléchis en milieu de journée vers le sud, en direction du ciel. Les perturbations au sud d'une installation sont pratiquement inexistantes du fait de l'incidence perpendiculaire.

Quand le soleil est bas (c'est à dire le soir et le matin), la lumière se reflète davantage à cause de l'incidence rasante. Des éblouissements peuvent alors se produire dans des zones situées à l'ouest et à l'est de l'installation. Ces perturbations sont toutefois relativisées car les miroitements des modules sont masqués dans certaines conditions par la lumière directe du soleil. À faible distance des rangées de modules, il ne faut plus s'attendre à des éblouissements en raison de la propriété de diffusion des modules.

Dans le cas d'installations pivotantes, les réflexions sont évitées par l'orientation toujours optimale vers le soleil. Des réflexions résiduelles peuvent se produire encore une fois, surtout dans les zones situées à l'ouest et à l'est d'une installation, mais elles sont négligeables, même avec ce type d'installation (à faible distance), en raison des radiations diffuses.

### Radiations électromagnétiques

Les émetteurs potentiels de radiations sont les modules solaires, les lignes de connexion, les onduleurs et les transformateurs. En général, les onduleurs se trouvent dans des armoires métalliques qui offrent une protection. Comme il ne se produit que des champs alternatifs très faibles, il ne faut pas s'attendre à des effets significatifs pour l'environnement humain. S'il n'y en a pas sur place, des transformateurs standards (identiques aux transformateurs présents sur les zones d'habitation) sont construits sur le terrain de l'installation photovoltaïque. Les puissances de champ maximales pour ces transformateurs sont inférieures aux valeurs limites à une distance de quelques mètres. À une distance de 10 m de ces transformateurs, les valeurs sont généralement plus faibles que celles de nombreux appareils électroménagers.

## Effets visuels

Les qualités esthétiques du paysage sont indispensables au promeneur ou à l'observateur de la nature. Un paysage intégrant une installation photovoltaïque peut perturber le caractère reposant du site et lui donner l'impression d'être techniquement marqué. En principe, un choix approprié du site permet d'éviter d'éventuels impacts négatifs sur la fonction de repos, mais aussi sur les zones d'habitation.

### 2.2.8 Patrimoine culturel

En ce qui concerne le patrimoine culturel à protéger, on considérera les paysages culturels historiques et les éléments de patrimoine architectural ou culturel (certaines villes et localités, monuments architecturaux et sites naturels protégés), y compris leur environnement si cela est nécessaire. Mais dans ce cas aussi, un choix circonstancié du site permet d'éviter en général d'éventuels impacts négatifs sur le patrimoine culturel et naturel.

### 2.2.9 Aperçu des impacts négatifs potentiels

Le tableau ci-dessous synthétise les impacts négatifs potentiels pour chacun des thèmes développés précédemment. Ces impacts potentiels sont à apprécier au regard de la sensibilité du site.

**Tableau 3 : Impacts négatifs potentiels sur le patrimoine à protéger**

Effets	Impacts négatifs potentiels
<b>Flore</b>	
<b>Utilisation de surfaces</b> (imperméabilisation du sol, terrassements, installation de modules)	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Détérioration liée à la destruction de la couverture végétale existante par la circulation de véhicules, la pose de câbles, etc.</li> <li>o Perte de végétation sur de petites surfaces, due à l'imperméabilisation partielle.</li> <li>o Perturbation des biotopes contigus</li> <li>o Modification de la végétation autochtone par l'apport sur le site de substrats étrangers (pouvant contenir des espèces invasives) pour la construction de routes de chantier.</li> </ul>
<b>Tassement du sol</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Modification durable de facteurs abiotiques du site (ex. saturation d'eau) et donc modification de la composition végétale.</li> </ul>
<b>Recouvrement du sol</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Modification du spectre des espèces, perte d'espèces héliophiles (ex. sur des biotopes rares de milieux secs ou arides) au profit d'espèces d'ombre.</li> </ul>
<b>Pollutions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Perturbation et modification de la végétation.</li> </ul> <p><b>→ Il ne faut s'attendre à des impacts négatifs que dans des cas isolés.</b></p>
<b>Fenaison et pâturage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Modification de la couverture végétale par rapport à l'état initial (apports azotés et sélection des espèces par le pâturage, ensemencement artificiel).</li> </ul>

**Guide sur la prise en compte de l'environnement dans les installations photovoltaïques au sol  
- l'exemple allemand -**

