Les oiseaux et les réseaux électriques en Afrique du Nord

Guide pratique pour l'identification et la prévention des lignes électriques dangereuses

Justo Martín Martín, Violeta Barrios, Helena Clavero Sousa et José Rafael Garrido López

UNION INTERNATIONALE POUR LA CONSERVATION DE LA NATURE

Les oiseaux et les réseaux électriques en Afrique du Nord

Guide pratique pour l'identification et la prévention des lignes électriques dangereuses

Justo Martín Martín, Violeta Barrios, Helena Clavero Sousa et José Rafael Garrido López

La terminologie géographique employée dans cet ouvrage, de même que sa présentation, ne sont en aucune manière l'expression d'une opinion quelconque de la part de l'UICN ou des autres organisations concernées sur le statut juridique ou l'autorité de quelque pays, territoire ou région que ce soit, ou sur la délimitation de ses frontières.

Les opinions exprimées dans cette publication ne reflètent pas nécessairement celles de l'UICN ou des autres organisations concernées.

Publié par : UICN Gland, Suisse et Malaga, Espagne

Droits d'auteur : © 2019 UICN, Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources

La reproduction de cette publication à des fins non commerciales, notamment éducatives, est permise sans autorisation écrite préalable du ou des détenteurs des droits d'auteur à condition que la source soit dûment citée.

La reproduction de cette publication à des fins commerciales, notamment en vue de la vente, est interdite sans autorisation écrite préalable du ou des détenteurs des droits d'auteur.

Citation : Martín Martín, J., Barrios, V., Clavero Sousa, H. et Garrido López, J.R. (2019). *Les oiseaux et les réseaux électriques en Afrique du Nord. Guide pratique pour l'identification et la prévention des lignes électriques dangereuses*. Gland, Suisse et Malaga, Espagne : UICN. xvi + 272 pp.

ISBN : 978-2-8317-1987-0 (PDF)
978-2-8317-1988-7 (print)

DOI : <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2019.09.fr>

Image de couverture : Groupe de vautours fauves (*Gyps fulvus*) se reposant sur un pylône électrique après un orage au nord du Maroc. © Rachid El Khamlichi.

Traduction : Francis Merino (Intérpretes y Traductores del Sur S.L.), Espagne.

Relecture et correction du français : Alexa Dubreuil-Storer (IDFP Translation Services), Royaume-Uni.

Mise en page : miniestudio.es

Imprimé par : Solprint S.L., Espagne

Disponible auprès du : Centre de Coopération pour la Méditerranée de l'UICN
Calle Marie Curie 22
29590 Campanillas
Malaga, Espagne
Tél. : +34 952 028430 | Fax : +34 952 028145
www.iucn.org/mediterranean
www.iucn.org/resources/publications

Cette publication a été financée par la Fondation MAVa, dans le cadre du projet « Safe Flyways: reducing energy infrastructure -related bird mortality in the Mediterranean » 2017-2020.

Table des matières

Avant-propos	viii
Résumé	x
Remerciements	xiv
Acronymes	xv
1. INTRODUCTION	1
1.1. Contexte	2
1.2. Public cible et objectifs	10
2. ÉNERGIE ET LIGNES ÉLECTRIQUES	12
2.1. Production et transport d'énergie	13
2.2. Éléments d'une ligne électrique	19
2.3. Types de pylônes ou supports	31
3. LES LIGNES ÉLECTRIQUES ET LES OISEAUX	34
3.1. Effets des lignes électriques sur les écosystèmes	35
3.2. Effets positifs des lignes électriques sur les oiseaux	38
3.3. Effets négatifs des lignes électriques sur les oiseaux	41
3.4. Effets négatifs des oiseaux sur les lignes électriques	46
3.5. Mortalité due aux lignes électriques : un problème mondial	48
3.6. Le problème en Afrique du Nord	53

4. COLLISIONS	56
4.1. Causes du risque de collision	57
4.2. Facteurs déterminant le risque de collision	58
4.3. Lignes électriques à haut risque de collision	65
4.4. Mesures anti-collision (prévention, atténuation, correction)	67
4.5. Efficacité des mesures anti-collision	72
5. ÉLECTROCUTIONS	76
5.1. Causes du risque d'électrocution	77
5.2. Facteurs déterminant le risque d'électrocution et identification des pylônes dangereux	83
5.3. Lignes électriques à haut risque d'électrocution	94
5.4. Mesures anti-électrocution (prévention, atténuation, correction)	97
5.5. Efficacité des mesures anti-électrocution	106
6. DIAGNOSTIC ET ÉVALUATION DE LA MORTALITÉ DES OISEAUX DUE AUX LIGNES ÉLECTRIQUES	116
6.1. Signes de collision sur le corps des oiseaux touchés	117
6.2. Signes d'électrocution sur le corps des oiseaux touchés	118
6.3. Diagnostic de la cause de la mort	122
6.4. Évaluation de la mortalité produite par les lignes électriques	126

7. ESPÈCES VULNÉRABLES	130
7.1. Sensibilité aux collisions	132
7.2. Sensibilité aux électrocutions	138
7.3. Groupes d’oiseaux sensibles aux lignes électriques	143
7.4. Espèces sensibles présentes en Afrique du Nord	147
8. COLLECTE ET ANALYSE DES INFORMATIONS SUR LES LIGNES ÉLECTRIQUES DANGEREUSES	154
8.1. Collecte d’informations sur le terrain : procès-verbaux et formulaires de saisie de données	155
8.2. Création de bases de données	162
8.3. Traitement des informations : identification des zones prioritaires	165
8.3.1. Espèces et zones prioritaires	165
8.3.2. Cartes de sensibilité et de risques	168
8.3.3. Lignes et pylônes prioritaires	169
8.3.4. Zones principales et secondaires pour les nouvelles lignes	171
9. BASES POUR UN PLAN D’ACTION	174
9.1. Mise en place d’un cadre juridique spécifique et approprié	176
9.2. Inclusion de l’impact des lignes électriques sur les oiseaux dans la planification environnementale générale	177
9.3. Identification des sites et des espèces prioritaires	178

9.4. Développement de plans de sensibilisation et de formation	179
9.5. Mise en place de plans de contrôle et de suivi	181
9.6. Création d'un comité national pour les oiseaux et les lignes électriques	183
10. BIBLIOGRAPHIE	184
ANNEXES	204
Table des matières des annexes	205
Annexe I. Guide des pylônes et mesures correctives	208
Annexe II. Lignes électriques de nouvelle création: configurations sûres, mesures préventives et recommandations pour l'installation des mesures	260
Annexe III. Législation régionale de référence	270

Avant- propos

COMME TOUT PROJET D'AMÉNAGEMENT, la mise en place de réseaux électriques est susceptible d'avoir des impacts sur l'environnement, et en particulier sur la biodiversité. Afin de maîtriser au mieux ces impacts, les projets de développement de réseaux électriques doivent être conduits selon les principes respectueux de l'environnement et l'accent doit donc être mis prioritairement sur l'évitement et la réduction des impacts négatifs. Ceci implique l'intégration des enjeux de biodiversité dans les différentes étapes de leur mise en place pour concilier la production et distribution d'électricité et la conservation de la nature. L'engagement du secteur énergétique devient ainsi un atout indispensable.

Conscient de ce problème et de la nécessité de le traiter d'un point de vue régional, le Centre de Coopération pour la Méditerranée de l'UICN (UICN-Med) a travaillé ces dernières années sur une série d'activités visant à promouvoir la coopération entre les différents acteurs impliqués dans la conservation des rapaces en Méditerranée, en mettant spécialement l'accent sur les effets des lignes électriques sur ces oiseaux.

Au cours du siècle dernier, en particulier et encore plus de nos jours, de nombreux rapaces de la Méditerranée ont connu de grandes régressions, aussi bien en nombre d'individus qu'en termes d'aires de répartition, de manière semblable à ce qui se passe dans le reste du monde. La protection de ce groupe d'oiseaux dans la seconde moitié du XX^e siècle sur le plan international et dans la plupart des pays de la Méditerranée a permis la conservation et le rétablissement de certaines populations, principalement sur la rive nord du bassin méditerranéen. En Afrique du Nord, malgré cette protection légale, de nombreuses populations de rapaces ont disparu ou ont atteint des niveaux critiques, tels le vautour fauve (*Gyps fulvus*) et le gypaète barbu (*Gypaetus barbatus*), respectivement, bien que certaines espèces conservent encore des populations viables, telles que l'aigle de Bonelli (*Aquila fasciata*).

Depuis le début de nos actions, la nécessité de promouvoir l'échange d'informations et d'expériences entre les spécialistes de l'Espagne, en tant que représentants européens, et de l'Afrique du Nord a été une demande des acteurs impliqués. Notamment dans les aspects concernant plus particulièrement la configuration de lignes électriques et la conservation de la biodiversité, la promotion de bonnes pratiques, l'établissement d'obligations techniques et l'adoption de configurations sécurisées pour les oiseaux.

Ce manuel s'inscrit dans cet objectif de collaboration et vise à contribuer à la réduction des menaces pesant sur les rapaces en Méditerranée et plus particulièrement en Afrique du Nord, en se concentrant sur un volet spécifique ayant un impact important sur ce groupe d'espèces, la distribution et le transport de l'énergie électrique. Il s'agit d'aborder la quête de solutions à la menace que peuvent représenter pour la biodiversité un secteur stratégique du progrès et du bien-être humain, celui de l'énergie, afin de parvenir à un équilibre harmonieux entre son développement et le maintien des communautés biologiques.

L'engagement de l'UICN au côté du secteur des infrastructures et plus particulièrement celui de l'énergie est une de ces missions première. Cet engagement peut s'exprimer au travers de divers projets ou des Résolutions et des Recommandations, qui résultent des motions adoptées lors des Assemblées générales par les membres, à l'occasion du Congrès mondial de la nature de l'UICN qui se tient tous les quatre ans.

Le secteur énergétique est un maillon essentiel de la planification territoriale à différentes échelles et, par conséquent, dans la conservation de la biodiversité. Ce manuel a pour vocation d'aider les sociétés du secteur électrique à mieux cerner les enjeux de conservation liés à leurs opérations, à identifier les meilleures pratiques de gestion et à améliorer l'efficacité de ces pratiques pour pérenniser la biodiversité existante autour de leurs sites d'exploitations.

De plus, cette approche intégrée de la conservation repose sur un partenariat solide soutenu par la Fondation MAVA et visant à minimiser les causes de mortalité des oiseaux migrateurs et des vautours liées à des activités humaines dans le bassin méditerranéen.

L'objectif final de l'UICN-Med va plus loin en soutenant une stratégie basée sur le fait que l'aspiration légitime au développement des sociétés civiles sur les deux rives de la Méditerranée soit atteignable en sauvegardant une biodiversité unique sur la planète. Il ouvre ainsi la voie à une série de publications futures sur les solutions aux différents problèmes posés par le développement du secteur de l'énergie pour la conservation de la biodiversité.

Antonio Troya.

DIRECTEUR, Centre de Coopération pour la Méditerranée de l'UICN

Résumé

Les lignes électriques causent chaque année la mort de millions d'oiseaux dans le monde. Il s'agit d'un problème mondial qui, loin de s'atténuer, s'aggrave à mesure que la production et la consommation d'énergie électrique se développent dans le monde entier et atteignent des zones reculées, jusque-là dépourvues de ces infrastructures.

Tel est par exemple le cas dans certaines régions d'Afrique du Nord. Le développement relativement récent de l'électrification dans une partie du continent signifie que ce problème de conservation pour l'avifaune n'a pas encore reçu l'attention qu'il mérite. Cependant, des données inquiétantes sur son incidence ont été recueillies ces dernières années.

Dans cet espace géographique vivent des oiseaux dont les populations sont dans une situation très délicate. Dans d'autres parties du monde, les lignes électriques sont le principal facteur de mortalité non naturelle d'espèces identiques ou très proches, de sorte que l'impact qu'elles peuvent avoir en Afrique du Nord est sans doute d'un intérêt majeur.

Ce document est un recueil sur cette problématique, ses causes et ses conséquences, et sur les diverses approches pour traiter le problème, en se concentrant sur cette zone géographique, dans le but d'en promouvoir la connaissance et la prévention et, dans la mesure du possible, de rechercher des solutions.

Messages-clés

- ➔ En effet, l'amélioration des connaissances quant aux impacts des lignes électriques sur l'avifaune et l'identification des points noirs de mortalité, à travers la collaboration de divers acteurs, permettent la mise en œuvre de travaux de neutralisation efficaces sur le terrain. L'enjeu est désormais d'éviter l'installation de nouvelles lignes dans les secteurs sensibles tels que les axes de migration ou des zones de présence d'espèces menacées.
- ➔ La distribution de l'électricité doit se faire de manière durable. La planification de futures lignes électriques doit impliquer des experts scientifiques et écologues des groupes taxonomiques potentiellement concernés.
- ➔ Les lignes électriques identifiées comme les plus dangereuses doivent être neutralisées afin de réduire leurs impacts sur la biodiversité.
- ➔ Une meilleure gestion des lignes de distribution d'énergie est nécessaire pour assurer la durabilité et réduire les impacts sur la biodiversité.

© Daniel Burón.

Le manuel est structuré comme suit. Dans la première partie, les contenus suivants sont développés :

- Concepts et terminologie de base relatifs aux lignes électriques, informations techniques essentielles pour bien comprendre les causes du problème et ses éventuelles solutions.
- Impacts des lignes électriques sur les oiseaux, les causes des électrocutions et des collisions, les contraintes et l'identification des risques, y compris les mesures préventives et correctives les plus efficaces.
- Diagnostic et évaluation de la mortalité chez les oiseaux, provoquée par les lignes électriques, en identifiant les signes permettant un diagnostic adéquat des causes et une évaluation réelle de la mortalité existante.
- Caractérisation des groupes d'espèces les plus vulnérables aux impacts des lignes électriques, en identifiant les caractéristiques qui les rendent sensibles et quelles sont les espèces susceptibles d'être les plus affectées a priori en Afrique du Nord.
- Protocoles et procédures plus appropriés pour la collecte et l'analyse d'informations sur les lignes électriques dangereuses, y compris la création de bases de données et la préparation de cartes des risques et l'identification des domaines d'action prioritaires.
- Les bases pour l'élaboration d'un plan d'action permettant d'aborder le problème dans une perspective globale et efficace en vue d'une solution à une échelle nationale et régionale.

Après cette première partie, le manuel comprend un guide d'identification des pylônes dangereux à l'origine de l'électrocution d'oiseaux, se présentant sous forme de fiches pour chaque typologie connue, avec comprenant une description, une explication de sa dangerosité et les mesures correctives recommandées, ainsi que des exemples de mise en œuvre de ces mesures et des images pour chaque type de pylône.

Le manuel vise à caractériser toute la typologie des lignes électriques pouvant exister en Afrique du Nord. Lignes électriques dans les environs de Rabat (Maroc). © Justo Martín.

La description de la typologie a été abordée sous une perspective élargie, en incluant une grande partie des différents supports existants des deux côtés de la Méditerranée. Cependant, en raison de la connaissance fragmentée que nous avons de la typologie existante, il est possible que, malgré les efforts déployés pour collecter autant d'informations que possible, certains types représentés dans ce guide ne soient pas présents en Afrique du Nord et inversement (il est possible que d'autres types existent mais ne figurent pas dans ce manuel). Tous ces types de pylônes ont été inclus au cas où, à l'avenir, ils seraient considérés comme une option. Dans ce cas, le guide servirait à évaluer leur dangerosité à l'avance et, par conséquent, à rejeter ou à accepter leur choix. De même, l'inclusion d'une grande variété et d'options multiples facilite la caractérisation des typologies qui n'ont pas été recueillies, en rendant l'évaluation de leur dangerosité et la détermination des meilleures mesures correctives plus ou moins simples.

Le manuel est complété par une annexe qui explique comment les lignes nouvellement créées devraient être conçues afin de ne pas représenter un danger pour les oiseaux, avec des recommandations structurelles et procédurales.

Enfin, la législation de référence nord-africaine relative à la protection des oiseaux est incluse à la fin du manuel, ainsi qu'une bibliographie.

Remerciements

Ce guide a nécessité de la participation d'un certain nombre de personnes qui ont apporté leurs connaissances, expertise et matériel pour permettre son élaboration et publication.

Cela n'aurait été possible sans l'étroite collaboration de Catherine Numa (UICN-Med), Íñigo Fajardo (CAGPDS) et Daniel Burón (CAGPDS). De même, nombreuses personnes ont apporté des informations, des suggestions et du matériel pour enrichir le présent document (*par ordre alphabétique*): Mohamed Amezian (GREPOM), José Joaquín Aniceto (CAGPDS), Gabriel Babiloni (CERFA), Brahim Bakass (GOMAC), Lola Cano (Fondation Migres), Andrew Dixon (International Association for Falconry and the Conservation of Birds of Prey), Lahouari Djardini (Parc national de Theniet El Had, Algérie), James F. Dwyer (EDM International), Rachid El Khamlichi (GREPOM), Amina Fellous-Djardini (Mouvement écologique algérien), Alfonso Godino (AMUS), Juan José Iglesias (GREFA), Ali Irizi (ASARA), Catarina Machado (DEMA), Manuel Muñoz (Disace), Alejandro Onrubia (Fondation Migres), Karim Rousselon (AMFCR) et Carlos Torralvo (Fondation Migres). Nous remercions également l'Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable du Maroc et la Société tunisienne de l'électricité et du gaz par le soutien et l'intérêt manifestés.

Nous devons mentionner de manière très spéciale la contribution indispensable de la Direction générale de l'environnement, de la biodiversité et des aires protégées du Ministère régional de l'Agriculture, de la production animale, de la pêche et du développement durable du gouvernement régional d'Andalousie, Espagne. Le marquage des individus avec des émetteurs satellitaires dans le cadre du Plan de récupération de l'aigle ibérique de ce Ministère régional, en collaboration avec l'équipe du Dr. Miguel Ferrer du Conseil Supérieur de la Recherche Scientifique (CSIC Espagne), a permis de détecter pour la première fois l'importance de la mortalité dans les lignes électriques sur les rapaces menacés en Afrique du Nord.

Nous remercions également les deux réviseurs, Jean-Yves Paquet et Luis De Lara, qui ont apporté des commentaires pertinents et constructifs, améliorant considérablement la version finale de ce document. De plus, nous exprimons notre reconnaissance au Comité des publications de l'UICN pour leur conseils et soutien dans la finalisation du document.

Enfin, nous adressons notre profonde gratitude à la Fondation MAVA qui, grâce à son financement, a permis de réaliser cette publication.

Acronymes

AMFCR	Association Marocaine pour la Fauconnerie et la Conservation des Rapaces
AMUS	Action pour le monde sauvage (<i>Acción por el Mundo Salvaje</i>)
APLIC	Avian Power Line Interaction Committee
ASARA	Association des Amis des Rapaces
CAD	Centre d'analyse et diagnostic de la faune sauvage (<i>Centro de Análisis y Diagnóstico de la Fauna Silvestre</i>)
CAGPDS	Ministère régional de l'Agriculture, de la production animale, de la pêche et du développement durable (<i>Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible</i>) de la Junta de Andalucía (gouvernement régional d'Andalousie, Espagne)
CE	Commission européenne
CERFA	Centre d'études faunistiques et environnementales (<i>Centro de Estudios Faunísticos y Medioambientales</i>)
CSE	Commission de la sauvegarde des espèces
DEMA	Defensa y Estudio del Medio Ambiente
GOMAC	Groupe d'ornithologie du Maroc
GREFA	Groupe de réhabilitation de la faune autochtone et son habitat (<i>Grupo de Rehabilitación de la Fauna Autóctona y su Hábitat</i>)
GREPOM	Groupe de Recherche Pour la Protection des Oiseaux du Maroc
HCEFLCD	Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification, Maroc
MTE	Ministère de la Transition écologique (<i>Ministerio para la Transición Ecológica</i>), Espagne
ONEE	Office National de l'Électricité et de l'Eau Potable – Branche Électricité
ONG	Organisation non gouvernementale
OPGW	Câbles de garde avec un noyau de fibre optique à l'intérieur (<i>Optical Ground Wire</i>)
PVC	Chlorure de polyvinyle (<i>Polyvinyl chloride</i>)
REE	Réseau électrique espagnol (<i>Red Eléctrica de España</i>)
SIG	Système d'information géographique
UE	Union européenne
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature
UICN-Med	Centre de Coopération pour la Méditerranée de l'UICN
ZICO	Zones importantes pour la conservation des oiseaux

1

Introduction

1.1. CONTEXTE

Parmi les différents impacts de l'activité humaine sur la planète, les plus graves sont notamment issus de la consommation d'énergie. Les sociétés modernes ont besoin de l'apport continu d'énormes quantités d'énergie, dont l'approvisionnement doit être garanti à tout moment.