<b>Effets</b>	<b>Impacts négatifs potentiels</b>
<b>Faune</b>	
<b>Bruits temporaires</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Dérangeant des animaux en raison des bruits du chantier.</li> <li>→ <b>Il ne faut pas s'attendre à des impacts sonores lors de l'exploitation.</b></li> </ul>
<b>Utilisation de surfaces</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Perte de leurs biotopes pour certaines espèces (p. ex sur des lieux identifiés comme biotopes appropriés pour le busard cendré, la grande outarde, le hamster d'Europe, etc.)</li> <li>o Modification / perturbation de biotopes riverains (p. ex. lieux de nidification des grands oiseaux)</li> <li>o Perte de lieux de nidification pour des espèces sensibles d'oiseaux des prés</li> </ul>
<b>Recouvrement du sol</b> par les panneaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Modification de la fonction d'habitat pour des espèces aimant la chaleur et la sécheresse comme les sauterelles, les apoïdes, etc.</li> </ul>
<b>Lumière</b> (polarisation de la lumière réfléctée)	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Mortalité ou blessures dues à l'effet d'attraction des surfaces modulaires (modules confondus avec des plans d'eau)</li> <li>→ <b>Il n'est pas possible d'évaluer pour l'instant le risque pour des insectes</b>, il serait minime pour les libellules selon l'état actuel des connaissances ; des impacts négatifs sont envisageables pour les oiseaux uniquement dans des cas isolés (ex. en cas de mauvaises conditions de visibilité)</li> </ul>
<b>Perception visuelle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Perte de haltes migratoires (zones de repos et d'alimentation) pour des oiseaux migrants (ex. en cas d'utilisation par les installations de surfaces importantes pour les grues, limicoles ou espèces d'ois nordiques qui traversent la zone considérée)</li> </ul>
<b>Clôture</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Confiscation de biotopes pour des mammifères de grande et moyenne taille</li> <li>o Isolation et fragmentation de populations animales et de structures d'habitats</li> <li>o Perte et/ou modification de corridors écologiques par l'effet de barrière de l'installation</li> </ul>
<b>Fenaison et pâturage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Influence sur la structure de l'habitat naturel (en comparaison avec l'utilisation antérieure)</li> </ul>

**Guide sur la prise en compte de l'environnement dans les installations photovoltaïques au sol  
- l'exemple allemand -**

<b>Effets</b>	<b>Impacts négatifs potentiels</b>
<b>Sol</b>	
<b>Imperméabilisation du sol</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Perte et diminution des fonctions naturelles du sol (fonction de biotope, fonction de régulation et de réservoir, fonction de tampon et de filtre)</li> <li>o Perte de la capacité de rétention d'eau</li> </ul>
<b>Tassement du sol</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Modification de la structure du sol/de la consistance du sol et donc diminution des fonctions naturelles du sol (fonction de biotope, de régulation et de réservoir, de tampon et de filtre)</li> <li>o Perte de la capacité de rétention d'eau</li> </ul>
<b>Érosion du sol</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Perte et diminution des fonctions naturelles du sol (fonction de biotope, de régulation et de réservoir, de tampon et de filtre)</li> </ul> <p>→ <b>Il ne faut s'attendre à des impacts négatifs que dans des cas isolés.</b></p>
<b>Pollutions chimiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Dégradation du sol par l'apport de substances chimiques</li> <li>o Modification des fonctions naturelles du sol (fonction de biotope, de régulation et de réservoir, de tampon et de filtre)</li> </ul> <p>→ <b>Il ne faut s'attendre à des impacts négatifs que dans des cas isolés.</b></p>
<b>Eau</b>	
<b>Imperméabilisation du sol Tassement du sol</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Perte de surfaces à fonction de rétention</li> </ul>
<b>Pollutions chimiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Pollution de la nappe phréatique par l'apport de substances nocives</li> <li>o Diminution de la qualité de la nappe phréatique</li> </ul> <p>→ <b>Il ne faut s'attendre à des impacts négatifs que dans des cas isolés.</b></p>
<b>Climat</b>	
<b>Imperméabilisation du sol</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Perte de structures végétales permettant une régulation micro-climatique</li> <li>o Modification des conditions d'irradiation</li> </ul> <p>→ <b>Il ne faut s'attendre à des impacts négatifs que dans des cas isolés.</b></p>
<b>Recouvrement du sol</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Modification du microclimat sous les modules en raison des effets de recouvrement (et également au-dessus des modules par le dégagement de chaleur).</li> <li>o Perturbation de l'arrivée d'air froid</li> </ul> <p>→ <b>Il ne faut s'attendre à des impacts négatifs que dans des cas isolés.</b></p>
<b>Paysage / cadre naturel / fonctions de l'espace</b>	
<b>Utilisation de surfaces / impact visuel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Empreinte technique sur le paysage</li> <li>o Modification d'éléments marquants du cadre patrimonial historique et culturel</li> <li>o Modification des usages de l'espace (agricole, récréatif...)</li> </ul>
<b>Effets optiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Perturbations optiques (miroitements, illusions d'optique, etc.)</li> <li>o Modification de la luminosité des surfaces</li> </ul>
<b>Voisinage</b>	
<b>Bruits, vibrations, pollutions temporaires</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Impact négatif sur le bien-être humain par l'activité sur le chantier</li> </ul>

**Guide sur la prise en compte de l'environnement dans les installations photovoltaïques au sol  
- l'exemple allemand -**

---

<b>Effets</b>	<b>Impacts négatifs potentiels</b>
<b>Effet visuel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Diminution de la fonction récréative d'espaces à proximité d'habitations en raison de l'empreinte technique sur le paysage</li> <li>o Diminution de la qualité de l'image du cadre de vie local</li> </ul>
<b>Clôture</b> (confiscation de surfaces, effet de barrière)	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Perte d'espaces libres à proximité d'habitations</li> <li>o Perte de surfaces récréatives</li> <li>o Modification de la proximité, l'accessibilité ou la viabilité d'espaces libres à proximité d'habitations et de surfaces récréatives</li> </ul>
<b>Patrimoine culturel</b>	
<b>Utilisation de surfaces / impact visuel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Perte d'espaces naturels</li> <li>o Empreinte technique dans l'environnement de monuments culturels, architecturaux et naturels protégés ou dignes de l'être et donc modification de leurs qualités intrinsèques</li> </ul>

### 3 Critères de sélection du site d'implantation et cadrage préalable de l'étude d'impact

#### 3.1 Critères économiques et énergétiques lors du choix du site

La recherche des meilleurs sites d'implantation d'installations photovoltaïques au sol devra toujours concilier, voire harmoniser les exigences économiques et énergétiques décrites ci-après avec les enjeux naturels et paysagers.