Cette importante consommation d'énergie entraîne de nombreux impacts sur la biodiversité, lesquels touchent pratiquement tous les écosystèmes terrestres et affectent gravement un grand nombre d'espèces. Ces impacts peuvent être de nature plus ou moins locale, tels que ceux issus de l'extraction directe des combustibles et matières premières nécessaires (charbon, pétrole, gaz naturel, etc.) ou de l'occupation du sol par des infrastructures énergétiques (barrages pour la production hydroélectrique, parcs éoliens, centrales solaires, entre autres), jusqu'au caractère mondial de l'augmentation des émissions de gaz dans l'atmosphère et du changement climatique, conséquence ultime de notre société dépendante en énergie.

Photo 1-1. Les lignes électriques sont devenues une composante du paysage. On estime leur longueur à plus de 65 millions de kilomètres dans le monde. À proximité du Haut Atlas, Maroc. © José Rafael Garrido.

Parmi ces différents types d'impacts figurent ceux inhérents aux lignes électriques. L'électricité est l'un des principaux types d'énergie que nous consommons et son utilisation nécessite un système de distribution efficace entre les centres de production et de consommation par le biais d'un réseau dense de lignes électriques. Celles-ci sont tellement répandues dans le paysage qu'il est pratiquement impossible d'observer un horizon ouvert sans tours ni câbles dans les zones habitées, même si nous sommes tellement habitués à les voir comme un élément du paysage que nous ne les remarquons même plus (Photo 1-1). **Il est estimé qu'il existe dans le monde plus de 65 millions de kilomètres de lignes électriques** à haute et moyenne tension, dont le taux de croissance est de 5 % par an (Jenkins et al., 2010).

Les lignes électriques produisent différents types d'impacts sur les écosystèmes qu'elles sillonnent (Biasotto & Kindel, 2018). Les plus connus sont probablement ceux dont les communautés d'oiseaux sont victimes, à savoir les électrocutions et les collisions avec ces infrastructures, affectant aussi bien les espèces établies sur ces territoires que celles qui les traversent au cours de leurs migrations et leurs dispersions (Ferrer, 2012 ; Bernardino et al., 2018). Il s'agit d'un impact global, qui se produit partout dans le monde où des lignes électriques sont installées. Certaines estimations faites à partir des données observées indiquent que des millions d'oiseaux meurent chaque année ; ce chiffre pourrait dépasser 100 millions en Amérique du Nord (Loss et al., 2014) et atteindre plusieurs millions de plus en Europe (Prinsen et al., 2011a).

Les lignes électriques produisent un éventail varié d'impacts sur les écosystèmes qu'elles sillonnent; les plus connus étant peut-être ceux dus à l'électrocution et la collision d'oiseaux avec ces infrastructures.

L'intensité de cet impact n'est pas uniforme et varie énormément selon les différents environnements et groupes d'oiseaux présents. Parmi les plus touchés figurent les oiseaux de proie, dont certaines espèces ont un état de conservation délicat et pour lesquelles les problèmes générés par les lignes électriques, en particulier les électrocutions, sont généralement l'une des principales menaces.

Des électrocutions ont été documentées chez au moins 64 espèces de rapaces réparties dans le monde (Hunting, 2002 ; Lehman et al., 2007). Celles-ci sont la cause profonde du déclin des populations et des sous-populations d'espèces dont l'état de conservation est déjà très précaire, affectant à la fois les aires de reproduction et d'hivernage, les jeunes et les adultes (Eccleston & Harness, 2018), comme cela est décrit plus en détail au chapitre 3.

Le bassin méditerranéen abrite une riche communauté de rapaces. De nombreuses espèces sont présentes sur les deux rives et sont donc réparties en métapopulations entre le sud de l'Europe et le nord de l'Afrique. La connexion entre les différentes sous-populations est sans aucun doute un grand avantage pour sa conservation (Photo 1-2).

Conscient de ce problème et de la nécessité de le traiter d'un point de vue régional, le Centre de Coopération pour la Méditerranée de l'UICN (UICN-Med) a travaillé ces dernières années sur une série d'activités visant à promouvoir la coopération entre les différents acteurs impliqués dans la conservation des rapaces en Méditerranée, en mettant spécialement l'accent sur les effets des lignes électriques sur ces oiseaux.

La première de ces activités a été organisée en 2015 à Malaga (Espagne), en collaboration avec le Groupe CSE/UICN de spécialistes des vautours et la Junta de Andalucía, sous l'intitulé « La conservation transfrontalière des rapaces menacés en Méditerranée ». L'une des principales recommandations issues de ce séminaire a été la nécessité de promouvoir l'échange d'informations et d'expériences entre les spécialistes de l'Espagne (en tant que représentants européens) et de l'Afrique du Nord, et plus particulièrement en termes de configuration de lignes électriques et de conservation de la biodiversité entre les sociétés du secteur de l'électricité des pays concernés.

Photo 1-2. L'aigle de Bonelli (*Aquila fasciata*) est présent sur les deux rives de la Méditerranée. © Íñigo Fajardo.

En 2016, à la suite des recommandations de ce premier séminaire, une mission a été effectuée au sud du Maroc dans la région de Guelmim-Oued Noun avec la participation de spécialistes de l'UICN-Med, de la Junta de Andalucía et du Maroc. Cette expédition a permis de repérer un point noir majeur d'électrocution de rapaces menacés. Ainsi, un total de **70 oiseaux électrocutés appartenant à 7 espèces différentes ont été**

Photo 1-3. La région de Guelmim-Oued Noun, au sud-ouest du Maroc, où des spécialistes de l'UICN-Med, de la Junta de Andalucía et du Maroc ont découvert un important point noir d'électrocution en 2016. © Daniel Burón.

retrouvés après l'inspection d'un peu plus de 400 pylônes (Photos 1-3 et 1-4). Au-delà des données concrètes, cette découverte a permis de constater l'ampleur que ce problème pourrait avoir dans toute l'Afrique du Nord. Les travaux ont débouché sur la présentation du rapport « *Identification de la mortalité des rapaces par électrocution dans le sud-ouest du Maroc* » (Godino et al., 2016), publié en 2016 par l'UICN-Med.

Photo 1-4.

À Guelmim, 70 oiseaux électrocutés appartenant à 7 espèces différentes ont été retrouvés lors d'une inspection d'un peu plus de 400 pylônes. Cigogne blanche (*Ciconia ciconia*) électrocutée. © Daniel Burón.

Photo 1-5. Image de l'atelier sur les infrastructures électriques et l'avifaune, organisé en 2018 au Maroc.
© Iñigo Fajardo.

Cet ensemble de circonstances a conduit à l'organisation en 2016, 2017 et 2018 de formations spécifiques pour les différents agents concernés par la thématique (administration centrale, compagnies d'électricité, ONG) dispensées en Espagne, Tunisie et au Maroc, où les administrations et les sociétés ont révélé leur volonté de faire face au problème et d'entreprendre des actions de formation, ainsi que l'édition de ce manuel (Photo 1-5).

1.2. PUBLIC CIBLE ET OBJECTIFS

Ce guide s'adresse à toutes les personnes travaillant dans différents domaines, liés aussi bien à la conservation de la biodiversité qu'à la production et à la distribution d'énergie électrique, et souhaitant mieux connaître les effets des lignes électriques, par collision et par électrocution, sur les populations des oiseaux, en particulier les rapaces. De plus, il vise à atteindre les gouvernements à différents niveaux, depuis le local au national, les promoteurs et les bailleurs de fonds œuvrant dans le secteur de la planification et du développement.

L'objectif n'est pas seulement de prendre conscience de l'ampleur du problème, mais aussi de diffuser les moyens les plus efficaces pour inverser cette situation, notamment du point de vue de la prévention, c'est-à-dire comment concevoir des lignes électriques qui coexistent en harmonie avec les oiseaux qui survolent les territoires qu'elles traversent en produisant un impact minimal sur eux (Photo 1-6).

Photo 1-6. Nous devons nous assurer que les lignes électriques coexistent en harmonie avec les oiseaux qui survolent les territoires qu'elles traversent. Paysage avec des lignes électriques en Algérie. © Lahouari Djardini et Amina Fellous-Djardini.

Photo 1-7. Le manuel vise à caractériser toute la typologie des lignes électriques pouvant exister en Afrique du Nord. Lignes électriques dans les environs de Rabat (Maroc). © Justo Martín.

La description de la typologie a été abordée sous une perspective élargie, en incluant une grande partie des différents pylônes existants des deux côtés de la Méditerranée. Cependant, en raison de la connaissance fragmentée que nous avons de la typologie existante, il est possible que, malgré les efforts déployés pour collecter autant d'informations que possible, certains types représentés dans ce guide ne soient pas présents en Afrique du Nord et inversement (il est possible que d'autres types existent mais ne figurent pas dans ce manuel).

Tous ces types de pylônes ont été inclus au cas où, à l'avenir, ils seraient considérés comme une option. Dans ce cas, le guide servirait à évaluer leur dangerosité à l'avance et, par conséquent, à rejeter ou à accepter leur choix. De même, l'inclusion d'une grande variété et d'options multiples facilite la caractérisation des typologies qui n'ont pas été recueillies, en rendant l'évaluation de leur dangerosité et la détermination des meilleures mesures correctives plus ou moins simples (Photo 1-7).

2

Énergie et lignes électriques

2.1. PRODUCTION ET TRANSPORT D'ÉNERGIE

Photo 2-1. La forte demande en électricité dans la société moderne exige l'existence de grands centres de production. Parc éolien au Maroc. © ONEE.

La demande en électricité dans la société actuelle nécessite sa production en grande quantité (Photo 2-1). Cependant, l'énergie électrique produite à grande échelle ne peut pas être stockée, de sorte que les besoins de consommation sont couverts en maintenant un équilibre constant avec la production. Cet équilibre est obtenu grâce au **réseau électrique**, qui relie tous les centres de production à des points de consommation situés à des centaines de kilomètres.

Ainsi, dans le système d'approvisionnement électrique, trois activités peuvent être différenciées :

- ➔ La **génération**, qui transforme une forme d'énergie, soit chimique, mécanique, thermique ou lumineuse, entre autres, en énergie électrique.
- ➔ Le **transport**, qui amène l'énergie des points de production jusqu'à proximité des centres de consommation.
- ➔ La **distribution**, qui transfère l'énergie aux consommateurs finaux.

La majeure partie de la **génération** a lieu dans des **centrales électriques**, où l'énergie électrique est produite à partir d'énergie mécanique, puis à son tour d'autres sources d'énergie primaires.

Cette énergie mécanique provient normalement de l'énergie thermique fournie à l'eau pour produire de la vapeur à haute pression, utilisée pour déplacer des turbines où cette énergie mécanique est transformée en énergie électrique. Selon la source de chaleur utilisée pour convertir l'eau en vapeur, il existe différents types de centrales.

Photo 2-2. La génération de vapeur à haute pression pour déplacer les turbines est le moyen le plus répandu pour produire de l'électricité en grande quantité. Centrale thermosolaire au Maroc.
© ONEE.

Dans les centrales **thermiques**, la source de chaleur est le charbon, le mazout, le gaz ou même le biodiesel. Les centrales **nucléaires** utilisent la chaleur dérivée de la fission de l'uranium. Concernant les centrales **solaires thermiques**, la source de chaleur est l'énergie du soleil, concentrée au moyen de systèmes de miroirs (Photo 2-2). Enfin, les centrales de **biomasse** utilisent les rebuts agricoles et forestiers, tandis que les centrales de transformation des **déchets solides urbains** fonctionnent à partir des matières qui ne sont ni recyclées ni exploitées.

Au sein du système qui achemine l'énergie des centres de production jusqu'aux points de consommation finale, différents types de lignes électriques peuvent être différenciés selon leur fonction et leur tension.

Dans les centrales **hydroélectriques**, l'énergie potentielle de l'eau est utilisée grâce à l'existence d'une dénivellation pour déplacer les turbines. Dans les éoliennes, l'énergie du vent est transformée directement en électricité par une turbine éolienne connectée aux pales.

Un cas différent est celui des centrales **solaires photovoltaïques**, qui produisent de l'électricité à travers des structures spéciales, des cellules photovoltaïques, capables de capter la lumière du soleil et de la convertir en énergie électrique par le biais de l'effet dit photoélectrique.

Dans les centrales électriques, l'énergie est générée avec une tension de 10 à 20 kilovolts (kV). Le courant produit est dirigé directement vers une **station élévatrice ou transformatrice** de tension pour atteindre une tension entre 66 et 380 kV, dans le but d'optimiser le transport de l'énergie dans le réseau et de réduire au minimum les pertes lors du déplacement à travers les lignes électriques.

L'électricité passe donc par les **lignes de transport** jusqu'à proximité des points de consommation, où se trouvent les **stations de transformation**. Là, la tension du courant est abaissée à des valeurs comprises entre 25 et 132 kV puis sort en circulant dans les **lignes de distribution**. À travers de ces dernières, l'énergie électrique atteint les **sous-stations transformatrices de distribution**, où la tension est à nouveau abaissée à 3-30 Kv (Photo 2-3).

Dans une nouvelle étape, elle est distribuée jusqu'aux **transformateurs**, où la tension est à nouveau abaissée au niveau d'utilisation habituelle par les consommateurs finaux (125/220 V pour un usage domestique ou 220/380 V pour un usage industriel), auxquels est distribuée directement à partir de là cette énergie. Ces transformateurs peuvent être situés à l'intérieur d'un bâtiment ou d'une construction, ou bien installés à l'extérieur, sur une ligne électrique. Dans ce dernier cas, ils portent le nom de « transformateurs extérieurs » (voire « transformateurs aériens »).

Photo 2-3. Dans les sous-stations, la tension de l'électricité provenant des lignes de transport est abaissée, puis dérivée vers les lignes de distribution. Sous-station au Maroc. © ONEE.

En conclusion, au sein du système qui achemine l'énergie des centres de production jusqu'aux points de consommation finale, il existe différents types de lignes électriques en fonction de leur rôle et de leur tension (Figure 2-1) :

- ➔ **Les lignes de transport**, souvent appelées de **haute tension**, acheminent l'énergie des centrales jusqu'aux sous-stations de transformation, avec une tension supérieure à 66 kV (110-380 kV ou plus).

➔ **Les lignes de distribution** acheminent l'énergie des sous-stations de transformation jusqu'aux points de consommation. Il en existe trois types :

a) Les lignes de répartition acheminent l'énergie des sous-stations de transformation jusqu'aux stations de transformation de distribution (25-132 kV).

b) Lignes de distribution moyenne tension, elles relient les stations de transformation de distribution aux transformateurs (3-30 kV).

c) Les lignes de distribution basse tension transportent l'énergie des transformateurs vers les clients finaux (125-220-380 V).

Figure 2-1. Les lignes électriques transportent l'énergie des centres de production jusqu'aux points de consommation. Schéma du système d'alimentation en électricité. Source: modifié d'après Wikipédia CC BY 2.5

Cette terminologie des lignes à haute, moyenne et basse tension est très répandue, bien que d'autres puissent prêter à confusion. Ainsi, parfois, les lignes de plus de 1 kV sont appelées lignes « à haute tension » ; dans d'autres cas, les lignes de transport sont considérées comme de « très haute tension », le terme « haute tension » n'étant utilisé que pour la distribution d'une tension plus élevée. De même, une autre dénomination peut chevaucher la dénomination classique sous la forme de catégories, établies selon différentes plages de tension.

Photo 2-4. Les deux éléments fondamentaux d'une ligne électrique sont les câbles (phases ou conducteurs) traversés par l'électricité et les structures qui les supportent (pylône, support, poteau, tour ou tourelle)
© Daniel Burón.

2.2. ÉLÉMENTS D'UNE LIGNE ÉLECTRIQUE

Dans une ligne électrique, nous distinguons deux éléments fondamentaux (Photo 2-4) :

- ➔ **Phases** ou **conducteurs** : ce sont les câbles à travers lesquels circule le courant électrique.
- ➔ **Pylônes, supports, poteaux, tours** ou **tourelles** : ce sont les structures qui maintiennent les conducteurs suffisamment hauts sur le sol et à une distance suffisante les uns des autres.

Les conducteurs peuvent être en cuivre, en aluminium ou en un alliage aluminium-acier ; ils sont généralement nus, non revêtus, bien que dans les lignes de distribution « basse tension », les câbles tressés ou torsadés soient plus fréquents, lesquels sont composés de trois phases recouvertes individuellement par un matériau isolant, câblé sur un noyau central. Dans les lignes de distribution de « moyenne tension », leur utilisation est limitée en raison de leur coût plus élevé ; le câblage de ce type est plus coûteux et, de plus, du fait de son poids plus important, il nécessite un plus grand nombre de supports. D'autre part, ce système n'est pas possible avec des tensions supérieures à 30 kV, de sorte que son utilisation est limitée à des situations très spécifiques, par exemple pour prévenir les incendies de forêt dans les zones à végétation dense.

Pour diverses questions d'efficacité, de facilité d'utilisation et de transport, la production et le transport de l'énergie électrique se font en alternance et en trois phases. Un **système triphasé** est constitué de trois courants alternatifs monophasiques de fréquence et d'amplitude égales, qui présentent une différence de phase de 120° électriques. Chacun des courants monophasés qui constitue le système est appelé **phase**. C'est pour cette raison que nous voyons sur les lignes électriques trois conducteurs ou groupes de trois, chaque groupe constituant un circuit différent. Dans les foyers, l'électricité arrive normalement en monophasé, au moyen de deux câbles, un conducteur et un **neutre**, à partir d'un circuit triphasé, tandis que les magasins et les industries consomment l'électricité sous forme triphasée (Figure 2-2).

Pour les lignes à basse tension, les câbles sont gainés et torsadés, bien qu'ils puissent

également apparaître nus et séparés, montés sur des supports similaires à ceux de moyenne tension, bien que dans ce cas-là, il apparaît en plus des trois conducteurs, le neutre (typique de la basse tension), en tant que quatrième câble qui passe à un niveau inférieur (Photo 2-5).

Photo 2-5. À gauche, ligne basse tension, avec les conducteurs gainés et torsadés ; à droite, ligne moyenne tension avec les trois phases nues. © Justo Martín.

Pour les lignes à tension supérieure à 66 kV, le circuit présente un ou deux câbles supplémentaires pour les conducteurs, celui dénommé **câble de mise à la terre ou de garde** ; ce câble, généralement en acier avec un revêtement en aluminium, ne conduit pas de courant et il est connecté à la terre sur chacune des tours. Sa fonction est de protéger la ligne contre les décharges électriques directes (foudre). Bien que ce soit la manière la plus habituelle, il n'est pas toujours au-dessus des conducteurs (Figure 2-3).

Figure 2-3. Éléments basiques d'une ligne électrique. © Justo Martín.

Ce système de protection est complété par **la mise à la terre** présente sur tous les types de lignes, reliant le pylône au sol au moyen d'un câble raccordé à un ou plusieurs piquets ou tiges métalliques enfoncés dans le sol.

Récemment, une autre fonction a été ajoutée au câble de garde avec l'installation de câbles de type OPGW (*Optical Ground Wire*), dont la structure externe est similaire, mais possèdent à l'intérieur un noyau de fibre optique, constituant un système efficace pour le déploiement de ce type de lignes de télécommunication sur tout le territoire.

Les supports sont construits en métal, béton ou bois et sont ancrés au sol par des fondations en béton, en béton armé ou en acier. Leur hauteur et leur configuration sont très variables et dépendent principalement de la tension du courant qui traverse les conducteurs (Photos 2-6, 2-7 et 2-8).

Photos 2-6, 2-7 et 2-8. Les supports sont construits en métal (à gauche), béton (au centre) ou bois (à droite).

© Daniel Burón.

L'espace entre les pylônes est appelé **portée** ; la distance exprimée en mètres s'appelle **ouverture**. Sa longueur dépend du type de ligne et de la taille des supports ; elle peut dépasser 500 m sur les grandes lignes de transport ou moins de 50 m sur les lignes de distribution inférieures. La **flèche** est la distance entre la ligne droite passant par les pointes de fixation d'un conducteur sur deux pylônes successifs et le point le plus bas du même conducteur. La courbe produite par le câble est appelée **chaînette/caténaire** (Figure 2-4).

Figure 2-4.

Dénomination des espaces et des distances entre pylônes. Ligne électrique avec des poteaux en béton et des conducteurs gainés et torsadés. © Justo Martín.

Le pylône est constitué d'un **fût** ou **poteau** et d'une **traverse** (on parle aussi de **treillis** ou d'**armement**). Les différents éléments qui composent la traverse sont les **console**s. Le fût est la partie verticale qui supporte la traverse, où les conducteurs sont fixés (Figure 2-5). Dans le cas de pylônes avec des dérivations (sortie d'une autre ligne de ce support), une distinction est faite entre la **traverse principale**, celle qui porte le circuit général, et la **traverse auxiliaire**, où sont installés les éléments de dérivation (Figure 2-6).

Figure 2-5.

Parties d'un pylône (pylône d'ancrage avec traverse en nappe-voûte plate et ponts au-dessous des isolateurs). © Daniel Burón.

Figure 2-6. Parties d'un pylône (pylône d'ancrage avec traverse en armement alterné et dérivation munies de sectionneurs-fusibles). © Justo Martín.

Selon la disposition des isolateurs sur la traverse, ils se dénomment isolateurs suspendus, dressés ou d'ancrage.

Les conducteurs sont soutenus sur la traverse par les **isolateurs**, qui sont les éléments qui supportent mécaniquement les conducteurs et les isolent de la terre et des autres conducteurs, en évitant ainsi le passage du courant du conducteur au support et par ce biais une perte d'énergie. Ces éléments isolants (assiettes) sont généralement fabriqués en verre, en porcelaine ou un mélange des deux (isolateurs composites), disposés en unités isolées (**isolateur simple**) ou, plus généralement, en ensembles de plusieurs unités qui constituent ce que l'on appelle des **chaînes d'isolateurs**. Celles-ci peuvent être remplacées par des **isolateurs polymères**, des éléments monoblocs constitués d'un noyau central en matériau solide, généralement en fibre de verre, et d'une enveloppe extérieure isolante et souple en matériau polymère.

L'union des conducteurs avec les isolateurs et de ceux-ci avec les supports se fait à travers des pièces de fixation métalliques (les ferrures) qui peuvent être de différents types : **fourches, anneaux, pinces, crochets**, etc. D'autres types de pièces métalliques ayant des fonctions différentes peuvent également apparaître, en particulier sur les lignes de transport, tels les **stabilisateurs** des câbles de garde et des conducteurs, les séparateurs et les contrepoids, tous présents sur les lignes de transport ou les différents éléments de protection contre les surtensions, comme les raquettes, les anneaux ou les cornes (Figure 2-7).

Figure 2-7.

Parties d'un pylône
(ligne de transport avec
isolateurs suspendus).
© Justo Martín.

Selon la disposition des isolateurs sur la traverse, ils se dénomment (Figure 2-8) :

- ➔ **Isolateurs suspendus**, disposés au-dessous des consoles de la traverse.
- ➔ **Isolateurs dressés, d'appui ou de support**, disposés au-dessus des consoles de la traverse.
- ➔ **Isolateurs d'ancrage**, disposés horizontalement, en maintenant le conducteur et en soutenant la tension de la ligne.

Figure 2-8. Types basiques de pylônes basés sur la disposition des isolateurs sur la traverse. A : isolateurs suspendus. B : isolateurs dressés. C : isolateurs d'ancrage.

Dans le cas des isolateurs d'ancrage, la connexion du courant entre les extrémités des chaînes d'isolateurs est réalisée au moyen de conducteurs appelés **ponts d'ancrage ou bretelles de liaison**, disposés au-dessus ou au-dessous des chaînes (Figures 2-5, 2-6 et 2-9). Les connexions entre les conducteurs sur les ponts se font via des connecteurs métalliques spéciaux (AMPACT).

Figure 2-9. Systèmes de fixation et de connexion. © Justo Martín.

La longueur des chaînes d'isolateurs dépend de la tension qui circule dans les conducteurs ; à tension plus élevée, une longueur plus importante est nécessaire pour garantir l'isolation et, par conséquent, pour assurer une plus grande séparation entre les câbles afin d'éviter les décharges, ce qui nécessite à son tour une plus grande dimension des pylônes. Ainsi, la hauteur varie entre les 10 m des plus petites lignes de distribution jusqu'à plus de 50 m des tourelles à 400 kV ou les plus de 100 m des pylônes dits à ultra haute tension, conçus pour des tensions de 1000 kV.

Les pylônes peuvent également comporter des dispositifs de **manœuvre** et de **protection**. Les dispositifs de manœuvre servent à désamorcer (« décharger ») la tension des parties d'une installation ou des tronçons d'une ligne pour travailler dessus en toute sécurité. Les dispositifs de protection protègent contre les surcharges et les courts-circuits. Certains dispositifs remplissent les deux fonctions, manœuvre et protection.

- ➔ **Sectionneurs.** Ce sont les dispositifs de manœuvre les plus fréquents. S'ils agissent sur une phase, ils se dénomment **unipolaires** (Figure 2-10) et s'ils agissent sur les trois à la fois, **tripolaires**. Ils incorporent des isolateurs polymères ou en verre, en nombre variable (2 ou 3 par phase), et peuvent être dressés ou suspendus sur la traverse.
- ➔ **Sectionneurs-fusibles (*cut-out*).** Ils remplacent fréquemment les sectionneurs ; ce sont des dispositifs permettant la manœuvre tout en protégeant contre les surcharges et les courts-circuits (Figure 2-6).
- ➔ **Valves automatiques.** Elles accompagnent les sectionneurs sur certains types de pylônes (avec transformateurs, passage aérien-souterrain) ; elles remplissent la fonction de paratonnerres en protégeant contre les surtensions d'origine atmosphérique (Figures 2-11 et 2-12).
- ➔ **Interrupteur-sectionneur.** Il remplace les sectionneurs en tant que dispositif de manœuvre. Il est placé sur le poteau et est accompagné de plusieurs éléments reliés par un câblage (Figure 2-10).
- ➔ **Disjoncteur-réenclencheur.** Toujours sur le poteau, c'est un commutateur à reconnexion automatique. Il s'agit d'un dispositif de protection capable de détecter une surintensité, de l'interrompre et de se reconnecter automatiquement pour remettre sous tension la ligne.
- ➔ **Ponts d'union.** Ce sont des connecteurs reliant entre eux les différents éléments de la ligne électrique (Figures 2-6, 2-10 et 2-11).

Un autre élément qui apparaît placé sur le poteau est le **transformateur extérieur**. La conversion de tension moyenne à basse se produit dans cet élément. Comme les interrupteurs-sectionneurs ou les disjoncteurs-réenclencheurs, il est accompagné de différents éléments reliés entre eux (Figure 2-11).

Figure 2-10. Systèmes de manœuvre et de protection. À gauche : pylône équipé de sectionneurs unipolaires suspendus. À droite : pylône équipé d'un interrupteur-sectionneur. © Justo Martín.

Figure 2-11. Pylônes équipés d'un transformateur extérieur ; à gauche, sur pylône d'ancrage ; à droite, sur pylône de fin de ligne. © Justo Martín (à gauche) ; Lahouari Djardini et Amina Fellous-Djardini (à droite).

Après être passées par le transformateur ou avoir atteint les centres de transformation situés à l'intérieur de bâtiments spécifiques, les lignes électriques deviennent souvent souterraines (Photos 2-9 et 2-10). Le passage aérien-souterrain est installé sur des pylônes spéciaux sur lesquels le câble aérien nu pénètre dans le sous-sol déjà isolé. La structure de connexion dans laquelle cette modification est effectuée s'appelle **boîte de jonction** (Figure 2-12).

Photo 2-9 et Photo 2-10. Exemples de transformateurs situés à l'intérieur de bâtiments spécifiques. La ligne moyenne tension (nue) entre dans le bâtiment et les lignes basse tension (gainés) partent vers les consommateurs finaux. © Équipe lignes électriques-GREFA.

Figure 2-12. Parties d'un pylône de raccordement aéro-souterrain. © Justo Martín.

2.3. TYPES DE PYLÔNES OU SUPPORTS

➔ Selon sa fonction sur la ligne :

A. Pylônes de suspension ou de support. Leur fonction est de soutenir les conducteurs et les câbles de mise à la terre et de les maintenir au sol. Ceux utilisés dans les alignements droits sont les plus nombreux.

B. Pylônes d'ancrage. Pylônes dotés de chaînes d'isolateurs d'ancrage dont la fonction est de fournir des points solides sur la ligne, en maintenant la tension des câbles et en limitant la propagation d'efforts exceptionnels, afin d'empêcher leur destruction lors de la rupture accidentelle d'un conducteur ou d'un support. Parfois, une distinction est faite entre les pylônes d'ancrage proprement dits, situés au début ou à la fin de la ligne ou disposés en angle, et les pylônes de fixation, disposés sur les alignements rectilignes remplaçant les pylônes de suspension à une certaine distance définie, variable en fonction de la morphologie du terrain (Photos 2-11 et 2-12).

Photo 2-11 et Photo 2-12.

Parmi les pylônes d'ancrage, on distingue les pylônes de fixation (en haut), disposés dans les alignements droits, et ceux d'ancrage proprement dit (en bas), en début, en fin de ligne ou en angle. © Daniel Burón (en haut) et Justo Martín (en bas).

C. Pylônes spéciaux. Pylônes ayant une fonction différente des précédents. Parmi eux se trouvent les pylônes de dérivation ou de bifurcation, qui dérivent la ligne électrique dans différentes directions ; de jonction, où une ligne à double circuit est séparée en deux lignes à circuit simple ou à partir de laquelle commence une dérivation sur une ligne de deux ou plusieurs circuits ; de protection, de manœuvre, de conversion aérienne/souterraine, etc. Ce groupe comprend également les pylônes de passage, spécialement conçus pour franchir des voies ferrées, des rivières, des lignes de télécommunication, etc.

➔ **Selon sa position relative par rapport au tracé des lignes :**

- A. Pylônes d'alignement.** Supports de suspension, de fixation ou d'ancrage ou disposés sur un tracé rectiligne de la ligne.
- B. Pylônes d'angle.** Supports de suspension, de fixation ou d'ancrage placés à un angle du tracé de la ligne. Ils sont spéciaux, car leur emplacement doit résister à de fortes tractions.
- C. Pylônes de début ou de fin de ligne.** Munis de chaînes d'isolation d'ancrage, ces supports sont soumis à un grand effort transversal, ce qui les oblige à avoir des fondations spéciales.

➔ **Selon la disposition des isolateurs et la configuration des traverses, ainsi que la présence d'autres éléments sur le pylône :**

- A. Pylônes de suspension avec des isolateurs suspendus.** La chaîne des isolateurs est placée sur la traverse en position suspendue.
- B. Pylônes de suspension avec isolateurs dressés.** La chaîne d'isolateurs est disposée verticalement sur son point de fixation à la traverse.
- C. Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessous des isolateurs.**
- D. Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessus des isolateurs.**
- E. Pylônes avec sectionneurs ou fusibles, sans transformateur extérieur ni d'autres dispositifs de contrôle.** Supports à configuration variable, généralement à montage horizontal ou en armement alterné, doté de sectionneurs unipolaires, tripolaires ou de sectionneur-fusibles, sans d'autres éléments.

- F. Pylônes avec transformateur extérieur ou/et avec d'autres dispositifs de contrôle.** Pylônes à configuration variable, généralement d'ancrage et à montage horizontal (aussi en armement alterné ou en portique), dotés de différents éléments installés sur le poteau ou sur les traverses auxiliaires. Ceux-ci peuvent être un transformateur extérieur, souvent en fin de ligne, un interrupteur-sectionneur, un réenclencheur, etc. Ils disposent aussi de dispositifs de manœuvre et/ou de protection (sectionneurs, fusibles, valves automatiques).
- G. Pylônes de raccordement aéro-souterrain.** Pylônes à configuration variable, généralement d'ancrage et à montage horizontal, souvent en bout de ligne, sur lesquels la ligne passe de transport aérien à souterrain.
- H. Pylônes de dérivations.** Pylônes de montage très variable, généralement d'ancrage ou avec des isolateurs dressés ou suspendus, sur lesquels se trouvent une traverse supérieure et une autre inférieure (mais pas toujours), d'où démarre une dérivation de la ligne électrique, munie ou non de fusibles (Photo 2-13).

Photo 2-13. Pylône avec dérivation, avec une seule traverse et sans fusibles ni sectionneurs. © Daniel Burón.

Comme on le verra plus loin, **la configuration de la traverse est un aspect essentiel pour évaluer les problèmes entre les lignes électriques et les oiseaux**, de sorte que cette classification servira de référence pour ce manuel (plus de détails, en Annexe I).

3

Les lignes électriques et les oiseaux

3.1. EFFETS DES LIGNES ÉLECTRIQUES SUR LES ÉCOSYSTÈMES

Photo 3-1. Les lignes électriques traversant des espaces dégagés ont un effet visuel important sur le paysage.
Ligne électrique au Maroc. © Justo Martín.

Les lignes électriques sont à l'origine de quatre types d'impacts sur le territoire qu'elles traversent (voir révisions Negro, 1999 ; Ferrer, 2012 ; Biasotto & Kindel, 2018 ; Bernardino et al., 2018) : impacts sur le paysage, changements sur la structure de l'habitat, pollution atmosphérique et acoustique et interactions avec la faune.

Impacts sur le paysage. Les lignes électriques sont des structures linéaires et élevées (en particulier celles du transport) qui ont un impact visuel significatif sur le territoire traversé (Photo 3-1). En général, les formes géométriques des pylônes et les câbles qui les relient contrastent fortement dans les paysages naturels, où les formes asymétriques dominent. Dans les espaces dégagés, agricoles ou naturels (steppes, pâturages), elles rompent avec l'horizontalité dominante des formes du paysage. Dans les zones à végétation plus dense (forêts et maquis), elles donnent lieu à la création de couloirs débarrassés de végétation et par conséquent des lignes de démarcation du paysage. Dans les deux cas, les pylônes et les câbles deviennent des points d'acuité visuelle pour l'observateur.

En général, les formes géométriques des pylônes et les câbles qui les relient contrastent fortement dans les paysages naturels, où les formes asymétriques dominent.

Changements sur la structure de l'habitat. Les lignes électriques doivent traverser nécessairement des surfaces dégagées. Ainsi, s'il existe une végétation arboricole ou arbustive, elle est éliminée pour l'installation des lignes, ce qui réduit généralement la proportion de ce type de végétation et augmente la végétation herbacée.

Pollution atmosphérique et acoustique. Les lignes électriques génèrent des champs électromagnétiques autour d'elles, lors du transport de l'énergie (Photo 3-2). L'effet de ces champs sur l'environnement, aussi bien sur la faune que sur l'être humain, n'est pas très clair. Bien que la plupart des études n'aient pas révélé d'effets négatifs, certaines études laissent entrevoir qu'elles pourraient générer des problèmes d'altération sur le comportement de certaines espèces (Balmori, 2015). Par ailleurs, les grandes lignes de transport génèrent une certaine pollution sonore¹, bien qu'elle ne soit pas très élevée et seulement à proximité. Indirectement, elles contribuent à la pollution atmosphérique parce que le risque d'incendie de forêt augmente dans leur voisinage, bien souvent causé par des courts-circuits qui provoquent des étincelles, lesquelles enflamment la végétation environnante (Guil et al., 2018).

¹ En raison de « l'effet couronne » provoqué par l'ionisation de l'air environnant des conducteurs. Le bruit, un bourdonnement à basse fréquence semblable à un grésillement, est causé par le mouvement des ions et les décharges électriques qui se produisent.

Photo 3-2. Les lignes électriques génèrent autour d'elles des champs électriques dont l'effet sur les êtres vivants n'est pas encore très clair. Ligne électrique au Maroc. © Daniel Burón.

Interactions avec la faune. Comme pour tout élément existant dans le paysage, la faune interagit avec les lignes électriques. Même si plusieurs groupes zoologiques interagissent avec ces lignes, l'interaction la plus évidente se produit avec les oiseaux. Celle-ci peut être bénéfique, favorisant la présence de certaines espèces, ou bien nocive, non seulement pour les oiseaux, mais aussi pour les lignes électriques elles-mêmes (voir points 3.2, 3.3 et 3.4) (APLIC, 2006 ; Prinsen et al., 2011a ; Bernardino et al., 2018 ; Eccleston & Harness, 2018).

L'incidence des lignes électriques sur les écosystèmes implique un coût en termes de perte de biodiversité, de pollution, de dégradation de l'environnement, etc. Le coût économique que tout cela représente est difficile à préciser, même si certaines évaluations l'estiment (uniquement pour l'Espagne) à plusieurs centaines de millions d'euros par an (Soria & Guil, 2017 ; Guil et al., 2018).

3.2. EFFETS POSITIFS DES LIGNES ÉLECTRIQUES SUR LES OISEAUX

La présence de lignes électriques dans le paysage peut avoir des bienfaits directs pour les oiseaux, ceci pour plusieurs raisons (voir révisions APLIC, 2006 ; Prinsen et al., 2011a) :

Substrats de nidification. De nombreuses espèces utilisent les pylônes des lignes électriques comme des plates-formes ou des substrats pour construire leurs nids (Photo 3-3). Ces structures peuvent constituer une alternative dans les zones où les éléments naturels (grands arbres, rochers) sont rares, offrant également un support robuste et une bonne protection contre les prédateurs terrestres. De plus, il a été prouvé qu'au moins chez certaines espèces comme la cigogne blanche (*Ciconia ciconia*), le succès de reproduction des couples qui les utilisent ne diffère pas de ceux qui se reproduisent sur des substrats naturels (Tryjanowski et al., 2009). Ils parviennent à faciliter l'expansion de certaines espèces qui augmentent ainsi leurs densités locales ; la cigogne blanche est aussi un bon exemple de cela (Garrido & Fernández-Cruz, 2003). Cette utilisation a lieu aussi bien chez les grands oiseaux que ceux de taille moyenne et petite, ces derniers en tirant profit des recoins qu'offrent certains éléments.

Photo 3-3. Les pylônes électriques sont utilisés par de nombreuses espèces d'oiseaux pour y installer leurs nids. Couple de cigognes blanches (*Ciconia ciconia*). © Daniel Burón.

Perchoirs pour le repos ou la chasse. Les pylônes sont également une bonne option comme lieu de repos pour de nombreux oiseaux, que ce soit pendant le jour, la nuit ou par mauvais temps (Photo 3-4). Pour de nombreux rapaces, ce sont d'excellents sites pour surveiller leur territoire et contrôler leurs zones de chasse ; dans les zones où les arbres sont rares, ils favorisent la présence d'espèces qui ne pourraient autrement occuper ces espaces dégagés. D'autre part, dans les zones boisées homogènes où la densité des arbres est élevée et les pylônes sont placés au-dessus du couvert forestier, cette utilisation est également mise à profit. La position dominante leur permet de localiser leurs proies au moment où elles quittent la couverture végétale

dans leurs déplacements. Ce comportement est très significatif chez les espèces de rapaces forestiers telles que l'autour des palombes (*Accipiter gentilis*), l'épervier des steppes (*Accipiter nisus*) ou la buse commune (*Buteo buteo*).

Habitat favorable. Dans les zones à couverture végétale abondante, l'élimination de la végétation sous les lignes électriques favorise la présence d'espèces qui préfèrent les espaces plus ouverts, élargissant leur répartition le long de ces itinéraires, qui leur servent de véritables corridors. Les corridors ainsi créés peuvent également favoriser la création de mesures visant l'amélioration des habitats (création de petits étangs, plantation d'arbres et d'arbustes fruitiers, installation de nichoirs pour oiseaux de taille moyenne et petite) qui profiteraient aux oiseaux et à d'autres groupes zoologiques.

Photo 3-4. Les pylônes et les conducteurs offrent aux oiseaux des lieux de repos et des points d'observation stratégiques pour chasser ou surveiller leurs territoires. Groupe de choucas des tours (*Corvus monedula*). © Daniel Burón.

3.3. EFFETS NÉGATIFS DES LIGNES ÉLECTRIQUES SUR LES OISEAUX

Les problèmes que les lignes électriques peuvent causer aux oiseaux sont connus pratiquement depuis le début de leur déploiement. À partir de la moitié du siècle dernier, des études spécifiques ont commencé à être développées, et même à profusion dans diverses parties du monde (voir les révisions APLIC, 2006 ; Lehman, 2007 ; Prinsen et al., 2011a ; APLIC, 2012 ; Ferrer, 2012 ; Loss et al. 2014 ; Eccleston & Harness, 2018).

Les problèmes que les lignes électriques peuvent causer aux oiseaux incluent la perte et dégradation de l'habitat, des nuisances, l'effet barrière et la mortalité directe.

Perte, dégradation ou fragmentation de l'habitat. L'élimination de la végétation le long des lignes électriques, même si cela peut favoriser certaines espèces, nuit à celles liées aux environnements végétaux plus denses. Ainsi, l'abattage forestier pour créer des corridors forestiers, le débroussaillage, etc., entraîne des altérations, des lésions et une fragmentation de ces habitats, qui ont des effets d'intensité variable sur les espèces présentes dans ces lieux, en fonction de leur rareté et de leur sensibilité à ces perturbations (Photo 3-5).

Nuisances dues à l'augmentation de l'activité humaine. Elles se produisent surtout pendant la phase de construction, lorsque la circulation des personnes et des véhicules augmente, tout comme le bruit, la pollution, les vibrations, l'éclairage de nuit, etc.

Elles se produisent aussi lors des périodes de travaux d'entretien de la végétation le long des couloirs où passent les lignes électriques. Les espèces les plus sensibles à ces effets peuvent être affectées, en particulier si ces travaux ont lieu pendant la saison de reproduction et/ou s'il n'existe pas d'habitats semblables à proximité pouvant accueillir les oiseaux déplacés.