Tableau 4 : Critères techniques et économiques à prendre en compte lors du choix du site

	Critères techniques et économiques
<b>Facteurs naturels du site</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Radiation globale maximale</li><li>• Angle de radiation favorable, si possible avec une exposition au sud</li><li>• Ombrage évité, du fait de la végétation ou des bâtiments environnants</li><li>• Conditions climatiques favorables (couches nuageuses peu fréquentes)</li><li>• Propriétés du sol favorables (choix des fondations)</li></ul>
<b>Infrastructure énergétique</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Possibilités de raccordement à l'infrastructure électrique</li><li>• Situation du point d'alimentation Haute Tension</li><li>• Charge actuelle du réseau</li></ul>
<b>Autres critères</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Coûts d'acquisition de terrain (bail emphytéotique)</li><li>• Acceptation / soutien local (élus, population, administration)</li><li>• Accès (voirie)</li></ul>

#### 3.2 Critères environnementaux lors du choix du site

Le choix d'un site adapté est déterminant pour l'implantation d'installations photovoltaïques au sol. Si la sélection du site est bonne, la probabilité d'un impact négatif durable sur l'environnement sera minimisée.

Des surfaces présentant un degré élevé de pollution antérieure et qui ne laissent présager aucune détérioration ou des impacts négatifs minimes sur l'environnement conviennent en principe pour l'implantation d'installations photovoltaïques au sol. Ce sont en particulier des surfaces :

- dont la fonction de biotope, la fonction de fragment de biotope et la fonction d'habitat sont déjà considérablement endommagées (ex. par le bruit) ;
- dont les fonctions géologiques sont fortement endommagées (ex. par l'imperméabilisation, le tassement du sol et/ou sa contamination) ;
- dont le cadre naturel est déjà considérablement altéré par des constructions et d'autres objets techniques comme la voirie, etc. et n'est donc pas sensible aux impacts du projet,

Il est à noter également que les installations photovoltaïques, par la gestion du milieu qui leur est associée, **peuvent contribuer à restaurer des milieux dont la fonctionnalité est altérée** (milieux en cours de fermeture, zones de déprise, etc.).

Le tableau 5 indique la nature des surfaces qui répondent aux remarques précitées et apparaissent de ce fait prioritaires pour l'implantation d'une installation photovoltaïque au sol en Allemagne.

**Tableau 5 : Zones présentant un faible potentiel de conflit (zones appropriées en Allemagne)**

<b>Zones présentant un faible potentiel de conflit (zones appropriées)</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Terrains vagues à proximité d'habitations (friches)</li><li>• Surfaces artificialisées (ex. zones de parking – ajout d'un nouvel usage)</li><li>• Zones industrielles</li><li>• Sites présentant une pollution antérieure et ayant accueilli de grandes installations techniques (ex. friches industrielles)</li><li>• Zones tampons le long de grandes artères, installations antibruit</li><li>• Zones de stockage de déchets, terrils</li><li>• Surfaces à haut niveau d'imperméabilisation sans fonctions écologiques ou esthétiques particulières</li><li>• Autres surfaces en friches utilisées autrefois pour la construction</li><li>• Zones de déprise, milieux fermés</li></ul>

D'autres zones présentent également un intérêt pour la mise en place d'installations photovoltaïques au sol. Il s'agit des terrains militaires et des espaces agricoles, qui présentent des contraintes particulières.

### **Terrains militaires**

De nombreux sites militaires sont aujourd'hui des sites particuliers qui servent d'habitat secondaire ou de zones refuge pour des espèces d'oiseaux menacées. Ces zones sont souvent identifiées aujourd'hui au titre du réseau européen Natura 2000 et font l'objet d'exigences de protection particulières qu'il convient de prendre en compte lors de la planification des projets.

### **Terrains agricoles**

Sous les formes d'exploitation intensives existantes, les terrains agricoles sont souvent devenus des biotopes défavorables pour de nombreuses espèces (oiseaux des champs et coléoptères par exemple).

Pourtant, les surfaces cultivables peuvent prendre une grande valeur pour la protection de la nature lorsqu'elles sont insérées dans des espaces écologiques qui remplissent notamment les fonctions suivantes :

- des zones importantes pour le repos et la nourriture d'oiseaux migrateurs (entre autres oies, canards, grues et limicoles) ;

- des zones importantes servant de lieu de reproduction habituel pour des espèces très menacées (ex. grande outarde, busard cendré, hamster d'Europe) ;
- des zones comportant une forte dissémination de biotopes importants isolés;
- des zones servant de biotope annexe ou d'axe écologique important pour des espèces à protéger venant de zones contiguës (ex. terrain de chasse du milan royal, corridor de liaison entre des plans d'eau, par exemple pour les castors ou les loutres) ;
- zones servant de tampons autour de biotopes essentiels d'espèces très sensibles (ex. lieux de nidification de grands oiseaux ou similaires).

Les surfaces cultivables qui répondent aux critères ci-dessus sont en général à éviter comme site potentiel pour des parcs solaires du point de vue de la protection des espèces et du biotope, en raison de leur sensibilité.

Du point de vue de la protection du sol, il est recommandé de planifier les surfaces cultivables au niveau régional en fonction de leur potentialités agronomiques, et de réserver les surfaces les plus fertiles une utilisation agricole. Il convient également de réserver à un usage agricole les zones dédiées à des usages agricoles spécifiques (zone AOC par exemple).

### **3.3 Cadrage préalable de l'étude d'impact**

#### **Identification des enjeux du projet**

Le cadrage préalable<sup>6</sup> constitue une étape préliminaire à l'engagement des études et des analyses spécifiques. A ce stade, les caractéristiques d'un premier projet technique d'installation photovoltaïque seront examinées au regard des enjeux environnementaux du territoire étudié, et permettront d'identifier les effets prévisibles. Selon les choix techniques et d'utilisation de la surface, les impacts d'un projet d'installation photovoltaïque au sol peuvent en effet être très variables.

#### **Délimitation de l'aire d'étude**

Lors de la délimitation de l'aire d'étude, tous les éléments du patrimoine naturel et culturel à préserver, ainsi que les usages de l'espace concerné devront être pris en compte. L'aire d'étude se compose du site du projet (c'est à dire toutes les surfaces directement utilisées par l'installation) et de la zone où des impacts sont prévisibles (c'est à dire toutes les surfaces susceptibles d'être affectées indirectement par les impacts du projet liés à la construction, l'exploitation ou l'installation).

---

<sup>6</sup> Dans le cas français, le cadrage préalable est l'occasion de réaliser, en concertation avec l'administration, un cahier des charges précis des études environnementales nécessaires à la réalisation de l'étude d'impact, d'identifier le programme général de travaux dont l'installation des modules et des locaux techniques n'est qu'un élément (voiries, raccordement au réseau), et d'identifier les installations existante et les projets connus, avec lesquels le nouveau projet est susceptible d'avoir un effet cumulé. La définition de l'aire d'étude est un préalable à l'identification des enjeux environnementaux et des principaux effets attendus du projet. Le présent guide allemand considère le cadrage préalable comme une étape de pré-analyse des impacts et est réalisé sur la base d'un premier projet technique d'installation photovoltaïque et d'une discussion (des autorités) avec le porteur de projet.

L'identification et l'évaluation des fonctions pédologiques peuvent en général continuer à se limiter au site du projet (y compris les installations annexes et aménagements de viabilisation), car il ne faut pas s'attendre à des impacts négatifs supplémentaires. Il en va de même pour l'identification des enjeux liés à la ressource en eau (profondeur de la nappe phréatique, sensibilité à la contamination). Il convient cependant d'examiner l'écoulement des eaux de surface dans un périmètre plus large, afin de comprendre le fonctionnement hydrologique de la zone.

Pour examiner les aspects liés à la flore et à la faune (cartographie des types d'habitats, mise en évidence de la présence de représentants d'espèces animales ou de stations d'espèces végétales rares/menacées/protégées), une zone d'étude dépassant le cadre du site du projet est nécessaire. Une détermination exacte de l'ampleur de la zone à considérer ne peut avoir lieu qu'au cas par cas, selon l'écosystème et le projet. Le tableau 6 présente des exemples de questionnement sur la faune et la flore.

L'examen des impacts potentiels sur le paysage doit considérer l'espace dans lequel le projet est perceptible. Il distinguera les éventuelles surfaces sans visibilité à partir desquelles il est impossible de voir, d'identifier et/ou de distinguer le projet, par exemple d'après la topographie, la structure boisée et en raison des caractéristiques propres du projet.

**Tableau 6 : Exemples de questionnement sur la faune et la flore<sup>7</sup>**

Patrimoine à protéger	Questionnement
Oiseaux nicheurs	De nombreux oiseaux nicheurs (p. ex. busards cendrés, cailles, oiseaux des prés) utilisent-ils régulièrement la zone ou son environnement immédiat ? Y a-t-il suffisamment de surfaces libres utilisables appropriées pour la nidification dans le voisinage ?
Oiseaux de passage	La zone est-elle utilisée par des oiseaux migrateurs ? Utilisent-ils régulièrement la zone lors des périodes migratoires ? Y a-t-il suffisamment de surfaces de repli appropriées dans le voisinage ?
Mammifères	Les biotopes (potentiels) des hamsters d'Europe ou d'autres mammifères rares sont-ils affectés ?
	Les passages habituels de gibier ou corridors pour des espèces ayant besoin d'espace important (ex. le lynx) sont-ils coupés ?
Invertébrés	Y a-t-il dans le voisinage une population d'insectes aquatiques à protéger en particulier ?
	Des biotopes à protéger favorables aux espèces animales aimant la chaleur (ex. pelouses sèches) sont-ils concernés ?
Flore	Les associations végétales d'habitats secs et chauds (ex. pelouses sèches) ou des espèces prairiales menacées sont-elles affectées par le projet ?
	Y a-t-il suffisamment de surfaces appropriées en dehors de la zone ombragée par des modules ?

<sup>7</sup> Ce questionnement sur la faune et la flore est également approprié dans le cadre de la démarche de choix du site.

## Guide sur la prise en compte de l'environnement dans les installations photovoltaïques au sol - l'exemple allemand -

---

Patrimoine à protéger	Questionnement
Biotopes spéciaux/ petites structures	Y a-t-il des biotopes spéciaux rares à dire d'expert (p. ex. défilés, étangs) ou d'autres petites structures (p. ex. talus) ?