Photo 3-5. Dans les zones forestières, la création de corridors dégagés de végétation pour y installer des lignes électriques crée des effets de fragmentation de l'habitat, auxquels il faut ajouter le risque intrinsèque que représente leur présence. © Justo Martín.

Effet barrière. Les grandes lignes de transport constituent une barrière physique pour les déplacements quotidiens et saisonniers des oiseaux, lesquels peuvent même modifier leurs déplacements en raison de la dépense d'énergie supérieure qui serait nécessaire pour les éviter ou les croiser ; ces lignes pourraient même modifier le comportement migratoire et les schémas de vol de certaines espèces (Raab et al., 2011). Il a également été constaté que certaines espèces d'oiseaux adaptées aux espaces ouverts sont très sensibles à l'introduction d'éléments verticaux dans le paysage, de sorte qu'ils provoquent des déplacements locaux dans leurs zones de répartition (Silva et al., 2010). Récemment Tyler et al. (2014), ont indiqué que (au moins) certains oiseaux et mammifères pourraient être capables de percevoir pendant la nuit les décharges de rayons ultraviolets qui se produisent à proximité des conducteurs et des isolateurs, ce qui pourrait modifier également leur comportement, en évitant le voisinage de ces installations.

Mortalité directe. L'existence de lignes électriques constitue un risque direct pour de nombreuses espèces d'oiseaux, qui subissent des pertes considérables à la suite des interactions avec ces lignes. Il existe trois types d'effets négatifs directs des lignes électriques sur les oiseaux : les collisions, les électrocutions et les accrochages.

- ➔ **Les collisions** surviennent lorsqu'un oiseau en vol heurte un câble aérien de la ligne électrique (Photo 3-6). C'est le type d'interaction le plus répandu, puisqu'elles se produisent sur tous les types de lignes, des grandes lignes de transport aux câbles mêmes à basse tension (Bernardino et al., 2018).

Photo 3-6.

Les collisions peuvent se produire sur tous les types de lignes électriques, bien qu'elles soient plus courantes sur les lignes de transport. Un autour des palombes (*Accipiter gentilis*) tué lors d'une collision.
© Justo Martín.

- ➔ **Les électrocutions** se produisent lorsqu'un oiseau subit une décharge électrique en touchant deux éléments sous tension à potentiel différent ou un élément sous tension et un autre métallique, généralement une partie du support ou leur câble de mise à terre, au moment de se poser ou de prendre son envol (Photo 3-7). C'est pourquoi, cela a lieu principalement sur les lignes de distribution, où les distances entre les éléments rendent ces contacts plus probables (APLIC, 2006)².

² Non seulement les oiseaux sont électrocutés, mais aussi d'autres groupes fauniques, tels les serpents et les petits mammifères prédateurs (genets, chats sauvages) ou ceux aux coutumes arboricoles ; de grands animaux comme les pythons, les singes, les lynx et même les léopards peuvent aussi être électrocutés.

Photo 3-7. Les électrocutions se produisent presque toujours sur les lignes de distribution, dont la structure rend de tels accidents plus propices. Un aigle de Bonelli (*Aquila fasciata*) électrocuté sur un pylône. © Justo Martín

➔ **Les accrochages** sont le type d'interaction le moins fréquente et ils se produisent très rarement (Olendorff et al., 1981). Ils surviennent lorsqu'un oiseau perché sur un pylône s'emmêle les pattes (plus rarement les ailes) sur un élément métallique. L'animal finit par mourir suspendu, sans pouvoir se détacher, ou à la suite des blessures lorsqu'il parvient à se libérer. Parfois, il n'est pas facile de le distinguer d'une électrocution, car il est courant que l'oiseau demeure suspendu de la même manière (Photo 3-8). On dispose de preuves qui démontrent que des incidents de ce type ont touché des espèces différentes, telles que le faucon crécerellette (*Falco naumanni*), le balbuzard pêcheur (*Pandion haliaetus*) ou le milan royal (*Milvus milvus*), presque toujours de façon anecdotique (Martín Martín, obs. pers. 2018). Il a également été constaté des accrochages sur des conducteurs, sur des câbles torsadés (Photo 3-9), avec des dispositifs anticollisions et des cordes suspendues aux pattes des oiseaux et qui se sont enroulées autour des conducteurs où ils se posent (Martín Martín, obs. pers. 2018). Les accrochages peuvent avoir un effet très considérable localement et sur les petites populations, comme dans le cas survenu au début du XXI^e siècle aux îles Canaries, où les rares spécimens de

vautours percnoptères de la sous-espèce des Canaries (*Neophron percnopterus* subsp. *majurensis*) ont subi plusieurs pertes dues à cette cause. Les accrochages avaient lieu sur des dispositifs de stabilisation des câbles de garde, et ils ont finalement été remplacés par d'autres modèles conçus différemment permettant ainsi d'éviter ce problème (Gangoso & Palacios, 2002).

Photo 3-8.

Les accrochages sont un type d'accidents très rares, parfois difficiles à différencier des électrocutions. Milan royal (*Milvus milvus*) accroché, toujours en vie, pris au piège sur un pylône électrique.
© Íñigo Fajardo.

Photo 3-9.

Accrochage d'un faucon crécerellette (*Falco naumanni*) sur une ligne électrique avec câble torsadé, configuration fiable contre les électrocutions et les collisions.
© Íñigo Fajardo.

3.4. EFFETS NÉGATIFS DES OISEAUX SUR LES LIGNES ÉLECTRIQUES

L'utilisation des infrastructures électriques par les oiseaux, et les accidents dont ils sont victimes, peuvent être à l'origine de courts-circuits générateurs de coupures de courant, avec des inconvénients considérables pour les consommateurs et des coûts économiques pour les sociétés (Photo 3-10). Dans certaines régions du monde, on estime qu'entre 10 % et 23,5 % des coupures dans le système électrique sont causées par des incidents impliquant des oiseaux (APLIC, 2012).

Les causes sont variées :

- ➔ Contact des éléments électriques avec les matériaux du nid.
- ➔ Contacts entre conducteurs causés par le balancement d'un conducteur quand un groupe considérable d'oiseaux prend l'envol depuis celui-ci.
- ➔ Chute de proies ou de leurs restes sur les conducteurs ou les équipements électriques.
- ➔ Accumulation d'excréments sur des éléments conducteurs.
- ➔ Rupture ou contact des conducteurs suite à des collisions.
- ➔ Dégâts causés aux isolateurs ou aux fusibles par électrocutions.

Il a été estimé qu'entre 10 % et 23,5 % des coupures dans les systèmes électriques de certaines régions du monde sont causées par des oiseaux.

Les électrocutions sont la source de problèmes la plus importante. Certaines études montrent qu'entre 10 et 55 % des cas d'électrocution provoquent des courts-circuits, ce qui peut entraîner des problèmes plus graves (APLIC, 2012). Parfois, l'oiseau électrocuté s'enflamme et tombe au sol, provoquant un incendie de forêt d'une ampleur plus ou moins importante, entraînant des pertes économiques considérables, ainsi qu'une augmentation des émissions de CO₂ (Guil et al., 2018) (Photos 3-11 et 3-12).

Il y a également eu des cas d'électrocutions et de coupures de lignes de chemin de fer, entraînant des interruptions de la circulation, des pertes économiques et d'autres inconvénients conséquents.

Photo 3-10. L'utilisation intensive des pylônes électriques de transport comme lieux de nidification de la cigogne blanche (*Ciconia ciconia*) pose de nombreux problèmes aux compagnies d'électricité. © Daniel Burón.

Pour les compagnies d'électricité, les incidents causés par les oiseaux supposent un coût important, tant en termes économiques (réparation d'éléments endommagés, retrait de nids, temps consacré aux tâches administratives, compensation de coupures d'approvisionnement, etc.) qu'au niveau de leur propre image, sur le plan de la fiabilité et de la sécurité,³ vis-à-vis des consommateurs (APLIC, 2012).

³ Aux États-Unis et au Canada, on estime que les coupures d'électricité causées par des incidents impliquant des oiseaux représentent plusieurs millions de dollars par an pour les compagnies d'électricité.

Photos 3-11 et 3-12. Assez fréquemment, les électrocutions produisent des incendies de forêt. Incendie provoqué par un vautour fauve (*Gyps fulvus*) suite à son électrocution sur un pylône de la ligne électrique traversant le coupe-feu. © CAGPDS/COR-INFOCA.

3.5. MORTALITÉ DUE AUX LIGNES ÉLECTRIQUES : UN PROBLÈME MONDIAL

De nombreux travaux scientifiques développés depuis la seconde moitié du siècle dernier dans différentes parties du monde ont montré que les accidents d'oiseaux avec des lignes électriques étaient l'une des causes les plus importantes de mortalité non naturelle pour de nombreuses espèces, constituant dans certains cas la principale raison de la baisse de leurs populations et le problème le plus important pour leur conservation (voir les révisions APLIC, 2006 ; Lehman, 2007 ; Prinsen et al., 2011a ; APLIC, 2012 ; Ferrer, 2012 ; Eccleston & Harness, 2018).

Les victimes des lignes électriques sont aussi bien de jeunes oiseaux que des adultes, entraînant des modifications de la répartition géographique au niveau local et devenant l'un des principaux facteurs de déclin des populations et des sous-populations de nombreuses espèces confrontées à des problèmes de conservation. Cela pourrait même modifier le schéma des déplacements saisonniers des espèces touchées, comme cela a été souligné pour le cas de la grande outarde (*Otis tarda*) en Espagne (Palacín et al., 2017).

L'électrocution est le principal facteur de mortalité non naturelle de certains grands aigles, ayant placé des sous-populations d'aigles de Bonelli (Hernández-Matías et al., 2015) et d'aigles ibériques (*Aquila adalberti*) au seuil de la disparition (López-López et al., 2011) (Photo 3-13). Dixon et al. (2017) et Harness et al. (2008) ont observé en Mongolie des taux d'électrocution élevés chez les populations de faucons sacres (*Falco cherrug*), ce qui pourrait compromettre leur viabilité future (Photo 3-14).

Le problème est d'une ampleur considérable, comme en témoignent les données issues de diverses études et les estimations de la mortalité qui en découlent. Ainsi, aux États-Unis, on estime qu'entre 12 et 64 millions d'oiseaux meurent chaque année des suites d'accidents avec des lignes électriques, entre 8 et 57 millions par collision et entre 900 000 et 11,6 millions par électrocution (Loss et al., 2014).

Photo 3-13.

L'électrocution est le principal facteur de mortalité non naturelle d'espèces telles que l'aigle royal (*Aquila chrysaetos*). © Íñigo Fajardo.

En Europe, les estimations globales font état de plus de 30 000 oiseaux par an en Hongrie (Demeter, 2014), de 11 000 à 33 000 oiseaux par an en Espagne, uniquement par électrocution (Tragsatec, 2004), de 10 000 à 100 000 par an en Serbie (Prinsen et al., 2011), plus d'un million en France (Faure, 1988), entre 750 000 et 1 000 000 aux Pays-Bas uniquement par collision (Renssen, 1975) et environ 10 millions par an en Russie (Matsyna & Matsyna, 2011), pour ne donner que quelques exemples.

Selon les estimations, entre 11 000 et 33 000 oiseaux meurent chaque année en Espagne par électrocution avec des lignes électriques.

Dans le cas du continent africain, il n'existe pas d'estimation de la mortalité globale par pays, mais les données, bien que sommaires par rapport à d'autres parties du monde, suffisent à montrer que le problème apparaît là où ce type d'infrastructure existe.

Au Soudan, une étude (Angelov et al., 2013) a estimé qu'environ 5 000 vautours percnoptères pourraient avoir péri sur une ligne près de la mer Rouge au cours d'une période de 50 ans, ce qui serait la cause fondamentale du déclin de cette espèce au Moyen-Orient et en Europe de l'Est, zones d'origine des oiseaux migrateurs (Photo 3-15).

Photo 3-14. En Mongolie, des taux élevés de mortalité chez le faucon sacre (*Falco cherrug*) ont été enregistrés en raison d'électrocutions qui pourraient affecter de manière significative leurs populations. © Andrew Dixon.

Photo 3-15. Les populations du vautour percnoptère (*Neophron percnopterus*) au Moyen-Orient et en l'Europe de l'Est ont beaucoup souffert en raison des électrocutions subies dans leurs zones d'hivernage d'Afrique de l'Est. © Íñigo Fajardo.

En Ouganda, une ligne électrique située à proximité d'une décharge de déchets urbains fréquentée par plusieurs espèces d'oiseaux a causé la mort d'au moins 23 marabouts (*Leptoptilos crumeniferus*) en un an (Kibuule & Pomeroy, 2015).

En Arabie saoudite, un suivi des électrocutions et des collisions sur trois lignes électriques dans le sud-ouest du pays pendant quatre ans a enregistré 532 cadavres de 21 espèces différentes (Shobrak, 2012).

En Afrique du Sud, entre 1996 et 2011, la mort par électrocution de 1504 oiseaux et la collision de 2294, avec des dizaines d'espèces touchées ont été enregistrées (Eskom-EWT, 2011). Dans ce pays, l'électrocution est le principal problème pour la conservation d'espèces menacées telles que le vautour du Cap (*Gyps coprotheres*), tandis que la collision touche d'autres espèces telles que l'outarde de Ludwig (*Neotis ludwigii*) (Jenkins et al., 2010 ; Jenkins et al., 2011).

*La mort de millions d'oiseaux
chaque année en raison des lignes
électriques représente en soi
un problème qui doit être réglé.*

En tout cas, il convient de souligner que ces chiffres élevés de mortalité des oiseaux ne doivent pas nécessairement représenter un problème de conservation influant négativement et généralement sur leurs populations. Certaines espèces subissent une mortalité importante due aux lignes électriques et leurs populations augmentent. Dans d'autres cas, la démonstration de l'impact impliquerait de mener des études démographiques à long terme difficiles à réaliser et/ou financer. Cela ne signifie pas que nous pouvons être rassurés ou que nous ne devrions pas trop nous inquiéter ; la mort de millions d'oiseaux chaque année en raison des lignes électriques représente en soi un problème qui doit sans aucun doute être réglé.

3.6. LE PROBLÈME EN AFRIQUE DU NORD

En Afrique du Nord, les données sont également sommaires et très fragmentées. Pour le Maroc, il est fait référence aux effets causés par les collisions. Pour les seules populations africaines de grandes outardes qui résident dans ce pays, la mortalité des adultes due à cette cause représente leur principale menace (Alonso et al., 2015) et, conformément à la Stratégie et au Plan d'action pour la conservation de la grande outarde au Maroc (UICN et HCEFLCD, 2016), la réduction de tels effets au minimum est vitale pour assurer la viabilité des populations nord-africaines.

Le cas récent le mieux documenté, également au Maroc, est celui qui est apparu clairement après l'expédition de terrain, évoquée précédemment et promue par l'UICN-Med et le gouvernement régional de l'Andalousie en 2016 dans le sud-ouest du pays, dans la région de Guelmim-Oued Noun, entre les villes de Guelmim et Tan-Tan (leurs résultats et conclusions figurent dans le rapport susmentionné de Godino et al., 2016). 70 oiseaux électrocutés, particulièrement des jeunes oiseaux, appartenant à 7 espèces différentes ont été retrouvés après l'inspection de 403 pylônes : 4 cigognes blanches, 4 aigles ibériques, 5 aigles royaux (*Aquila chrysaetos*), 40 aigles de Bonelli, 12 buses féroces (*Buteo rufinus*), 4 faucons laniers (*Falco biarmicus*) et 1 Grand-duc du désert (*Bubo ascalaphus*).

Dans cette étude, il a été constaté que la concentration d'une mortalité aussi élevée était associée à une explosion démographique de rongeurs, à la suite d'une période de précipitations exceptionnelle, laquelle avait entraîné une prolifération extraordinaire de pâturages (Ramirez et al., 2016 ; Barros et al., 2018). L'abondance de nourriture facile a attiré un grand nombre d'oiseaux de proie qui, en raison de l'absence d'arbres comme perchoirs naturels dans un paysage subdésertique, utilisaient les supports de lignes électriques, souvent à configuration dangereuse, pour chasser et se reposer (Photo 3 -16).

Photo 3-16. Au Maroc, une expédition de terrain promue par l'UICN-Med et la Junta de Andalucía en 2016 dans le sud-ouest du pays, dans la région de Guelmim-Oued Noun, a découvert une source importante d'électrocutions associée à une explosion démographique de rongeurs. © Daniel Burón.

La zone prospectée était une zone de dispersion et d'installation provisoire de populations non adultes de grands et de petits rapaces. Selon les observations, cette zone serait d'importance internationale compte tenu de la présence continue d'une espèce figurant sur la Liste rouge de l'UICN™ comme Vulnérable, l'aigle ibérique (BirdLife International, 2017a), et de l'aigle de Bonelli, espèce en déclin au niveau mondial (BirdLife International, 2016a). L'aigle ibérique a disparu du Maroc au siècle dernier (Thévenot et al., 2003) en tant que reproducteur. Toutefois, grâce au rétablissement des populations en Espagne, sa présence semble permanente depuis le début du XXI^e siècle (Bergier et al., 2011 ; Godino et al., 2016 ; Morandini et al., 2016 ; Garrido et al., 2018a). Quant à l'aigle de Bonelli, hormis sa population reproductrice, le passage de spécimens ibériques en Afrique du Nord a été observé lors de leurs déplacements de répartition (Iglesias & Alvarez, 2016).

Les niveaux de mortalité par électrocution enregistrés dans cette zone atteignent des valeurs similaires à celles qui ont entraîné le déclin des populations reproductrices de grands rapaces dans d'autres régions du monde, de sorte qu'ils pourraient affecter la dynamique de population de ces espèces.

Cette étude est la première indication sérieuse que l'électrocution sur les lignes électriques représente une menace sérieuse pour la conservation des populations de rapaces en Afrique du Nord, avec des implications probables pour les populations ibériques, étant donné la présence constatée de spécimens ibériques non reproducteurs sur le territoire nord-africain.

4

Collisions

4.1. CAUSES DU RISQUE DE COLLISION

Photo 4-1. Bien que les oiseaux détectent généralement les lignes électriques, dans des conditions de faible visibilité, tout type de ligne peut être dangereux pour eux. Aigle de Bonelli (*Aquila fasciata*) tué à la suite d'une collision. © Justo Martín.

En termes d'interactions négatives entre les oiseaux et les lignes électriques, les collisions sont les plus répandues, car tout câble aérien de toute ligne électrique peut constituer un obstacle au vol des oiseaux. Dans de bonnes conditions de visibilité, les oiseaux détectent les câbles longtemps à l'avance et les évitent, généralement en les survolant. Mais en cas de mauvaise visibilité (brouillard, pluie, aube, crépuscule, nuit), ils ne détectent pas l'obstacle ou seulement quand leur manœuvrabilité les empêche de l'éviter (Photo 4-1). D'autres facteurs, tels que la capacité de manœuvrer en vol et les

comportements grégaires, seuls ou conjugués à d'autres facteurs (réactions de fuite, vols de chasse, etc.), impliquent que certains groupes d'oiseaux sont plus sensibles que d'autres aux collisions (Ferrer, 2012).

Comme on le verra plus tard, la plupart des collisions se produisent sur les lignes à haute tension dotées d'un câble de garde. Dans ces conditions de mauvaise visibilité, les conducteurs sont détectés lorsque les oiseaux sont à une courte distance de la ligne. En essayant d'éviter le choc en passant au-dessus, ils heurtent le câble de garde, beaucoup moins épais et donc moins visible, produisant la collision. Jusqu'à plus de 80 % des collisions ont pour protagoniste le câble de garde, dont la visibilité inférieure doit aussi être liée au fait que sa position supérieure favorise encore plus l'interférence avec les trajectoires de vol en comparaison avec les conducteurs situés au-dessous (Bernardino et al., 2018).

La plupart des collisions se produisent sur les lignes à haute tension dotées d'un câble de garde.

4.2. FACTEURS DÉTERMINANT LE RISQUE DE COLLISION

Le risque de collision d'un oiseau avec l'un des composants d'une ligne électrique dépend de trois types de facteurs (voir révisions Prinsen et al., 2011a ; APLIC, 2012 ; Ferrer, 2012 ; EirGrid, 2013 ; Bernardino et al., 2018 ; Eccleston & Harness, 2018) :

- ➔ Les caractéristiques de la ligne électrique
- ➔ Le type d'oiseau
- ➔ Les facteurs environnementaux

Caractéristiques de la ligne électrique. Plusieurs facteurs inhérents à la ligne électrique influent sur le risque de collision, la plupart d'entre eux étant liés à la tension de la ligne, qui en détermine la structure et la configuration. Ces caractéristiques sont les suivantes :

- ➔ *Nombre de plans verticaux de disposition des câbles.* Logiquement, il est supposé que le risque de collision devrait dépendre du nombre de niveaux verticaux de conducteurs et de la distance qui les sépare ; les structures complexes, avec des phases sur plusieurs plans, compliquent l'esquive de la ligne électrique pour les oiseaux (Photo 4-2). Certaines études appuient cette hypothèse, bien que son importance doit être davantage mise en relation avec d'autres facteurs (Bernardino et al., 2018).

Photo 4-2.

Dans les zones de forte densité de lignes électriques, avec de nombreux plans de câbles verticaux, le risque de collision est élevé.
© Justo Martin.

- ➔ *Amplitude des portées.* La distance entre les pylônes est un élément qui semble influencer le risque de collision, car les accidents sont moins nombreux à proximité des pylônes que dans la zone médiane de la portée (Bernardino et al., 2018).
- ➔ *Hauteur de la ligne.* Il est généralement admis que les structures les plus hautes présentent un risque de collision plus élevé, car les oiseaux, en présence de l'obs-

tacle, ont tendance à prendre de la hauteur pour passer au-dessus de celui-ci. En ce qui concerne ce facteur, on observe une plus grande incidence de collisions sur les lignes de transport que sur les lignes de distribution, bien que son effet soit étroitement lié à d'autres caractéristiques de la ligne, telles que le nombre de plans verticaux de conducteurs, la séparation entre les pylônes ou le diamètre des câbles. D'autres facteurs tels que le comportement en vol des différentes espèces, le moment de leur cycle de vie ou l'habitat traversé par la ligne sont également à prendre en compte.

- ➔ *Diamètre des conducteurs et du câble de garde.* Cela semble être l'un des principaux facteurs qui déterminent le risque de collision. Le câble de garde installé sur les lignes de transmission au-dessus des conducteurs est beaucoup plus mince que ceux-ci (presque la moitié de son épaisseur) et donc moins visible (Photo 4-3). Il semble que la plupart des oiseaux, lorsqu'ils s'approchent de la ligne électrique dans des conditions de faible visibilité, détectent les conducteurs lorsqu'ils se trouvent déjà à une courte distance et relèvent le vol pour les éviter, entrant en collision avec le câble de garde, beaucoup moins visible. Dans certaines études spécifiques, jusqu'à 80 % des collisions se sont produites en raison de cette circonstance (Bernardino et al., 2018).

Photo 4-3. La plupart des collisions se produisent sur des lignes avec un câble de garde, beaucoup moins visibles que les conducteurs. © Justo Martín.

Type d'oiseau. Les caractéristiques des différentes espèces d'oiseaux, telles que leur physiologie, leur morphologie et leur écologie, sont importantes pour comprendre comment elles peuvent être plus ou moins sujettes aux collisions. Le facteur le plus important peut être la nature grégaire de certaines espèces et leur tendance à se rassembler en grands groupes. Un autre facteur important est la manœuvrabilité, plus ou moins élevée, de l'oiseau en vol, ainsi que l'âge et le sexe, en raison du degré d'expérience, et les différences de comportement et de taille. Les oiseaux aquatiques en général et les grands oiseaux des steppes sont particulièrement sensibles à ce problème (Photo 4-4).

Photo 4-4. Les oiseaux grands et lourds, ayant une manœuvrabilité réduite, tels que les grandes outardes (*Otis tarda*), sont particulièrement sensibles aux collisions. © Justo Martín.

Facteurs environnementaux. Les lignes électriques traversent toutes sortes d'habitats et de paysages. Cette circonstance, associée à d'autres facteurs tels que la météorologie et même l'incidence directe de l'être humain, influent sur le risque de collision de différentes manières.

➔ **Relief.** Les oiseaux lors de leurs migrations ont tendance à se déplacer en fonction d'une série de grands éléments géographiques (chaînes de montagnes, le trait de côte) qui aident à définir leurs voies de migration. Dans ces itinéraires, les accidents topographiques tels que les crêtes et les cols de montagne, les vallées de rivières et les dépressions géographiques agissent en concentrant les itinéraires de vol. Il est logique de penser que les lignes électriques qui traversent ces points présentent un risque de collision plus élevé si les oiseaux se déplacent dans ces zones à basse altitude. Cependant, les études ne sont pas concluantes sur cet effet (Luzenski et al., 2016) et celui-ci chevauche probablement d'autres effets, il est donc difficile d'établir une généralisation. Ce qui a été observé dans certaines zones, c'est qu'au niveau local, le relief peut favoriser la formation de courants d'air utilisés par les oiseaux dans leurs mouvements migratoires. Ces courants peuvent être si forts qu'ils « poussent » littéralement les oiseaux vers le haut (Photo 4-5), en occasionnant des collisions avec des lignes disposées à la fois transversalement et longitudinalement (Babiloni, comm. pers.).

Photo 4-5. Au niveau local, des courants ascendants peuvent se former, poussant les oiseaux qui se retrouvent en situation de risque de collision avec les lignes électriques existantes. © Daniel Burón.

➔ *Caractéristiques de l'habitat.* La végétation joue un rôle important dans l'exposition des oiseaux aux lignes électriques. En général, dans les espaces dégagés, les oiseaux ont tendance à voler lors de leurs déplacements habituels à une altitude inférieure à celle des zones forestières, de sorte que le risque de collision peut être plus élevé pour certaines espèces. Quand les lignes électriques dépassent la hauteur du couvert forestier dans les zones boisées, des collisions peuvent survenir lorsque les déplacements se produisent juste au-dessus des arbres (Photo 4-6) ; c'est aussi le cas si les conducteurs passent à un niveau inférieur à celui des branches les plus basses des arbres, dans l'espace dans lequel les oiseaux forestiers se déplacent (Figure 4-1 et Photo 4-6). Par ailleurs, lorsque les lignes sont situées dans des zones telles que des zones humides, des zones côtières, des steppes ou tout autre type de zone favorable à la concentration d'oiseaux résidents ou hivernants, les collisions ont tendance à être nombreuses. Cela se produit également à une moindre échelle lorsqu'ils traversent des rivières (utilisées par de nombreux oiseaux en tant que couloirs de vol) ou à proximité de vastes décharges de déchets urbains, utilisées par de nombreuses espèces comme points d'alimentation.

Photo 4-6.

Dans les zones boisées, le risque de collision est accru lorsque les conducteurs passent juste au-dessus des faites des arbres.

© Daniel Burón.

Photo 4-7.

Au crépuscule et à l'aube, les collisions sont nombreuses, car les lignes sont moins visibles et d'importants mouvements d'oiseaux ont lieu. © Justo Martín.

En cas de mauvaise visibilité (brouillard, pluie, aube, crépuscule, nuit), les oiseaux ne détectent pas l'obstacle ou seulement quand leur manœuvrabilité les empêche de l'éviter.

- ➔ *Météorologie et conditions de visibilité.* Les conditions météorologiques telles que pluie, neige, brouillard épais ou couverture nuageuse très basse obligent les oiseaux à voler plus près du sol, tout en rendant les lignes électriques moins visibles. C'est dans ces conditions que sont enregistrés les épisodes de collisions les plus graves. En général, toutes les circonstances impliquant une visibilité réduite déterminent un risque de collision plus élevé, notamment le lever et le coucher du soleil, ainsi que la période nocturne (Photo 4-7). De plus, les vents forts, en particulier les vents arrière ou les vents de travers, qui rendent difficile la manœuvrabilité des oiseaux, peuvent augmenter le risque.
- ➔ *Perturbations causées par l'être humain.* De nombreuses activités humaines sont perturbantes pour les oiseaux, provoquant des vols de fuite. Si ces perturbations se produisent dans des zones qu'ils fréquentent ou ils se concentrent et qu'il existe des lignes électriques à proximité, ces changements de direction peuvent provoquer des collisions. Bien qu'il soit également vrai que lorsque les perturbations sont permanentes, par exemple la présence d'une route, les oiseaux évitent directement ces zones, de sorte que le risque de collision contre les lignes électriques est faible.

En conclusion, le principal facteur qui détermine l'existence de collisions est la présence de certains types d'oiseaux dont la biologie et le comportement les rendent plus susceptibles de subir ce type d'accident. Les caractéristiques techniques de la ligne ont une importance bien moindre, contrairement à ce qui se passe dans les électrocutions.

4.3. LIGNES ÉLECTRIQUES À HAUT RISQUE DE COLLISION

Les collisions n'ont pas lieu par hasard ni de façon régulière le long d'une ligne électrique. En revanche, elles se concentrent sur certaines sections en raison de divers facteurs pouvant influencer sur leur visibilité et leur détectabilité, là où certaines espèces sont plus abondantes, constituant de larges groupes lors de la saison de reproduction et/ou d'hivernage, dans leurs zones d'alimentation ou de reproduction, comme dans le cas des oiseaux aquatiques, des cigognes, des outardes, des grues et de certains passériformes (Photo 4-8).

Il est difficile d'établir des limites, mais en appliquant le principe de précaution maximale les situations de proximité à des points de concentration d'oiseaux, de plates-formes de nidification, de colonies de reproduction, de dortoirs, etc. doivent être considérées comme des situations à haut risque (Photo 4-9) (voir Annexe II pour une description plus détaillée des situations).

Photo 4-8. Les collisions sont concentrées à certains endroits en raison de divers facteurs qui influent sur leur visibilité et leur détectabilité. Flamant rose (*Phoenicopterus roseus*) mort sur une ligne électrique perpendiculaire à une trajectoire de vol habituelle de ces oiseaux entre différentes zones humides. © Justo Martín.

Photo 4-9. Toutes les lignes électriques qui s'étendent à proximité de points de concentration d'oiseaux impliquent un risque élevé de collision. Concentration des cigognes blanches (*Ciconia ciconia*) dans un champ de riz. © Daniel Burón.

Même si cela n'est pas prouvé, un aspect important pourrait être l'orientation des lignes électriques par rapport au lever et au coucher du soleil ; celles qui s'étendent dans une direction nord-sud pourraient présenter un potentiel de risque plus important que celles allant dans une direction est-ouest, en fonction des trajectoires de vol. Lorsque les oiseaux volent vers le soleil à l'aube ou au crépuscule, les lignes perpendiculaires à leur progression pourraient être moins visibles pour les oiseaux en raison de leur propre position devant eux pour l'effet de l'éblouissement du soleil.

La saisonnalité doit également être prise en compte. Les périodes de l'année où les concentrations de ces groupes d'oiseaux sensibles sont plus élevées et dans lesquelles les conditions de visibilité sont plus souvent défavorables (hiver, saison des pluies ou brouillard) présenteront une incidence plus élevée de ce problème.

4.4. MESURES ANTI-COLLISION (PRÉVENTION, ATTÉNUATION, CORRECTION)

Il existe différents types de mesures pour éviter les collisions et elles peuvent être classées, en fonction du moment de leur application, en mesures « de prévention et d'atténuation » ou en mesures « correctives ». Les premières évitent le problème avant qu'il ne survienne, tandis que les secondes le résolvent totalement ou partiellement, de manière permanente ou provisoire en fonction de la durabilité de la solution adoptée. La plupart des mesures préventives peuvent également être correctives ou d'atténuation si elles sont appliquées *a posteriori* et impliquer ou non des modifications structurelles de la ligne électrique (voir révisions Prinsen et al., 2011b ; APLIC, 2012 ; Ferrer, 2012 ; Bernardino et al., 2018 ; UE, 2018).

Planification du tracé. La meilleure mesure préventive consiste à éviter l'existence de lignes électriques dans des zones considérées à haut risque (Figure 4-1). Ceci est possible avec une bonne planification au moment de la conception des tracés empruntés par les futures lignes électriques, y compris dans les études d'impact environnemental, l'évaluation des différents tracés et le choix de ceux qui sont techniquement et économiquement plus viables, et en même temps, plus respectueux de l'environnement (voir chapitre 9).

Figure 4-1. La planification du tracé pour éviter les situations à risque est essentielle pour minimiser le risque de collision. En haut : dans les zones boisées, le risque est moindre si les câbles ne dépassent pas le faite des arbres. À gauche : le tracé doit prendre en compte les itinéraires de vol et la topographie locale pour éviter les situations à risque. À droite : il est pratique de joindre les tracés de lignes électriques voisines pour créer un seul obstacle et le rendre plus visible. Source : modifié d'APLIC, 2012.

Enfouissement de lignes électriques. C'est la seule mesure totalement efficace et définitive contre les collisions et elle est valable pour les lignes à haute et moyenne tension. Elle peut être utilisée comme mesure préventive ou corrective définitive sur les sites particulièrement problématiques où d'autres mesures se sont révélées inefficaces et où la survie des espèces en voie de disparition est remise en cause. Son efficacité une fois appliquée est rapide ; dans une région située entre l'est de l'Autriche et l'ouest de la Hongrie, cette mesure a permis de réduire la mortalité de la grande outarde due aux collisions et a montré des résultats significatifs en moins de cinq ans (Raab et al., 2012). Outre l'impact environnemental éventuel que suppose son installation (incidence au niveau du sol, de la végétation, etc.) et les problèmes techniques pour l'entretien de la ligne, le principal inconvénient de cette mesure est son coût, 4 à 10 fois plus élevé que dans le cas des lignes aériennes. Si la ligne n'est pas une nouvelle installation, mais implique également le démantèlement d'une installation existante, le coût montera en flèche. En ce qui concerne la maintenance, la localisation et la réparation des pannes sont également plus importantes.

L'enfouissement est une mesure définitive pour des sites où d'autres mesures se sont révélées inefficaces et où la survie des espèces menacées est mise en cause.

Gestion de l'habitat. Étant donné que le risque de collision est très directement lié au transit de certaines espèces d'oiseaux, sa réduction pourrait constituer une bonne mesure, à la fois de prévention et d'atténuation *a posteriori*, par exemple, en créant de nouvelles zones de nourriture ou de repos pour éviter ces déplacements. Cependant, mis à part le coût, il n'est pas facile de modifier ces routines de vol et cette mesure devrait peut-être être réservée à des situations et à des espèces très spécifiques, et toujours en y associant la signalisation des lignes à problèmes.

Utilisation de conducteurs isolés et torsadés. Il s'agit d'une mesure permanente ; consiste à utiliser des conducteurs isolés et torsadés, de sorte que le risque de collision est très faible par la seule présence d'un seul élément et en plus très visible. Son coût est élevé pour remplacer une ligne existante ; s'il s'agit d'une nouvelle installation, cela implique aussi un investissement supérieur à celui d'un câble nu. De plus, il y a une limitation technique car son utilisation n'est pas possible pour des tensions supérieures à 30 kV (Photo 4-10).

Modification de la configuration des lignes. Compte tenu des différents facteurs structurels affectant le risque de collision (présence de câble de garde, de conducteurs sur des plans différents, une plus grande dangerosité sur la partie centrale des portées), certaines mesures structurelles pourraient théoriquement être adoptées et mises en œuvre, ce qui contribuerait à réduire le risque de collision. Cependant, la plupart de ces mesures ne sont généralement pas réalisables, d'un point de vue technique et économique, et dans les rares cas où certaines d'entre elles ont été appliquées, leur efficacité n'a pas été démontrée.

Photo 4-10. Le gainage et la torsade des conducteurs sont une mesure efficace contre les collisions, réduisant le nombre de chocs possibles et rendant les conducteurs plus visibles. Ligne de distribution avec câble torsadé.
© Justo Martín.

Installation de câbles de garde de plus grande section. L'installation de câbles de garde de type OPGW (avec un noyau de fibre optique à l'intérieur) d'au moins 20 mm de section contribuerait à améliorer sa visualisation par rapport aux conducteurs. Cette mesure a été proposée, mais il n'y a pas d'études à propos de son éventuelle efficacité ; cela pourrait être une ligne de recherche intéressant pour l'avenir.

Signalisation des lignes. La mise en place de différents types de balises est la mesure d'atténuation la plus utilisée pour réduire les collisions d'oiseaux avec des lignes électriques. Ces dispositifs sont appelés de manière générique « sauve-oiseaux » et depuis leur installation dans les années 1960 dans certains pays européens, différents types et matériaux ont été testés : spirales en PVC de différentes tailles, bandes en plastique, bandes en néoprène, plaquettes suspendues en plastique réflecteur fixe et pivotant, sphères métalliques bicolores photoluminescentes ("avisphères"), dispositifs lumineux alimentés par le conducteur lui-même, etc. (Figure 4-2). Ces balises sont installées sur les sections où des collisions se sont produites et préventivement dans les zones où les sections sont considérées comme sensibles ou à haut risque (voir section précédente).

Figure 4-2. Types de balises sauve-oiseaux. A : bandes de néoprène. B : spirale « queue de cochon ». C : types de spirales (ruban à mesurer et balise pour comparer la taille). D : balise réfléchissante tournante à trois faces. E : balise réfléchissante fixe à double face. F : balise réfléchissante tournante à double face. © Justo Martín.

4.5. EFFICACITÉ DES MESURES ANTI-COLLISION

Il existe des mesures, telles que l'enfouissement, qui éliminent le problème ; d'autres ont une efficacité plus difficile à évaluer. Parmi les plus répandues, la signalisation a démontré qu'elle réduisait la collision, bien que le degré d'efficacité des différents types ne soit pas très clair. La proportion de cette réduction est très variable, allant de moins de 10 % à plus de 90 %, mais elle dépasse généralement 50 % (Barrientos et al., 2011). Les études les plus récentes semblent indiquer que les dispositifs comportant des éléments mobiles et réflecteurs sont les plus efficaces (Bernardino et al., 2018) (Photo 4-11).

Outre le mouvement, les surfaces réfléchissantes les rendent très visibles dans des conditions de faible luminosité, comme à l'aube et au crépuscule, lorsque la visibilité des conducteurs ou d'autres types de balises est beaucoup plus faible (Martin, 2011). Quoi qu'il en soit, pour les espèces nocturnes ou celles qui migrent la nuit, la signalisation, sauf si elle est lumineuse, n'est pas efficace (Drewitt & Langston, 2008). Il existe certaines expériences positives concernant la signalisation lumineuse nocturne, mais nous devons garder à l'esprit que les effets négatifs d'autres types de signaux lumineux nocturnes sont connus chez les oiseaux, tels que la désorientation pendant les migrations et l'attraction vers la source lumineuse, aspects qui n'ont pas été étudiés pour ces dispositifs (APLIC, 2012).

Photo 4-11.

Les balises avec des éléments mobiles et réfléchissants semblent être les plus efficaces. De plus, leur installation est très simple et ne nécessite pas de coupure de courant.
© Justo Martín.

En ce qui concerne la pose des balises sur la ligne électrique, les signaux sont placés avec un écart de 5 à 10 m (Jenkins et al., 2010).

Sur les lignes électriques avec un câble de garde, les balises sont posées sur celui-ci ; si la ligne électrique en a deux disposés en parallèle, les balises sont posées en alternance sur chacun d'entre eux de sorte que l'effet visuel maintienne la distance (Photo 4-12).

Sur les lignes de distribution où il n'y a pas de câble de garde, les dispositifs sont placés sur le conducteur supérieur, ou encore sur les deux supérieurs en alternant (Photo 4-13). Le même schéma est suivi dans le cas de lignes électriques à double circuit ; pour un circuit triple ou quadruple, le balisage des deux conducteurs externes est suffisant (Cerezo et al., 2010 ; APLIC, 2012).

Photo 4-12.

Dans les lignes à haute tension, les balises sont placées sur les câbles de garde, environ tous les 5 m en cas de câble unique, ou en alternant tous les 10 m s'il y a deux câbles parallèles.
© Justo Martín.

Photo 4-13. Dans les lignes de distribution, les balises sont placées sur tous les conducteurs ou au moins sur les deux supérieurs, en alternance, pour que l'effet visuel corresponde à un signal tous les 5 m. © Justo Martín.

La pose de balises doit être considérée comme une mesure provisoire, car son efficacité dans le temps peut être réduite par une perte de coloration initiale, des cassures, des décollements, etc., et des inspections périodiques sont donc nécessaires, y compris le remplacement d'éléments en mauvais état (Photo 4-14).

Photo 4-14. Bien que la signalisation réduise la mortalité, elle n'est pas efficace à 100 %. Aile d'oiseau accrochée lors d'une collision avec un conducteur équipé de système anti-collision. © Íñigo Fajardo.

Le tableau suivant (Tableau 4.1) présente un résumé des principales mesures préventives et correctives contre les collisions, ainsi que les différents facteurs à prendre en compte au moment du choix :

Tableau 4.1. Caractéristiques des principales mesures préventives et correctives contre les collisions.

Mesure	Type	Caractère	Temporalité	Coût	Efficacité
Planification du tracé	Non structurel	Préventif	Permanente	Moyen-faible	Moyenne-élevée
Gestion de l'habitat	Non structurel	Préventif/atténuation	Permanente	Élevé-Très élevé	Moyenne-Élevée
Enfouissement	Structurel	Préventif/atténuation	Permanente	Très élevé	Totale
Câble torsadé	Structurel	Préventif/atténuation	Permanente	Élevé-Très élevé	Élevée
Configuration de la ligne	Structurel	Préventif/atténuation	Permanente	Élevé-Très élevé	Faible
Câble de garde plus épais	Structurel	Préventif/atténuation	Permanente	Élevé	Élevée
Signalisation	Non structurel	Préventif/atténuation	Non permanente	Moyen-Faible	Élevée

5

Électrocutions

5.1. CAUSES DU RISQUE D'ÉLECTROCUTION

Figure 5-1. L'électrocution se produit généralement lorsque le corps d'un oiseau touche en même temps les deux conducteurs (A) ou un conducteur et une pièce métallique (B, C, D, E et F). Plus rares sont les électrocutions par défécation (G) ou par la formation d'un arc électrique (H).