## **4 Développement de mesures de suppression, de réduction et de compensation des impacts négatifs identifiés**

### **4.1 Développement de mesures de suppression et de réduction impacts négatifs identifiés**

Des impacts négatifs peuvent être en principe évités/réduits par :

- le choix d'un site approprié au regard de la protection de la nature, à savoir une surface à potentiel de conflit présumé minime (voir tableau 5) ;
- la modification du projet par une réduction de la surface d'emprise ou un recul du lieu d'implantation (p. ex. par rapport à des habitats naturels), ainsi que des modifications techniques du projet lui-même ;
- des réalisations techniques ou des mesures de gestion des travaux sur le site concerné (p. ex. construction de passages pour petits animaux afin de réduire les effets de fragmentation des habitats, organisation du chantier en fonction des conditions climatiques, du dérangement de la faune et des périodes sensibles de végétation).

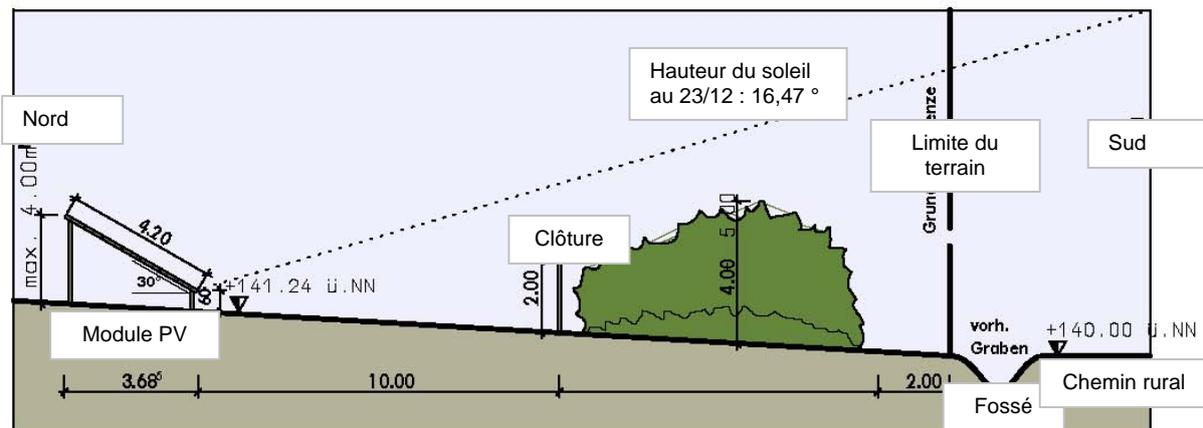
Il conviendra en complément de décider au cas par cas de mesures supplémentaires de suppression ou de réduction des impacts notables.

Le tableau suivant présente des exemples de mesures possibles et propose des indications quant à leur mise en oeuvre lors de la construction d'une installation photovoltaïque au sol.

**Tableau 7 : Indications sur des mesures de suppression/ de réduction possibles**

Patrimoine à protéger	Mesures de suppression/ de réduction
Flore / Faune / Diversité biologique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Choix d'une installation qui préserve l'intégrité des surfaces dans la mesure du possible.</li> <li>• Respect de distances d'éloignement par rapport à des biotopes naturels et des éléments sensibles, comme les zones humides, les petits cours d'eau, etc.</li> <li>• Préservation des habitats prioritaires (ex. pelouses sèches).</li> <li>• Limitation des effets de l'activité due au chantier :               <ul style="list-style-type: none"> <li>- protection des biotopes ou stations végétales vis à vis du passage de véhicules,</li> <li>- réalisation des travaux les plus impactants sur le milieu naturel en (ex. défrichages) en dehors des périodes sensibles (période de végétation, de nidification ou de migration),</li> <li>- limitation de l'apport de remblai extérieur (ex. pour des routes de chantiers, couvertures du sol) ; si toutefois cet apport s'avère nécessaire, utiliser des substrats non pollués, pauvres en substances nutritives, et appropriés aux conditions pédologiques du site.</li> </ul> </li> <li>• Respect d'une distance des modules au sol supérieure 0,80 m pour garantir une couverture végétale homogène.</li> <li>• Absence d'éclairage à grande échelle de l'installation pour protéger les animaux d'un effet d'attraction par les sources lumineuses ; si l'éclairage est nécessaire, utilisation de projecteurs adaptés.</li> <li>• Dans la mesure du possible, absence de clôture de l'installation, ou création de passages pour mammifères de taille moyenne (blaireaux, lièvres...) par une clôture située à une distance appropriée du sol ou avec des mailles suffisantes, ou encore permettant des passages, en veillant à utiliser des matériaux non dangereux (ex. éviter les barbelés) ; dans des zones photovoltaïques très étendues, aménagement le cas échéant de corridors de passage.</li> </ul>
Sol	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitation dans la mesure du possible de l'imperméabilisation du sol ; minimisation des surfaces de fondation, par exemple par l'utilisation de pieux scellés dans le sol.</li> <li>• Planification de chemins d'accès et d'aménagement les plus courts (pour les activités de réparation et de maintenance).</li> <li>• Limitation des effets de l'activité du chantier :               <ul style="list-style-type: none"> <li>- limitation du terrain d'emprise du chantier,</li> <li>- installation de voies de chantier préservant les surfaces,</li> <li>- utilisation de véhicules de chantier à faible pression sur le sol,</li> <li>- éviter les travaux de construction en cas d'humidité persistante,</li> <li>- éviter les terrassement, ainsi que des nivellements de surface importants,</li> <li>- élimination scrupuleuse des résidus de chantier (matériaux de construction, consommables, etc.).</li> </ul> </li> </ul>