L'électrocution d'un oiseau sur une ligne électrique se produit normalement **lorsque son corps touche deux conducteurs en même temps ou un conducteur et une partie métallique du pylône**, soit sur la propre traverse si celle-ci est métallique (Figure 5-1), ou sur la mise à la terre dans les cas où le support est en béton ou en bois. Dans les deux cas (conducteur-conducteur et conducteur-métal), il existe une différence de potentiel entre les deux points dans le premier cas en raison du caractère alterne et triphasé du courant, dans le deuxième cas du fait que la partie métallique n'est pas sous tension, de sorte que le courant passe d'un point à un autre à travers le corps de l'oiseau (APLIC, 2006). Comme il s'agit d'un mauvais conducteur, il y a une génération de chaleur due au passage de l'électricité, qui provoque des brûlures dans les tissus superficiels et les organes internes (Schulze et al., 2016).

Photo 5-1. Lorsqu'un oiseau se pose sur un câble, il n'y a aucun risque d'électrocution ; mais s'il se pose sur une partie métallique et qu'il y a un conducteur à proximité, le risque est maximal. À gauche, choucas des tours (*Corvus monedula*) ; à droite, milan noir (*Milvus migrans*). © Daniel Burón.

Lorsqu'un animal est posé sur un seul câble, il n'y a pas de différence de potentiel entre les deux points de contact, de sorte que, comme le corps est un bien moins bon conducteur d'électricité que le câble, le courant continue son chemin sans se dévier. Lorsque l'oiseau touche deux câbles, il existe une différence de potentiel due au caractère alternatif et triphasé du courant (Photo 5-1).

Dans des conditions normales (plumage sec), les plumes sont de très mauvais conducteurs électriques, donc l'électrocution se produit lorsque ce double contact se fait à travers des parties nues du tissu vivant (meilleurs conducteurs), telles que les pattes ou

le bec ou avec une couverture de plumes moins dense, comme la tête ou la peau de la partie inférieure des ailes (Figure 5-2). Dans ce dernier cas, le point le plus vulnérable se situe au niveau des os métacarpiens (le « poignet »). Ainsi, la plupart des électrocutions ont lieu par contact simultané des deux ailes avec chaque phase ou d'une aile avec une phase et des pattes (une ou les deux) avec la partie métallique de la traverse, lorsque l'oiseau se pose ou prend son envol ; également lorsque le contact a lieu avec la tête ou le bec et les pattes (Photo 5-2). **Le risque augmente si le plumage de l'oiseau est humide**, car dans ces conditions, l'électrocution peut survenir pratiquement n'importe où sur le corps, en raison de la bonne conductivité de l'eau (APLIC, 2006).

Figure 5-2.

Extension de la peau (tissu vivant) dans la partie inférieure des ailes ; le reste est constitué de tissus morts (plumes).

© Justo Martín.

Photo 5-2.

L'électrocution se produit généralement par contact avec des zones de peau nue ou de plumage clairsemé. Zone de sortie de la décharge électrique dans la partie inférieure de l'aile d'un circaète Jean-le-Blanc (*Circaetus gallicus*)

© Justo Martín.

Dans d'autres cas, l'électrocution est le résultat d'un contact indirect, comme parfois lorsqu'un rapace emporte sa proie sur le pylône pour la manger. La proie peut rester suspendue et toucher un conducteur, en faisant passer l'électricité à l'oiseau en contact avec une partie métallique. Cela a été documenté pour des espèces telles que le grand-duc, le milan noir ou le circaète Jean-le-Blanc européen. Dans le dernier cas, ceci est favorisé par le type de proie qu'ils préfèrent, les serpents (Ferrer, 2012).

La plupart des électrocutions ont lieu par contact simultané des deux ailes avec chaque conducteur, ou d'une aile avec un conducteur et des pattes avec la partie métallique de la traverse, lorsque l'oiseau se pose ou prend son envol.

L'électrocution peut survenir à la suite **d'autres causes moins fréquentes**, mais qui font également de nombreuses victimes (APLIC, 2006 ; Garrido & Martín, 2015 ; Demerdzhiev, 2014) :

- ➔ **Électrocution par formation d'un arc électrique.** L'air étant un mauvais conducteur d'électricité, il peut être considéré comme un bon isolant. Cependant, lorsque la différence de potentiel électrique entre deux points dépasse une certaine valeur limite, il peut devenir un conducteur électrique et provoquer une décharge électrique brutale entre les deux. La distance à laquelle la décharge a lieu dépend de la tension du conducteur et des conditions atmosphériques, celle-ci étant d'autant plus grande que l'environnement est humide. Ainsi, les jours de pluie (voire pire en cas de pluie fine) ou de brouillard, dans les zones à forte humidité relative ou lorsque l'oiseau a le plumage humide, un arc électrique peut survenir entre celui-ci et le conducteur dès qu'il se pose près de lui, sans même le toucher. Dans les environnements salins (marais, à proximité de la mer), ce risque est encore plus élevé (Photo 5-3).

Photo 5-3.

L'électrocution par formation d'arc électrique est rare, bien que possible lorsque l'humidité relative est élevée ou que l'oiseau a le plumage humide. Électrocution par arc électrique d'un vautour fauve (*Gyps fulvus*). © CAGPDS/CAD.

➔ **Électrocution par « défécation malencontreuse ».** Lorsque les plus gros oiseaux défèquent, ils produisent un jet d'excréments d'une longueur considérable, à la consistance semi-liquide et riche en sels, c'est-à-dire un excellent conducteur électrique (Photo 5-4). S'ils défèquent sur un pylône, le jet sortant peut servir de ligne de liaison avec le conducteur dans une position plus basse (apparemment à une distance de sécurité) avant que l'autre extrémité ne soit complètement expulsée du cloaque de l'oiseau. L'électrocution est donc le résultat d'un hasard fatal, qui peut se produire assez fréquemment si le pylône en question est très fréquenté comme perchoir.

Photo 5-4. La défécation de grands rapaces sous la forme d'un jet prolongé est à l'origine de nombreuses électrocutions lorsque l'extrémité est en contact avec un conducteur situé sous un pylône métallique. Aigle de Bonelli (*Aquila fasciata*). © Daniel Burón.

5.2. FACTEURS DÉTERMINANT LE RISQUE D'ÉLECTROCUTION ET IDENTIFICATION DES PYLÔNES DANGEREUX

Le risque d'électrocution d'un oiseau dépend de trois types de facteurs (voir les révisions APLIC, 2006 ; Lehman et al., 2007 ; Prinsen et al., 2011a ; Ferrer, 2012 ; EirGrid, 2013 ; Eccleston & Harness, 2018) :

- ➔ La structure et la configuration du pylône
- ➔ Le type d'oiseau
- ➔ Les facteurs environnementaux

Structure et configuration du pylône. Comme l'électrocution dépend du contact simultané de l'oiseau avec deux points à potentiel différent, le risque que cela se produise sur un type de pylône dépend étroitement de sa configuration et de la structure de la traverse. En raison de la distance qui sépare les différents éléments, les lignes de distribution jusqu'à 45 kV sont les plus dangereuses (sur celles de plus haute tension et les lignes électriques de transport, leur configuration et la distance entre les conducteurs rendent cette situation très difficile). Parmi les lignes de distribution, celles qui présentent des traverses dont la disposition des éléments facilite ce contact (isolateurs dressés, ponts au-dessus, présence de transformateurs, etc.) présenteront un risque élevé. Celui-ci est d'autant plus élevé si la traverse est métallique plutôt qu'en bois ou si le poteau est également métallique et non en bois ou en béton. De même, les possibilités liées à la configuration de la traverse, permettant à un oiseau de se poser en différentes zones, jouent également une influence considérable (Figure 5-3).

Figure 5-3.
Zones de perchoir
selon les différentes
configurations de traverse :
A : en armement alterné
B : configuration horizontale
C : configuration en croix
D : configuration verticale
E : nappe-voûte
F : nappe-voûte plate

En prenant comme référence la typologie des pylônes en fonction de la configuration de leur traverse (voir chapitre 2), une classification peut être établie en fonction de leur dangerosité. Les supports des lignes électriques de transport ne sont pas pris en compte, car leur grande dimension et l'importante séparation entre les conducteurs n'entraînent généralement pas d'électrocutions. Il est vrai qu'elles en provoquent quelques-unes, soit par arc électrique, défécation ou contact simultané avec deux conducteurs, mais en plus d'être très rares, elles sont pratiquement imprévisibles et inévitables (Photo 5-5).

Photo 5-5. Sur les lignes de distribution de plus de 45 kV et les lignes de transport, la séparation entre les conducteurs et la distance qui les sépare de la traverse rendent l'électrocution très rare. Buse féroce (*Buteo rufinus*). © Iñigo Fajardo.

Il convient également de noter que toutes les configurations et mesures incluses dans la classification correspondent à des traverses et pylônes métalliques ; dans le cas de poteaux en béton ou en bois, le risque est généralement moins élevé, car ces matériaux sont de mauvais conducteurs. Nous devons également prendre en compte la nature de la traverse, qui peut être en métal ou en bois, ainsi que l'existence de câbles nus de garde, qui constituent un élément de dangerosité. Sur les traverses métalliques avec des poteaux non métalliques, les distances critiques peuvent varier par rapport à la même configuration installée sur un pylône métallique. Sur les traverses en bois, le risque n'est élevé que lorsque la distance entre les conducteurs et/ou les ponts est très faible, comme c'est le cas sur les traverses avec des isolateurs dressés ou sur des pylônes d'ancrage avec des ponts au-dessus.

Pour que le pylône soit considéré comme sûr, la valeur des distances critiques doit être suffisante pour éviter l'électrocution des plus grands oiseaux susceptibles de l'utiliser, en tenant compte de la longueur de leurs ailes et leur hauteur.

Partant de ces prémisses et prenant en compte la manière dont les électrocutions se produisent en fonction de la configuration des traverses, il convient de considérer **cinq distances critiques basiques** et leur relation avec la taille de l'oiseau pour évaluer leur dangerosité. Pour que le pylône soit considéré comme sûr, la valeur de ces distances critiques doit être suffisante pour éviter l'électrocution des plus grands oiseaux susceptibles de l'utiliser, en tenant compte de deux mesures essentielles, la longueur de leurs ailes et leur hauteur.

Comme nous l'avons vu, l'électrocution a normalement lieu par contact de deux zones de l'oiseau non couvertes de plumes (poignet, tête, pattes) ; ainsi, ces distances de sécurité critiques prendraient comme référence la mesure entre les deux poignets des ailes et la distance entre le poignet et les pattes. Dans les climats humides où la situation de plumage humide peut être très courante, il convient d'envisager de plus grandes distances, en prenant pour référence le bout de l'aile.

Photo 5-6. Pour déterminer les distances de sécurité dans la configuration des traverses, les mesures des plus grandes espèces présentes sont prises comme référence. Dans le cas de l'Afrique du Nord, il s'agit du vautour fauve (*Gyps fulvus*) et du gypaète barbu (*Gypaetus barbatus*), dont l'envergure maximale est d'environ 2,8 m. Vautours fauves atterrissant avec les ailes déployées.
© Íñigo Fajardo.

Dans le cas de l'Afrique du Nord, les deux espèces de plus grande envergure présentes sont le vautour fauve et le gypaète barbu, tous deux avec une distance maximale d'environ 2,8 m entre les ailes (Photo 5-6).

En tenant compte de ces dimensions, les **valeurs de sécurité pour ces distances critiques** sont détaillées dans le tableau suivant (Tableau 5-1) et figure (Figure 5-4) suivants.

Figure 5-4. Distances basiques critiques sur certains types de pylônes communs.

Tableau 5-1. Distances critiques basiques permettant d'évaluer la dangerosité de la configuration d'une traverse et les valeurs de sécurité tenant compte des oiseaux de plus grande envergure susceptibles d'être électrocutés.

PYLÔNES		DISTANCE CRITIQUE BASIQUE	VALEUR FIABLE
D1	TOUS	Distance entre les conducteurs. <i>Nous devons considérer l'envergure de l'oiseau.</i>	1,5 m
D2	MONTAGE EN ARMEMENT ALTERNÉ MONTAGE VERTICAL MONTAGE HORIZONTAL EN NAPPE-VOÛTE (Fixation et suspension)	Distance verticale entre le point où l'oiseau se pose et l'élément sous tension le plus proche à un niveau inférieur (conducteur ou pont d'ancrage). <i>Il faut considérer le risque par défécation et la distance entre la base des pattes et l'extrémité d'une des ailes déployées vers le bas.</i>	1 m
D3	MONTAGE VERTICAL	Distance verticale entre le point où l'oiseau se pose et l'élément sous tension le plus proche à un niveau supérieur (conducteur ou pont d'ancrage). <i>Il faut considérer la distance entre la base des pattes et l'extrémité d'une des ailes déployées vers le haut.</i>	1,5 m
D4	MONTAGE HORIZONTAL	Distance verticale entre la base de la traverse et l'élément sous tension le plus proche à un niveau supérieur. <i>Il faut tenir compte de la hauteur de l'oiseau.</i>	1 m
D5	EN NAPPE-VOÛTE	Distance horizontale entre le point où l'oiseau se pose et l'élément sous tension. Il faut considérer la distance entre la base des pattes et l'extrémité d'une des ailes en position horizontale.	1 m (1,5 m)

La distance de sécurité horizontale de 1 m (D5) est suffisante dans la plupart des cas, car l'électrocution se produit lorsqu'il y a contact avec les zones cutanées de l'aile et non avec les plumes. Toutefois, comme cela a déjà été mentionné, dans les régions à climat très pluvieux, en présence de grands aigles et de vautours, il faudrait augmenter cette distance à 1,5 m, en particulier si le dispositif d'amarrage (isolateur polymère lisse, chaîne d'isolateurs avec des extensions) peut permettre aux oiseaux de se percher.

Ainsi, sur la base de ces distances basiques minimales et du type de pylône, une **classification des différentes configurations en fonction de leur dangerosité** peut être établie. En général :

- ➔ **Les traverses moins dangereuses sont celles avec une disposition horizontale ou en armement alterné avec des isolateurs suspendus, à condition que la séparation entre la branche inférieure et le conducteur de la branche supérieure soit supérieure à 1,5 m.**
- ➔ **Les configurations en nappe-voûte avec des isolateurs suspendus sont également peu dangereuses, mais à condition que la distance entre l'extrémité inférieure de la voûte, où un oiseau peut se poser, et le conducteur central soit supérieure à 1 m. Si la distance entre le sommet de la voûte et les conducteurs est faible, le risque d'électrocution par défécation est considérable.**

Voir Annexe I pour plus de détails.

La structure et la configuration des pylônes déterminent en grande partie le risque et le type d'oiseaux pouvant être les plus affectés parmi les espèces présentes dans une zone géographique donnée.

Type d'oiseau. Toutes les espèces d'oiseaux ne courent pas le même risque d'accident par électrocution. Les principaux facteurs sont la taille (envergure) et le comportement du type d'oiseau, en plus, naturellement, de sa répartition et de son abondance. Les espèces de taille moyenne à grande, ayant tendance à utiliser les pylônes en tant que zone de chasse, lieu de repos ou plate-forme de nidification, et ayant un comportement grégaire et une tendance à former des colonies ou des dortoirs sur les pylônes, présenteront un risque plus élevé (Photo 5-7).

Photo 5-7. Les oiseaux de taille moyenne ou de grande envergure, ayant tendance à utiliser les supports comme perchoirs, sont très vulnérables à l'électrocution. Buse variable (*Buteo buteo*) sur un pylône à la configuration très dangereuse. © Daniel Burón.

Facteurs environnementaux. Leur degré d'influence est variable et augmente généralement le risque lié aux deux autres facteurs :

- ➔ **Relief.** La morphologie du terrain et la configuration de la ligne électrique déterminent l'éventuelle utilisation des pylônes par les oiseaux et donc leur dangerosité potentielle. En général, la dangerosité est plus élevée si les lignes électriques suivent une ligne de démarcation de sommets ou une ligne de pente maximale que dans le cas où la ligne électrique est placée au centre de la pente ou au fond d'une vallée. En ce qui concerne les pylônes individuels, ceux qui bénéficient d'un plus grand champ de vision du fait de leur position prédominante sur le terrain sont les plus susceptibles d'être utilisés (Photo 5-8).

Photo 5-8. Les pylônes qui occupent une position prééminente sur le terrain sont plus susceptibles d'être utilisés. Ligne électrique au Maroc, dans la région de Guelmim-Oued Noun. © Daniel Burón.

- ➔ **Disponibilité de nourriture.** La présence de nourriture abondante et accessible à proximité de la ligne électrique renforce son utilisation par les oiseaux. C'est le cas des zones à forte densité de proies potentielles pour les rapaces. Ces zones ne sont pas toujours constantes et peuvent apparaître de manière saisonnière ou soudaine en raison d'explosions démographiques des espèces qui sont chassées par les oiseaux de proie, lesquelles sont déterminées par différents facteurs climatiques et/ou démographiques, voire par l'action directe de l'être humain, comme dans certains endroits où des spécimens d'espèces de gibier sont libérés pour la chasse (Photo 5-9). Mention spéciale doit être faite aux décharges urbaines en plein air, qui représentent une source de nourriture presque inépuisable et permanente d'aliments pour les oiseaux charognards et les opportunistes (cigognes, milans, corvidés, vautours, etc.), et qui ont aussi tendance à avoir des lignes électriques à proximité fournissant de l'énergie à leurs installations.

Photo 5-9. Les zones avec une grande abondance de proies et de lignes électriques comme uniques perchoirs pour les rapaces sont généralement des sources importantes d'électrocution. Rat des sables (*Psammomys obesus*), rongeur dont l'explosion démographique était associée au grave épisode d'électrocution détecté dans la région de Guelmin-Qued Noun, Maroc. © Daniel Burón.

- ➔ *Caractéristiques de l'habitat environnant.* La végétation autour des lignes électriques détermine à la fois leur utilisation en tant que perchoir et la présence d'espèces servant de proies. Le risque est plus élevé dans les zones écotonales, qui ont tendance à être plus riches en nourriture, ou dans les zones dépourvues d'arbres ou d'arbres très dispersés, tout en diminuant sur les lignes électriques qui traversent des zones boisées avec des arbres plus grands que les pylônes. Des études déjà mentionnées au Maroc (Godino et al., 2016 ; Garrido et al., 2018a), au Soudan (Angelov et al., 2013) et en Mongolie (Dixon et al., 2017) sont des exemples remarquables. Un cas particulier représente les lignes électriques à proximité de zones humides ; mis à part le fait que certaines espèces de ces milieux utilisent ces pylônes comme perchoirs, ils peuvent le faire avec un plumage humide et même déployer leurs ailes pour faciliter le séchage, ce qui présente un risque élevé. Dans le cas des climats secs, les pylônes situés près des points d'eau constituent des foyers à haut risque où les électrocutions sont nombreuses (Izquierdo et al., 1997). Par ailleurs, l'existence de noyaux urbains, de maisons ou d'infrastructures linéaires comme les routes ou les chemins fréquentés à proximité réduit l'utilisation éventuelle des lignes électriques, du moins par les espèces les plus sensibles à la présence et à l'activité humaine (Photo 5-10).
- ➔ *Météorologie.* Les électrocutions sont plus fréquentes les jours de pluie ou de brouillard persistant, car le plumage trempé augmente la conductivité du corps des oiseaux, ce qui favorise également l'apparition d'un arc électrique. Cela signifie que pendant les mois humides, le nombre d'électrocutions est plus élevé. Le vent fort peut aussi augmenter le risque, car il rend difficile la maîtrise du vol et oblige les oiseaux posés à effectuer des manœuvres d'équilibre, les forçant à ouvrir les ailes plus souvent.

En conclusion, bien que le phénomène d'électrocution soit influencé par divers facteurs, le principal concerne les caractéristiques techniques de la ligne électrique.

Photo 5-10. Les lignes électriques qui passent près des routes et des voies de communication sont généralement moins utilisées par les oiseaux, en particulier par des espèces plus sensibles à la présence humaine. Route dans le sud du Maroc. © Justo Martín.

5.3. LIGNES ÉLECTRIQUES À HAUT RISQUE D'ÉLECTROCUTION

En raison de l'incidence des différents facteurs, les électrocutions ne se produisent pas de manière aléatoire sur une ligne électrique, mais se concentrent sur les pylônes dont les configurations sont plus dangereuses, où la topographie du terrain et l'habitat environnant favorisent leur utilisation par les oiseaux et où il existe une grande disponibilité de nourriture (Guil et al., 2011 ; Ferrer, 2012) (Photo 5-11).

Photo 5-11. Les électrocutions se concentrent sur les pylônes à configuration dangereuse, où la topographie et l'habitat favorisent leur utilisation par les oiseaux et avec une nourriture abondante. Ligne électrique avec des pylônes très dangereux, surélevée sur la végétation environnante. © Daniel Burón.

Il est important de souligner que le risque dépend non seulement de la structure, mais aussi de la fréquence d'utilisation. Ainsi, il est fort probable qu'une configuration peu dangereuse puisse causer une plus grande mortalité si elle est utilisée de manière intensive, par rapport à une configuration structurellement dangereuse mais dont l'utilisation est occasionnelle. L'étude du sud-ouest du Maroc (Godino et al., 2016 ; Garrido et al., 2018a) a clairement montré cette circonstance.

Le risque d'électrocution dépend non seulement de la structure du pylône, mais aussi de la fréquence d'utilisation.

De manière générale, les lignes électriques présentant le plus grand risque d'électrocution ont les caractéristiques suivantes (Mañosa, 2001 ; Ferrer, 2012) :

- ➔ Existence de pylônes avec des traverses permettant le contact de deux conducteurs avec le corps de l'oiseau ou d'un conducteur et la traverse métallique (voir point 5.2).
- ➔ Des pylônes situés sur les points élevés du terrain, offrant une grande visibilité et dans des zones de contact entre écosystèmes (écotones).
- ➔ Zones à forte densité de proies et peu de perchoirs naturels.
- ➔ Zones à forte concentration d'oiseaux : décharges, zones humides, champs récemment récoltés, etc. (Photo 5-12).
- ➔ Proximité des points d'eau en saison sèche ou en zones semi-arides et arides.

Photo 5-12. Les zones humides, caractérisées par de fortes concentrations d'oiseaux, sont des endroits où le risque d'électrocution est élevé. Concentration d'ibis falcinelle (*Plegadis falcinellus*) dans une rizière. © Daniel Burón.

De cette manière, les accidents se concentrent sur un très petit nombre de pylônes sur lesquels ces circonstances convergent, avec des cas dans lesquels 2 % des pylônes représentent la moitié des électrocutions, ou dans lesquels 50 % des pylônes avec des taux de mortalité représentent 80 % des victimes (Mañosa, 2001 ; Ferrer, 2012).

De plus, **les pylônes dangereux sont souvent proches les uns des autres**, car il est normal que leur configuration soit identique sur toute la ligne électrique ou du moins par sections, de manière à ce qu'ils soient répartis globalement et que des espaces géographiques à risque élevé puissent être identifiés (Guil et al., 2011).

Comme dans le cas des collisions, cette concentration spatiale peut chevaucher une autre concentration provisoire. Dans certaines études (Lehman et al., 2007), il a été observé que les électrocutions augmentaient à la fin du printemps et à l'automne, motivées par des facteurs tels qu'une plus grande activité des individus reproducteurs à la fin de la saison de reproduction ou bien une coïncidence avec la dispersion des jeunes de grands rapaces et la présence d'individus au passage d'espèces migratrices. Dans ce sens, il convient aussi d'ajouter les augmentations cycliques de proies (Godino et al., 2016 ; Dixon et al., 2017).

5.4. MESURES ANTI-ÉLECTROCUTION (PRÉVENTION, ATTÉNUATION, CORRECTION)

Photo 5-13.
Les modifications des pylônes et des lignes électriques sont très coûteuses, d'où l'importance d'une bonne planification et d'une configuration préalable sécurisée. Techniciens modifiant un pylône.
© Justo Martín.

Comme dans le cas des collisions, une distinction peut être faite entre les mesures « de prévention et d'atténuation » et les mesures « correctives » ; dans ce dernier cas, elles peuvent être permanentes ou provisoires en fonction de la durabilité de la solution adoptée.

L'adoption de mesures permanentes dans le cas de lignes électriques à pylônes dangereux suppose, comme pour les collisions, la modification totale ou partielle de la ligne électrique, solution très onéreuse sur le plan économique, notamment parce

qu'elle suppose une interruption prolongée de l'approvisionnement en énergie de la ligne, raison pour laquelle ces solutions sont plus viables dans le cas de l'installation de nouvelles lignes électriques (Photo 5-13).

Les mesures les plus couramment utilisées sont les suivantes (APLIC, 2006 ; Prinsen et al., 2011b ; Ferrer, 2012 ; UE, 2018) :

Planification du tracé. Comme dans le cas des collisions (voir section 4.4).

Enfouissement des lignes électriques. Comme dans le cas des collisions (voir section 4.4).

Utilisation de conducteurs isolés et torsadés. Il s'agit d'une mesure permanente, mais également d'un coût élevé s'il s'agit de remplacer une ligne électrique existante. Elle consiste à utiliser des conducteurs isolés et torsadés, de sorte que le risque d'électrocution est ramené à zéro (Photo 5-14). Comme pour l'enfouissement des lignes, il s'agit aussi d'une mesure efficace contre les collisions.

Photo 5-14. La substitution de conducteurs nus par des conducteurs gainés et torsadés élimine définitivement le problème de l'électrocution. Cigogne noire (*Ciconia nigra*), circaète Jean-le-Blanc (*Circaetus gallicus*) et faucon crécerellette (*Falco naumanni*) sur une ligne moyenne tension avec câble torsadé. © Íñigo Fajardo.

Utilisation de pylônes dotés de configurations de traverse sûres. Il s'agit d'une mesure permanente consistant à utiliser des configurations de traverses qui réduisent au minimum le risque d'électrocution (Photo 5-15). Dans le cas de pylônes présentant des cas d'électrocution, le remplacement total ou partiel de la traverse pour la rendre sûre est la seule mesure efficace et définitive. Ces modifications sont très coûteuses, il est donc recommandé de toujours utiliser ces configurations sûres pour la construction des nouvelles lignes électriques. Les caractéristiques basiques de ces configurations sûres doivent respecter les distances de sécurité minimales (voir point 5.2.1 et Figure 5-4).

L'Annexe II comprend une série de recommandations structurelles visant à sécuriser les configurations de traverses les plus utilisées par les sociétés d'électricité.

Photo 5-15. L'utilisation d'une configuration de traverse sécurisée pour les oiseaux est la meilleure mesure pour réduire au minimum le risque d'électrocution. Traverse avec isolateurs suspendus en armement alterné, qui respecte les distances de sécurité minimales. © Justo Martín.

Installation d'éléments isolants et de dispositifs dissuasifs. Il s'agit d'une mesure corrective (bien qu'elle puisse être également préventive) de nature provisoire. Elle consiste à augmenter la distance entre les points dangereux ou éviter leur utilisation sans réaliser des changements structurels sur la traverse. Il existe plusieurs moyens pour y parvenir, lesquels peuvent être utilisés en même temps ou en les associant de différentes manières :

- a) *En installant des éléments qui augmentent l'écartement des conducteurs de la traverse.* Ceci peut être réalisé en augmentant le nombre d'isolateurs en verre ou en porcelaine de la chaîne, ou bien en utilisant des isolateurs dressés polymères. Ces isolateurs ont une configuration spéciale pour que les oiseaux ne se posent pas dessus ou sont accompagnés de structures les empêchant de se poser (Photos 5-16 et 5-17).

Photo 5-16 et Photo 5-17.

Les isolateurs polymères peuvent fournir une distance de sécurité horizontale plus grande depuis la zone de perchoir. Cette configuration empêche directement les oiseaux de les utiliser (en haut) ou bien elle est équipée d'accessoires qui remplissent cette fonction (en bas).

© Justo Martín (en haut) et Équipe Lignes électriques GREFA (en bas).

- b)** *En recouvrant les conducteurs et les autres éléments sous tension (valves automatiques, fusibles, sectionneurs) de matériaux isolants garantissant des distances de sécurité minimales. On utilise à cette fin des matériaux préformés (gaines et revêtements) en plastique, PVC ou silicone, spécifiques à chaque type d'élément, qui s'emboîtent pour former un ensemble isolant (Photo 5-18). Ces revêtements sont également utilisés pour construction de nouvelles lignes électriques dotées de configurations sûres, car ils existent des pylônes dont les caractéristiques (pylônes avec sectionneurs, pylônes avec transformateur, pylônes en fin de ligne, pylônes avec interrupteur-sectionneur, etc.) rendent impossible une sécurité structurelle totale (Photos 5-19, 5-20 et 5-21).*

Photo 5-18. Les revêtements avec des pièces préformées sont le type d'isolation le plus couramment utilisé. Le silicone est l'un des matériaux avec lesquels ces pièces sont fabriquées, offrant une grande résistance et durabilité. © Imad Kanouni.

Photo 5-19

Photo 5-20

Photo 5-21

Photo 5-19, Photo 5-20 et Photo 5-21. Les isolants avec des pièces préformées sont encore utilisés sur les lignes avec des configurations sûres, car ils restent nécessaires sur certains pylônes, tels que ceux qui portent des sectionneurs (à gauche), des transformateurs (au centre) ou des systèmes de manœuvre et de protection (à droite). © Manuel Muñoz.

Sur les traverses métalliques, une autre possibilité d'isolation consiste à placer des gaines rigides en plastique sur la partie où se posent les oiseaux (Photo 5-22). Pour augmenter leur efficacité, elles peuvent être associées à d'autres éléments isolants, ainsi qu'à des dispositifs anti-perchage. L'adoption de cette mesure doit être évaluée selon la configuration de la traverse et des isolateurs, et en fonction des espèces présentes dans la région.

c) *En plaçant des éléments qui empêchent ou rendent difficile la pose des oiseaux sur les points dangereux (dispositifs anti-perchage).* Leur fonction est d'empêcher les oiseaux d'utiliser les pylônes, soit pour y installer leurs nids soit pour s'y poser, ou du moins pour les obliger à le faire uniquement sur des zones sûres. Ces dispositifs peuvent être de différents types : perchoirs et supports au-dessus des consoles, tiges verticales, plaques métalliques verticales, tiges à têtes pivotantes qui tournent par l'action du vent (avec ou sans miroirs), supports avec éléments réfléchissants similaires à ceux utilisés pour les collisions, etc. Dans le cas de la nidification, il est fréquent d'associer les dispositifs anti-perchage à l'installation à proximité de nids artificiels alternatifs (Photos 5-23 à 5-30).

Photo 5-22.

Sur certaines configurations, la mise en place de gaines rigides en plastique sur la traverse est une bonne option pour les rendre sûres. Buse de Chine (*Buteo hemilasius*). © Mohamed bin Zayed (Projet du Fonds pour la conservation des rapaces – Mongolie).

Photo 5-23

Photo 5-24

Photo 5-25

Photo 5-26

Photos 5-23 à 5-26. Différents exemples de dispositifs de dissuasion anti-perchage. Photo 5-23 : plaques métalliques rigides. © Justo Martín. Photo 5-24 : tiges métalliques de type « parapluie » fixes. © Justo Martín. Photo 5-25 : tiges métalliques de type « parapluie » mobiles (le vent les fait tourner). © Justo Martín. Photo 5-26 : cuvettes tournantes avec extension anti-perchage. © Álvaro Camina.

Photo 5-27

Photo 5-28

Photo 5-29

Photo 5-30

Photos 5-27 à 5-30. Différents exemples de dispositifs de dissuasion anti-perchage. Photo 5-27 : perchoir élevé sur le pylône ; balbuzard pêcheur (*Pandion haliaetus*). © Daniel Burón. Photo 5-28 : tige avec élément réfléchissant. © Manuel Muñoz. Photo 5-29 : pylône élevé pour la nidification ; nid de cigogne blanche. © Justo Martín. Photo 5-30 : association d'un dispositif anti-perchage et d'un nid artificiel alternatif. © Justo Martín.

5.5. EFFICACITÉ DES MESURES ANTI-ÉLECTROCUTION

En ce qui concerne l'efficacité générale des mesures anti-électrocution, il convient de prendre en compte, comme cela a été évoqué au chapitre précédent, qu'outre la configuration des pylônes, d'autres facteurs influent sur le risque d'électrocution (densité de proies, emplacement, habitat environnant), ce qui explique pourquoi les oiseaux électrocutés se concentrent dans certaines zones et sur certains pylônes. En fait, la plupart des électrocutions se produisent sur quelques pylônes, alors que la plupart d'entre eux n'enregistrent jamais de victimes. Cela signifie que des réductions très importantes de la mortalité peuvent être obtenues en agissant sur un nombre relativement faible de pylônes (Photo 5-31).

Photo 5-31. La mortalité peut être considérablement réduite en agissant uniquement sur les pylônes où elle est concentrée. © Équipe Lignes électriques GREFA.

Certaines études ont déterminé qu'agir sur 10 % seulement des lignes de distribution électrique contribuerait à réduire de 40 % la mortalité par électrocution, alors qu'avec une modification de 20 %, cette réduction serait proche de 80 % (Ferrer, 2012). D'autres études suggèrent que 99 % de la mortalité dans une zone donnée pourrait être éliminée en modifiant seulement 23 % des pylônes (Mañosa, 2001).

Laissant de côté les mesures définitives, comme l'enfouissement, les câbles torsadés ou les modifications structurales, l'efficacité des différents systèmes d'isolation, souvent utilisés en association avec des dispositifs anti-perchage, est en principe très élevée, avec plus de 80 %. Bien qu'ils ne puissent être considérés comme permanents, différents fabricants garantissent des durées de vie supérieures à 20 ans dans des conditions climatiques extrêmes. Cependant, la réalité est que cette efficacité est souvent très inférieure et diminue beaucoup plus tôt pour diverses raisons (Dwyer et al., 2017 ; Martín Martín et al., 2017) :

- ➔ *Utilisation de matériaux de mauvaise qualité ou peu durables.* La qualité des matériaux utilisés par les différents fabricants est très variable, de même que la configuration des différentes pièces. Même si en apparence, elles sont très similaires, il existe des différences importantes en termes de résistance et d'efficacité de leur configuration. Pour réduire les coûts, certains fabricants utilisent des matériaux plastiques peu résistants à la traction (Photo 5-32) ou des systèmes de fixation peu fiables. En conséquence, les pièces peuvent se dégager ou se détacher en peu de temps, laissant ainsi à découvert les parties dangereuses de l'installation (Photo 5-33).

Photo 5-32.

La qualité des matériaux et des pièces utilisés dans la composition de l'isolant détermine son efficacité et surtout sa durabilité. La pièce de gauche est plus robuste et dispose d'un système de fixation plus sécurisé.

© Justo Martín.

Photo 5-33.

Si des matériaux de mauvaise qualité sont utilisés, des défauts peuvent apparaître rapidement. Système de fixation qui se détache du conducteur quelques mois après son installation.
© Justo Martín.

➔ *Mauvaise exécution de l'installation.* Pour diverses raisons (manque de formation spécialisée des installateurs, mauvais choix des composants, mélange de composants de différents fabricants sur un même élément protégé, absence de vérification à la fin des travaux, etc.). La pose d'éléments isolants peut présenter des défauts, tels que des fragments de conducteurs non isolés, des vis de fixation laissées sans protection, des connexions défectueuses entre différentes pièces, etc. (Photos 5-34 et 5-35). Dans ces cas, l'isolant n'est pas complètement sûr après l'installation ou il se perd après un court laps de temps, bien avant de la durée de vie théorique des matériaux (Photos 5-36 et 5-37).

Photo 5-34.

Installation de dispositifs isolants dans lesquels de nombreux éléments métalliques demeurent à découvert et proches de la zone où les oiseaux se posent.
© Justo Martín.

Photo 5-35.
Installation défectueuse ;
pièce ailante mal ajustée
qui expose l'extrémité
métallique.
© Justo Martín.

Photo 5-36.
Gaine isolante qui s'est
détachée par l'extrémité
en raison d'une
mauvaise fixation.
© Justo Martín.

Photo 5-37.
Éléments d'isolation
mal connectés qui
se détachent et se
déplacent à travers
la travée, exposant
les conducteurs près
des zones où les
oiseaux se posent.
© James Dwyer.

L'isolation ne doit pas se limiter aux conducteurs et ponts d'ancrage, mais elle doit aussi prévoir l'isolation des éléments connecteurs sur la traverse ou sur le poteau, y compris les bornes de contact.

- ➔ *Éléments sous tension sans isolation sur pylônes avec sectionneurs, transformateurs et autres éléments.* Les pylônes avec des sectionneurs et/ou d'autres éléments installés sur la traverse ou le fût sont souvent dotés de traverses secondaires ou de structures constituant des points de pose alternatifs à la traverse supérieure, avec un risque d'électrocution par contact avec les éléments présents. Parfois même la traverse supérieure comprend des éléments anti-perchage qui poussent les oiseaux à chercher des perchoirs sur d'autres points du pylône comportant plus de risques. Dans ces cas, l'isolation ne doit pas se limiter aux conducteurs et ponts d'ancrage, mais elle doit aussi prévoir l'isolation des connecteurs à ces éléments (vannes automatiques, fusibles, propres sectionneurs), y compris les bornes de contact (Photos 5-38 et 5-39). Ceci est très important, car il existe de nombreux cas d'électrocutions sur des supports de ce type où les câbles de connexion ont été isolés, mais où le point final (bornes) est laissé à découvert.

Photo 5-38. Pylône de raccordement aéro-souterrain avec les connexions des vannes automatiques sur les conducteurs à découvert. © Justo Martín

Photo 5-39. Pylône de fin de ligne électrique isolé avec transformateur dans lequel les connexions entre celui-ci et les fusibles sont à découvert. Les pièces supérieures ne sont pas correctement installées, laissant des éléments métalliques à découvert. © Justo Martín.

- ➔ *Installations ne prenant pas en compte le risque d'électrocution par défécation.* L'électrocution par contact avec les fientes n'est pas très fréquente, mais dans le cas de pylônes largement utilisés, la probabilité même en fait un risque qu'il convient de prendre en compte. Il existe de nombreux cas d'électrocutions sur des pylônes correctement isolés, respectant les distances minimales recommandées, mais qui n'avaient pas tenu compte de cette éventualité. L'isolation du conducteur au-dessous des zones de pose résout ce problème (Photo 5-40).

Photo 5-40. Pylône avec nappe-voûte horizontale dans laquelle le conducteur central est isolé pour éviter les électrocutions des oiseaux qui se posent sur la base. Le risque de défécation est également évité sur cette position, mais pas aux extrémités, où la disposition de la traverse permet aux oiseaux de se poser.
© Équipe Lignes électriques GREFA.

- ➔ *Mauvaise exécution des tâches de maintenance.* Parfois, les lignes électriques nécessitent des opérations de maintenance nécessitant le retrait de l'isolant qui, après ces opérations, n'est pas remplacé. La formation spécialisée des techniciens des sociétés d'électricité sur les dispositifs d'isolation, leur fonctionnement et leur mise en place est essentielle pour une efficacité maximale.

D'autre part, **les dispositifs anti-perchage ont tendance à avoir une efficacité plus faible que les systèmes d'isolation.** À de nombreuses reprises, l'oiseau continue d'essayer de se percher, et parfois il se blesse en présence d'appareils pointus ou s'il est contraint de réaliser des battements d'équilibre, d'effectuer des mouvements brusques ou de choisir un autre endroit, ce qui a pour conséquence des électrocutions (Photo 5-41). De plus, certaines configurations et dispositions présentent des risques par défécation. Parfois, les dispositifs n'empêchent pas l'installation de nids sur les pylônes, prolongeant les risques tout au long de la saison de reproduction, tant pour les adultes que pour leur progéniture (Photo 5-42). Le choix du modèle le plus approprié dans chaque cas doit être associé à une bonne installation, car si elle est incorrecte, le risque d'électrocution peut même augmenter (Dixon et al., 2017) (Photo 5-43).

Photo 5-41. Les dispositifs anti-perchage à eux seuls sont moins efficaces que les systèmes d'isolation. Cigogne blanche (*Ciconia ciconia*) électrocutée sur un support avec des plaques métalliques anti-perchage. © Justo Martín.

Photo 5-42. Dans de nombreux cas, les dispositifs anti-perchage n'empêchent pas l'installation de nids sur les pylônes. Nid de cigogne blanche. © Justo Martín.

Photo 5-43. Dispositif anti-perchage placé de telle manière qu'il n'empêche pas un oiseau de petite taille de se poser près du conducteur ; son emplacement peut même augmenter le risque. © Andrew Dixon.

La mise en place et la surveillance par du personnel spécialisé et, surtout, la révision périodique des systèmes d'isolation installés, sont essentielles pour garantir leur efficacité, tant pour vérifier leur adéquation et leur bonne installation que pour contrôler le niveau de dégradation des matériaux au fil du temps.