Patrimoine à protéger	Mesures de suppression/ de réduction
Eau	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protection des eaux de surface.</li> <li>• Éviter le remblai et l'assèchement des zones humides.</li> <li>• Éviter dans la mesure du possible l'imperméabilisation du sol; minimisation des surfaces de fondation, utilisation de pieux scellés dans le sol.</li> <li>• Le cas échéant installation de systèmes favorisant l'infiltration de l'eau de pluie.</li> </ul>
Climat/air	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintien de couloirs d'échange d'air.</li> </ul>
Paysage / cadre naturel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Établissement du raccordement avec des câbles enterrés ; éviter les nouvelles lignes aériennes.</li> <li>• Éviter des couleurs voyantes (la couleur de l'installation doit se fondre dans le cadre naturel), réduire les possibilités de réflexions.</li> <li>• Utilisation de clôtures discrètes ou dissimulation par des plantations.</li> <li>• Intégration compatible avec le paysage par l'installation d'éléments architecturaux ou paysagers typiques du cadre naturel.</li> <li>• La dissimulation du projet par la plantation de végétaux de grande taille.</li> </ul>



**Figure 5 : Exemple de réduction des impacts paysagers par effet de masque végétal d'une installation photovoltaïque au sol (Commune d'Estenfeld, 2004)**

## 4.2 Développement de mesures de compensation

Les mesures de compensation ou mesures compensatoires visent à permettre de conserver globalement la valeur initiale des milieux.

Du point de vue spécifique de la protection de la nature, et pour assurer la meilleure compensation possible, il convient de sélectionner des mesures de compensation ayant un lien fonctionnel étroit avec les fonctions endommagées, et qui garantissent un rétablissement de même nature des fonctions altérées. Il convient en même temps de viser une proximité spatiale entre la zone d'intervention et le lieu faisant l'objet des mesures de compensation.

**Tableau 8 : Exemples de mesures de compensation des impacts négatifs**

Patrimoine à protéger	Impacts potentiels	Mesures de compensation possibles
Flore / Faune / Diversité biologique	Destruction de la végétation, des espèces Impacts négatifs sur la végétation par des effets de recouvrement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réaménagement de biotopes</li> <li>• Amélioration des biotopes proches existants</li> </ul>
	Impacts négatifs sur des surfaces contiguës à fonction d'habitat particulière (p. ex. par l'effet de silhouette des modules)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aménagement d'habitats propices</li> <li>• Réduction d'impacts négatifs existants localisés à d'autres endroits (p. ex. par la revalorisation des biotopes d'oiseaux des prés)</li> </ul>
	Découpage/interruption de biotopes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aménagement d'interconnexions entre les biotopes</li> <li>• Suppression ou réduction de projets existants ayant des effets de découpage cumulatifs</li> </ul>
Sol	Perte de surface libre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Désartificialisation de zones adjacentes</li> <li>• Mise en place d'une couverture végétale durable du sol permettant une protection contre l'érosion</li> </ul>
	Modification de la structure/composition du sol	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Désartificialisation de zones adjacentes</li> <li>• Ameublissement</li> </ul>
Paysage / cadre naturel	Modification des espaces du cadre naturel par une empreinte technique Perte de végétation et d'autres éléments du paysage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suppression d'impacts négatifs existants indépendants du projet dans le contexte de visibilité du projet</li> </ul>

## **5 Indications en vue de la conception d'installations photovoltaïques au sol et la mise en place effective des mesures**

### **5.1 Indications pour la conception d'une installation photovoltaïque au sol**

La conception d'une installation photovoltaïque au sol peut suivre les principes suivants.

Il conviendra tout d'abord de limiter le taux d'imperméabilisation global d'une installation à un niveau strictement nécessaire (une valeur indicative de 5% peut être retenue pour le taux d'imperméabilisation global) .

Afin de garantir la formation d'une couverture végétale homogène, il conviendra de concevoir un montage des installations fixes permettant d'obtenir une lumière diffuse suffisante à la surface du sol (la distance minimale nécessaire entre le bord inférieur d'un module et la surface du sol est d'environ 0,80 m).

Des modes d'exploitation extensifs seront recherchés pour la gestion de la végétation : soit une coupe une à deux fois par an, soit la mise en place d'un pâturage ovin extensif, en renonçant à chaque fois à tout engrais et produit phytosanitaire. Dans le cas de l'installation sur des pelouses sèches existantes, il convient d'élaborer des modes d'entretien ou de mise en place d'un pâturage qui garantissent une exploitation respectueuse de la nature. Des aspects tels que la protection d'espèces d'oiseaux nichant au sol ou l'intérêt du milieu pour certaines familles de plantes devront alors être pris en compte.

L'eau de pluie qui s'écoule de la surface des modules doit pouvoir s'infiltrer sans problème dans le sous-sol. Selon le site, un acheminement de l'eau de pluie vers un système d'infiltration proche du site (de gravier, cuvette, etc.) est envisageable.

Si des clôtures sont nécessaires, elles doivent être conçues de façon à ne pas constituer une barrière pour les mammifères de petite et moyenne taille. Elles doivent leur permettre de traverser l'installation et de ne pas gêner les relations fonctionnelles naturelles entre le terrain clôturé et l'espace ouvert. Il faut donc éviter les murs à socle, à moins d'aménager des passages à intervalles réguliers.

Il convient également de renoncer dans la mesure du possible à l'éclairage des installations photovoltaïques au sol. Si un éclairage est inévitable, il faudra garantir une protection contre les impacts des émissions lumineuses par des mesures de réduction faciles à appliquer (utilisation de lampes à vapeur de sodium à basse pression entre autres).

## 5.2 Indication pour la mise en place de mesures

### 5.2.1 Plantations

La réalisation d'installations photovoltaïques au sol peut s'accompagner généralement de mesures de réduction d'impact (voir tableau 7), qui consistent en la plantation de haies et de bosquets.

Lors de la sélection des espèces constituant les haies ou les bosquets, on préférera selon les cas un assortiment d'espèces de haies typiques de bocage, de lisières de forêts ou des espèces de forêt. Dans le cas de mesures applicables en particulier à un paysage ouvert, des plantes locales (autochtones) seront exclusivement utilisées. Afin de réaliser l'objectif visé (entre autres la dissimulation de l'installation photovoltaïque), les plantations doivent comprendre des arbustes à feuilles caduques repiqués au moins une fois (de préférence deux fois) de 100 à 150 cm de haut ou des buissons repiqués de 100 à 150 cm de haut. L'utilisation de jeunes plants doit se limiter à de grandes surfaces (bosquets dans des prés de plus de 1 000 m<sup>2</sup> de superficie). Dans les structures de haies, un taux de perte plus important, comme cela se produit souvent avec de jeunes plantes, n'est pas acceptable. Il faut en outre prévoir un entretien plus fréquent, à plus long terme et coûteux lors de l'utilisation de jeunes plantes pour assurer leur croissance.

Des mesures devront être prises contre l'abrutissement par des animaux sauvages de nouvelles plantations dans les espaces ouverts. Seul un grillage suffisamment haut offre une protection vraiment sûre contre le gibier. L'installation de perchoirs pour rapaces peut d'une part contribuer à enrayer la prolifération de souris sur les surfaces plantées, mais également éviter les bris et dommages sur des arbres qui ont été plantés.

Divers travaux d'entretien des plantations sont nécessaires pour garantir leur fonction de réduction d'impact. Selon la valeur nutritive du sol, il faudra supprimer la végétation concurrente et éliminer les mauvaises herbes dans les plantations, 2 fois par an, et ce jusqu'au moment où les bosquets présentent une croissance annuelle suffisante. Les travaux suivants devront en outre être effectués régulièrement : arrosage pendant les périodes de sécheresse, renouvellement des plantations dans des zones où des pertes sont constatées suite à des dégâts occasionnés par du gibier, la sécheresse ou pour d'autres raisons compromettent la réalisation de l'objectif de réduction d'impact, ainsi que le contrôle et, plus tard, le retrait des systèmes de protection contre le gibier. Les tailles doivent se limiter aux opérations nécessaires au respect de la sécurité routière et la prévention des accidents.

### 5.2.2 Gestion des espaces enherbés

La conversion en prairies des terres agricoles utilisées par les centrales peut s'effectuer de manière naturelle ou artificielle. Elles peuvent alors être destinées à la fauche ou au pâturage.

#### a) Prairie naturelle

L'enherbement consiste à laisser s'implanter une végétation naturelle qu'il conviendra ensuite de faucher ou de mettre en pâturage selon les usages prévus. Cette méthode permet aux espèces de s'établir durablement après quelques années. Au cours des premières années, des plantes rudérales surtout annuelles prédomineront, suivies plus tard par les espèces pluriannuelles. Un pâturage des ovins est possible, sous réserve de procéder préalablement à des coupes (1 à 2 fauches/an) jusqu'à ce qu'une végétation adaptée au pâturage se soit établie.

Pour améliorer la composition floristique en graminées ou légumineuses fourragères, de la poussière de plantes fourragères peut être épanchée sur le site, récupérée lorsque le fourrage est mis à sécher en grange. Une fauche de prairie de composition floristique proche de celle du site peut être également répartie sur la surface. Dans ce dernier cas, il convient de transporter le foin immédiatement sur la surface à ensemercer et de répartir le volume de la coupe sur une surface trois à huit fois plus grande que la surface de coupe. Sur des surfaces relativement étendues, on pourra se limiter à des bandes d'ensemencement.

Afin de mettre en place les prairies souhaitées, des travaux préliminaires pourront être nécessaires pour éviter l'assèchement et le cas échéant pour éliminer les espèces envahissantes.

### **b) Prairie artificielle**

Un semis de légumineuses ou d'autres plantes permet de convertir une surface rapidement en prairie exploitable. En vue de réaliser un pâturage ou d'obtenir du foin, il faut choisir les mélanges d'espèces dont elle sera composée, et ce en fonction de la nature du sol et du climat. Du point de vue de la protection de la nature, on cherchera à privilégier le semis d'espèces proches de la composition des prairies naturelles locales.

### **c) Entretien et exploitation**

L'entretien des surfaces peut avoir lieu par la mise en place d'un pâturage ou la fenaison ou par une combinaison des deux usages agricoles. Le tableau 9 présente les différents impacts de ces deux méthodes (pâturage/fauche) sur l'évolution des espaces.

Dans le cas d'une exploitation extensive, il convient de fixer les règles suivantes pour les surfaces de montage des modules :

- pas d'apport de lisier, purin et autres engrais ;
- pas d'utilisation de produits phytosanitaires ;
- utilisation en tant que pâturage, de préférence avec surveillance (la pression de pâturage dépendra des conditions de croissance végétale, variables selon la nature du sol et l'exposition) ;
- ou 1 à 2 fenaisons/an au maximum avec ramassage du foin, mais pas sur toutes les surfaces en même temps.

Dans des cas isolés, il peut en outre être utile de limiter l'exploitation dans le temps (p. ex. détermination des périodes de pâturage ou de fenaison).

L'objectif devrait être un entretien différencié si possible sur de petites surfaces. Il faut éviter une fenaison intensive sur toutes les surfaces en même temps et déterminer les dates de fenaison en fonction du développement d'espèces à privilégier. Par endroits, la fenaison devra être plus tardive, selon les périodes de floraison des espèces. Du point de vue ornithologique, une adaptation de l'utilisation s'imposera avec l'arrivée d'oiseaux nicheurs afin de ne pas compromettre la couvée des espèces nichant au sol (p. ex. en déterminant précisément les périodes de fauche ou la pression et les périodes de pâturage pour éviter le dérangement).

L'introduction d'ovins pour l'entretien et l'exploitation des surfaces photovoltaïques donne lieu à deux types d'élevage : les petits troupeaux maintenus en permanence sur le site et les troupeaux plus importants de passage en période de transhumance.

Le premier cas nécessite une bergerie pour l'hiver et une superficie appropriée relativement grande. Le pâturage est en général moins intensif dans ce cas qu'avec le deuxième type d'élevage. Le pâturage permet en outre de maintenir, grâce aux déjections, un apport de substances nutritives.

Si l'objectif d'entretien consiste uniquement à maintenir les surfaces ouvertes, il est possible d'utiliser un troupeau plus petit (pâturages mobiles, avec clôture électrifiée, entre autres). Une telle forme d'exploitation ne convient toutefois pas pour un entretien durable de pelouses sèches, maigres ou de landes, comme il peut y en avoir sur les surfaces de conversion.

**Tableau 9 : Comparaison entre pâturage et la fauche pour le maintien de surfaces ouvertes**

	<b>Pâturage</b>	<b>Fauche</b>
<b>Structure végétale</b>	Formation de différences structurelles par le pâturage sélectif et le piétinement du bétail	Structure végétale homogène sur la surface totale
<b>Microrelief du sol</b>	Préservation et reconstitution, (activité microfaune et taupes)	Nivellement (lors du passage des engins)
<b>Compactage du sol</b>	Tassement des lieux de passage (chemins tracés par les moutons)	Peu de différences sur de petites surfaces
<b>Répartition des substances nutritives</b>	Répartition différente des substances nutritives par des excréments d'animaux	Pas de différences spatiales
<b>Retrait de substances nutritives</b>	Possible lorsqu'il y a de petits troupeaux, avec une densité de population réduite et sans enclos de nuit, mais phénomène très lentement.	Assèchement nutritif lent possible selon le site faute d'engrais et si fenaison régulière (export de matière sèche).
<b>Faune</b>	Dégâts mécaniques par des piétinements de la flore locale	Perte totale de biotopes de nourriture et de larves pour certains groupes d'animaux en cas de fenaison totale
<b>Flore</b>	Consommation sélective d'espèces, dégâts dus aux	Rapport de concurrence équilibré lors d'une fenaison régulière après la

**Guide sur la prise en compte de l'environnement dans les installations photovoltaïques au sol  
- l'exemple allemand -**

---

	<b>Pâturage</b>	<b>Fauche</b>
	piétinements, diminution de la richesse floristique et amélioration de la qualité fourragère	floraison de la prairie

## **6 Recyclage / Remise en état**

### **6.1 Recyclage des modules**

Les modules solaires ont une durée de vie de 20 à 40 ans. Dès le stade de la production, il faut s'attendre à la production de déchets dus à des dégâts au montage et à la mise en service d'une installation (grêle, etc.). Les modules solaires ne doivent plus être éliminés comme des gravats. Il faut réduire le taux élevé de matière plastique par « pré-traitement technique ».

À l'heure actuelle, les installations solaires ne sont pas concernées par la directive européenne sur les déchets électroniques. Une intégration de ces installations dans la directive aurait pour conséquence d'obliger les fabricants à organiser la reprise et le recyclage. Il est à noter qu'il existe actuellement des systèmes de reprise volontaire.

Dans une installation pilote à Freiberg/Saxe, des possibilités de recyclage des cellules en silicium cristallin sont mises à l'essai depuis 2004. Les matières plastiques contenues dans le module y sont brûlées à des températures atteignant 600 °C. Les résidus, à savoir du verre, du métal et des matériaux de remplissage, sont collectés sans subir de tri complémentaire et peuvent alors être recyclés. Ils passent par plusieurs stades de nettoyage et peuvent être transformés à nouveau en cellules solaires. Le fabricant a également développé une procédure de recyclage pour la technologie des couches minces en métaux lourds, basé sur la séparation des différentes couches et la consolidation avant traitement par une société spécialisée.

### **6.2 Remise en état des sites**

Lors de la réhabilitation du site, et ce sur la plupart des types de sols, il faut s'attendre à devoir ouvrir des tranchées afin de retirer les câbles de la terre. L'abandon des câbles dans la terre n'est pas souhaitable à l'avenir en raison du taux élevé de cuivre.

Les principaux travaux à réaliser<sup>8</sup> consistent en l'ouverture de tranchées, le démontage et le retrait des câbles et des gaines, le remblaiement des tranchées et la remise en état de la surface. Il est également envisageable de ne retirer que les câbles et de laisser les gaines en place, ce qui limite les travaux de terrassement. Cette opération nécessite du matériel adapté.

---

<sup>8</sup> Ces travaux sur le site incluent également le retrait le cas échéant des fondations en béton, des bâtiments techniques et la remise en état des routes d'accès.