Une étude menée aux États-Unis (Dwyer et al., 2017) a découvert 56 oiseaux électrocutés appartenant à 10 espèces différentes sur 52 pylônes dotés d'isolation, en révélant que tous les cas présentaient des défaillances lors de l'application des mesures correctives. De plus, un projet de science citoyenne mené en Hongrie (Demeter et al., 2018) a permis d'identifier plus de 3 400 cas d'électrocution de 79 espèces dans le cadre d'une inspection sur plus de 57 000 pylônes, dont 3 % des restes ont été retrouvés sous des pylônes dotés d'un système d'isolation, en concluant que les configurations utilisées ne garantissaient pas une sécurité totale.

La révision périodique des systèmes d'isolation installés est essentielle pour garantir leur efficacité.

Des études récentes menées dans le sud de l'Espagne ont montré que plus de 12 % des électrocutions de rapaces enregistrées ces 20 dernières années se produisaient sur des pylônes qui avaient été dûment isolés à un moment donné (Garrido et al., 2018b). D'autres études dans la même zone géographique ont révélé des taux de mortalité de grands aigles plus élevés sur des pylônes dotés de systèmes d'isolation que sur d'autres pylônes présentant des caractéristiques similaires sans ladite protection. Dans bon nombre de ces accidents, il s'agissait d'anciens appareils et matériaux qui se sont détériorés au fil du temps et ont perdu l'intégralité ou une partie de leur capacité d'isolation et donc la protection qu'ils offraient (Guil et al., 2011) (Photo 5-44).

Photo 5-44. Isolation ancienne détériorée dans laquelle des éléments métalliques (cercles oranges) sont à présent à découvert avec le risque d'électrocution si un oiseau se pose sur la traverse (flèches rouges). © Justo Martín.

Étant donné que les lignes électriques doivent être vérifiées au bout de quelques années (trois ans dans certains pays) pour vérifier leur bon état technique et leur bon fonctionnement, l'idéal est d'inclure dans cette révision l'état des systèmes anti-électrocution (et anti-collision) installés.

Le Tableau 5.2 présente un résumé des mesures les plus courantes pour prévenir ou atténuer les électrocutions, ainsi que leur efficacité et d'autres caractéristiques.

Tableau 5.2. Caractéristiques des principales mesures préventives et correctives contre les électrocutions.

Mesure	Type	Caractère	Temporalité	Coût	Efficacité
Enfouissement	Structurel	Préventif /atténuation	Permanente	Très élevé	Totale
Conducteurs gainés torsadés	Structurel	Préventif /atténuation	Permanente	Très élevé	Totale
Pylônes avec configuration sûre	Structurel	Préventif /atténuation	Permanente	Élevé	Totale
Isolation des parties dangereuses	Non structurel	Préventif /atténuation	Non permanente	Faible-Moyen	Élevée
Dispositifs anti-perchage	Non structurel	Préventif /atténuation	Non permanente	Moyen-Faible	Faible-moyenne

6

Diagnostic et évaluation de la mortalité des oiseaux due aux lignes électriques

6.1. SIGNES DE COLLISION SUR LE CORPS DES OISEAUX TOUCHÉS

La collision avec les câbles produit sur le corps de l'oiseau différents types de blessures traumatiques pouvant entraîner la mort instantanée de l'animal. Cependant, à plusieurs reprises, l'oiseau ne meurt pas instantanément lors de la collision, tombant au sol encore vivant (Photos 6-1 et 6-2). S'il s'agit uniquement de la fracture d'une aile, l'oiseau peut s'éloigner de la ligne électrique sur ses pattes (des distances supérieures à 2 km du point de collision ont été enregistrées). Les cadavres et les animaux grièvement blessés sont souvent l'objet des charognards et des prédateurs opportunistes, tels que les chiens, les renards, les chacals, les sangliers, les corvidés, les milans, etc. (Ferrer, 2012), ce qui doit être pris en compte lors de l'estimation de la mortalité, comme indiqué au point 6.4.

Photo 6-1. Souvent, la collision ne tue pas l'oiseau, mais il est gravement blessé et exposé aux prédateurs. Héron garde-bœufs (*Bubulcus ibis*) blessé à la suite d'une collision. © Daniel Burón.

Photo 6-2. Aigle botté (*Aquila pennata*) tué à la suite d'une collision, avec fracture ouverte de l'aile. © Justo Martín.

Si un oiseau grièvement blessé se trouve sous une ligne électrique, avertissez toujours l'autorité compétente pour le prendre en charge. En tout état de cause, même si l'oiseau blessé est recueilli et soigné, les lésions sont généralement graves et les spécimens finissent souvent par mourir ou ont peu de chance d'être complètement réhabilités et libérés à nouveau dans le milieu naturel. Les lésions les plus courantes correspondent à certains signes caractéristiques de l'animal (Tableau 6.1).

Tableau 6.1. Types de lésions et signes de collision sur le corps des oiseaux.

Source : élaboration propre à partir de Haas et al., 2003 et Fajardo et Zorrilla, 2016 (voir cette publication pour plus d'informations graphiques à cet égard).

Type de lésions	Signes
Fracture des os	Fracture des os des extrémités (ailes et pattes) et du dos ; fractures de vertèbres et du crâne ; amputations de membres.
Lésions sur le plumage	Lésions de nature mécanique (plumes déchirées ou fendues) ; rarement des brûlures.
Lésions cutanées	Déchirements, morceaux de peau déchirée, muscles, tendons ou os à découvert ; sans traitement immédiat, ils développent rapidement des infections et une nécrose.
Blessures secondaires aux extrémités	Nécrose localisée autour des plaies, des os, des tendons et des muscles à découvert ; signes d'infections bactériennes.
État des oiseaux survivants	Initialement en état de choc. Incapable de voler ni même de se déplacer en fonction des blessures et des lésions secondaires.

6.2. SIGNES D'ÉLECTROCUTION SUR LE CORPS DES OISEAUX TOUCHÉS

Normalement, l'électrocution provoque la mort instantanée de l'oiseau touché, mais parfois, la décharge en elle-même n'est pas mortelle et la mort est produite par la chute du pylône, laissant le cadavre à sa base. Comme dans le cas des collisions, le cadavre ne tarde généralement pas à être dévoré par les charognards.

Assez fréquemment, l'oiseau ne meurt pas et est gravement blessé, même s'il décède généralement peu de temps après à la suite de ses blessures ou de la rencontre avec un prédateur profitant des circonstances (lors de sa recherche de cadavres). Il est rare que l'oiseau survive, guérisse de ses plaies et parvienne à s'intégrer à nouveau dans le milieu naturel, même si cela est possible s'il reçoit une attention rapide et des soins adéquats de la part des spécialistes dans le traitement de ces blessures (Photo 6-3).

Photo 6-3. Rarement, les oiseaux électrocutés survivent et peuvent être rendus à leur environnement naturel. Vautour percnoptère (*Neophron percnopterus*) survivant à une électrocution ; sur les griffes on observe les signes des blessures produites par la décharge électrique. © Justo Martín.

Le passage du courant dans le corps produit des signes indiquant la cause du décès ou le type d'accident survenu (Tableau 6.2). Ces signes peuvent être très évidents à l'extérieur de l'oiseau (80 % des cas) ou être presque indétectables si le corps n'est pas nécropsié (15 % des cas) (Photos 6-4 à 6-15). Dans les autres cas (5 % restants), le corps apparaît complètement calciné parce que l'oiseau reste accroché ou qu'il existe un arc électrique si intense que les étincelles qui en résultent finissent par brûler les plumes et donc tout le corps (Fajardo, comm. pers).

Tableau 6.2. Types de lésions et signes d'électrocution sur le corps des oiseaux.

Source : élaboration propre à partir de Haas et al., 2003 et Fajardo & Zorrilla, 2016 (voir cette publication pour plus d'informations graphiques à cet égard).

Type de lésion	Signes
Fracture des os	Fracture de vertèbres avec paraplégie. Fractures de crâne. Fractures de bassin. Amputations des pattes ou des ailes.
Brûlures sur le plumage	Les brûlures sont visibles sur les bords et les extrémités des plumes brûlées et noircies et présentant des bords irréguliers.
Brûlures aux griffes et autres parties	Brûlures, constituées de petites zones ou de plaies avec du tissu sec aux points d'entrée et de sortie du courant (ailes, pattes, bec, poitrine). Également dans le cloaque si la cause est une défécation. Électroporation ; désorganisation cellulaire généralisée avec perte de consistance et de structure musculaire provoquée par une température instantanée élevée due au passage de l'énergie à travers les tissus. Dans ces cas, il y a des taches blanches avec une apparence visqueuse sur la peau des pattes. Si l'oiseau survit et ne reçoit aucun traitement, des zones nécrotiques se développent sur la peau des extrémités.
Blessures internes	Signes de fibrose dans le cœur ; congestion des organes internes (foie, rate, reins) ; congestion du tissu sous-cutané dans les pattes. En cas d'électrocution due à la défécation, la nécropsie montre le tube digestif ridé et noirâtre.
État des oiseaux survivants	Au début, ils sont en état de choc. Normalement, les lésions des membres sont irréversibles et finissent par devenir nécrotiques. Dans de très rares cas, seul le plumage est affecté et l'oiseau survit et peut être relâché après sa mue.

Photo 6-4

Photo 6-5

Photo 6-6

Photos 6-4 à 6-6 : signes sur le corps des oiseaux victimes d'électrocution. **Photo 6-4** : cadavre de faucon lanier (*Falco biarmicus*) électrocuté sans signes apparents au premier abord. **Photo 6-5** : aigle ibérique (*Aquila adalberti*) au plumage partiellement brûlé. **Photo 6-6** : vautour fauve (*Gyps fulvus*) entièrement calciné. Auteurs : Photo 6-4 © Daniel Burón, Photo 6-5 © CAGPDS/CAD, Photo 6-6 © Íñigo Fajardo.

6. Diagnostic et évaluation de la mortalité des oiseaux due aux lignes électriques

Photo 6-7

Photo 6-8

Photo 6-9

Photo 6-10

Photo 6-11

Photo 6-12

Photo 6-13

Photo 6-14

Photo 6-15

Photos 6-7 à 6-15 : signes sur le corps des oiseaux victimes d'électrocution (suite). **Photo 6-7 :** aigle royal (*Aquila chrysaetos*) à l'aile amputée. **Photo 6-8 et 6-9 :** aigle ibérique (*Aquila adalberti*) avec des primaires de bord irrégulier. **Photo 6-9 :** extrémités et bords brûlés et noircis. **Photo 6-10 :** aigle botté (*Aquila pennata*) avec une marque de décharge électrique sur l'aile. **Photo 6-11 :** même spécimen que la photo précédente, avec les signes de la décharge sur la patte droite (à gauche sur l'image). **Photo 6-12 :** griffe de Grand-duc d'Europe (*Bubo bubo*) avec la peau déchirée par la décharge. **Photo 6-13 :** griffe d'aigle ibérique avec électroporation. **Photo 6-14 :** aigle ibérique dont les abords du cloaque sont brûlés à cause de l'électrocution par défécation. **Photo 6-15 :** tube digestif du spécimen précédent, noirci par la décharge électrique subie. Auteurs : Photos 6-7, 6-8, 6-9, 6-12, 6-13, 6-14 et 6-15 © Íñigo Fajardo, Photos 6-10 et 6-11 © Justo Martín.

6.3. DIAGNOSTIC DE LA CAUSE DE LA MORT

Bien que la plupart des cadavres trouvés sous un pylône ou à proximité d'une portée soient dus à des électrocutions ou à des collisions, la mort peut parfois être due à d'autres causes.

Un oiseau malade, blessé, empoisonné ou blessé par balle peut décider de se poser sur un pylône et y mourir, restant au pied comme si la cause du décès était une électrocution ; dans ce cas, il sera facile de rejeter cette cause, car le corps ne présentera pas les signes typiques (voir Tableau 6.2). Toutefois, il peut arriver que le corps de l'oiseau, déjà sans vie, subisse un choc lors de la chute et heurte les éléments d'un pylône (par exemple, celui équipé d'un transformateur), ce qui nous donnerait un cas dont la résolution ne serait possible que par l'analyse en laboratoire (Photo 6-16). Normalement, cela n'est pas nécessaire et le personnel expérimenté peut déterminer la cause du décès.

Photo 6-16. Parfois, il n'est pas facile de diagnostiquer sur place la cause du décès. Vautour fauve (*Gyps fulvus*) tué sur un pylône ; la position (l'oiseau est mort en tombant en avant, apparemment à un point où il ne peut y avoir de contact) indique qu'il pourrait ne pas s'agir d'une électrocution. © Íñigo Fajardo.

De même, dans le cas des collisions, une situation similaire peut se produire, car des individus également blessés, malades ou empoisonnés, avec leurs facultés diminuées, auraient plus de difficulté à manœuvrer et à éviter une collision, de sorte qu'il faudrait presque la considérer comme une cause secondaire.

D'autres fois, des braconniers ou des empoisonneurs jettent les cadavres sous les pylônes ou les câbles électriques pour détourner les soupçons de leurs activités, un comportement enregistré fréquemment dans différentes parties du monde (Fajardo & Zorrilla, 2016).

Outre les signes de collision et d'électrocution évoqués ci-dessus, il existe d'autres éléments de jugement pouvant nous permettre de déterminer si la cause du décès est due à un incident avec la ligne électrique ou aux effets d'un empoisonnement ou d'un coup de feu. Ces éléments sont essentiellement de deux types : la scène posturale (position générale dans laquelle on retrouve le cadavre) et quelques signes externes caractéristiques, ainsi que le type de pylône (Fajardo & Zorrilla, 2016).

Scène posturale. Lorsqu'un oiseau meurt électrocuté ou par collision, le corps sans vie adopte dans sa chute une posture de « goutte d'eau », déterminée par l'anatomie elle-même (la masse est concentrée dans la partie supérieure de son corps) et l'attraction de la gravité, de sorte que, lorsqu'il atteint le sol, le dos prend contact avec le sol, laissant le cadavre la tête vers le haut, dans une posture apparemment détendue (Photos 6-17 et 6-18). Il en va de même dans le cas d'un oiseau tué en vol par un coup de feu, lorsqu'il tombe d'une hauteur suffisante.

Photo 6-17 et Photo 6-18. La position naturelle d'un oiseau qui meurt dans les airs et qui tombe au sol à partir d'une certaine hauteur consiste à adopter une forme de « goutte d'eau » lors de la chute et demeurer sur le dos, le corps apparemment détendu. À gauche : cadavre d'un aigle botté (*Aquila pennata*) en train de tomber en adoptant la forme d'une goutte d'eau. © Íñigo Fajardo. À droite : spécimen de la même espèce, tué par électrocution. © Justo Martín.

Cependant, les oiseaux qui meurent empoisonnés le font normalement sur le sol, posés. Lorsque l'oiseau finit par mourir, il tombe sur lui-même, du fait de la position de son centre de gravité déplacé vers l'avant, de sorte que le cadavre reste tête en bas. De plus, le poison provoque une mort accompagnée de contractions, de convulsions et de spasmes, qui se reflètent sur le cadavre, qui apparaît les ailes ouvertes ou à demi ouvertes, la queue relevée et dressée et les griffes complètement raides ; dans le cas d'espèces à long cou, comme les vautours ou les cigognes, l'oiseau apparaît recroquevillé, résultat de la douleur subie. Chez les rapaces de taille moyenne, la posture « en éventail » est typique, avec les ailes et la queue pleinement déployées (Photos 6-19 à 6-24).

Photo 6-19

Photo 6-20

Photo 6-21

Photo 6-22

Photo 6-23

Photo 6-24

Photos 6-19 à 6-23. Signes de mort par empoisonnement. Photo 6-19 : vautour fauve (*Gyps fulvus*) avec les ailes entrouvertes et contractées. Photo 6-20 : vautour fauve à plat ventre sur le sol avec la queue relevée. Photo 6-21 : griffes contractées d'un milan (*Milvus milvus*) sous l'effet du poison. Photo 6-22 : cloaque de gypaète barbu (*Gypaetus barbatus*) avec des restes de selles diarrhéiques. Photos 6-23 et 6-24 : milan noir (*Milvus migrans*) et faucon crécerelle (*Falco tinnunculus*) empoisonnés, en position en « éventail ». Auteurs : Photos 6-19, 6-20 et 6-24 © Justo Martín ; Photos 6-21, 6-22 et 6-23 © Íñigo Fajardo.

Si l'oiseau meurt sur le sol pour des causes autres que l'empoisonnement, par exemple, à la suite des blessures causées par un coup de feu, il apparaît également la tête en bas, mais dans une position différente, sans les signes de contractions et de convulsions décrits.

Lorsqu'un oiseau meurt électrocuté ou par collision, le corps sans vie adopte dans sa chute une posture de « goutte d'eau ».

Signes externes. Le poison laisse d'autres manifestations, telles que des vomissements (à côté de l'oiseau ou à proximité), le jabot plein de contenu ou de fientes diarrhéiques ou sanglantes, qui laissent des taches évidentes autour du cloaque. De même, les coups de feu laissent aussi des traces évidentes. Bien que les blessures ne soient pas trop visibles, les plombs provoquent des plumes avec le calamus cassé, taillées et percées si le coup de feu a eu lieu à proximité, ou des marques arrondies s'il a eu lieu un peu plus loin ; les deux types de plumes sont faciles à identifier sur le corps et ses environs (Photos 6-25 à 6-30).

Photo 6-25

Photo 6-26

Photo 6-27

Photo 6-28

Photo 6-29

Photo 6-30

Photos 6-25 à 6-30. Signes de mort par arme à feu. Photos 6-25 à 6-29 : marques de billes en plomb sur les plumes. Photo 6-30 : blessure par arme à feu. © CAGPDS/CAD.

6.4. ÉVALUATION DE LA MORTALITÉ PRODUITE PAR LES LIGNES ÉLECTRIQUES

Comme indiqué ci-dessus, les collisions et les électrocutions se concentrent sur certains points ou zones du réseau électrique en fonction de différentes variables liées à leur propre structure, à l'environnement et aux caractéristiques biologiques et comportementales des espèces présentes, principalement.

En ce qui concerne les chiffres de la mortalité survenant sur ces sections ou points noirs, les études menées dans différentes parties du monde montrent une grande variabilité. Dans le cas des collisions, les chiffres recueillis concernent moins d'un oiseau mort par kilomètre de lignes électriques et par an jusqu'à plus de 170 victimes par kilomètre et par an, avec des cas extrêmes de plus de 500 victimes par kilomètre par an. Dans le cas des électrocutions, des chiffres de 0,005 jusqu'à 4,8 victimes ont été enregistrés par pylône et an (Loss et al., 2014).

Lorsqu'il s'agit d'établir les chiffres de la mortalité réelle à partir des données recueillies sur le terrain, **il convient de noter que, lors des recherches sur les carcasses, seule une partie des restes est retrouvée.** En menant diverses expériences (Ferrer, 2012), il a été vérifié que même les chercheurs expérimentés ne sont pas en mesure de retrouver tous les carcasses ou les restes présents ; le taux de succès en la matière atteint seulement 25 % lorsque les chercheurs n'ont pas beaucoup d'expérience (Ponce et al., 2010) (Photo 6-31).

Photo 6-31.

L'expérience du personnel technique et de terrain est importante pour obtenir des données réelles sur la mortalité. Caractérisation de lignes électriques et recherche de carcasses au Maroc.
© Daniel Burón.

À la variabilité dans l'efficacité de la recherche, il faut ajouter l'action des charognards et des opportunistes. Les carcasses sont pour eux une ressource alimentaire importante, laquelle peut même être prévisible et abondante sur ces points noirs. Il semble qu'ils apprennent même à identifier les points ou les pylônes présentant le taux de mortalité le plus élevé, en leur rendant visite plus fréquemment. Ainsi, les corps des victimes et leurs restes disparaissent au fur et à mesure qu'ils sont découverts par les charognards ; en outre, il a été constaté que le **taux de disparition** (rapidité avec laquelle ces corps et restes sont retirés) est d'autant plus élevé que l'espèce d'oiseau concerné est petite (Ferrer, 2012 ; Borner et al., 2017).

Le taux de disparition des carcasses est d'autant plus élevé que l'espèce d'oiseau concerné est petite.

Le taux de disparition est très variable, et même si elle peut être influencée par des facteurs tels que le type de végétation ou la météo, il dépend principalement de la composition et la densité de la communauté de charognards (Ponce et al., 2010). Parmi eux se trouvent aussi bien des mammifères que des oiseaux, bien que les premiers soient responsables de la plupart des disparitions. Les espèces les plus communes sont les renards, les sangliers, les chiens et les chats sauvages, les rats, les corvidés (corbeaux, choucas des tours, corneilles), les milans (noirs et royaux), les cigognes blanches, les goélands, les vautours et même les grands aigles (Ferrer, 2012).

Des taux de disparition (un mois après de la mort) compris entre 10 % et plus de 70 % ont été enregistrés, avec une disparition très rapide juste après la mort et diminuant progressivement (Photo 6-32) (Ponce et al., 2010). Les carcasses des petits oiseaux sont vite retirés (près de 90 % le deuxième jour dans le cas des plus petits), vu que leur consommation a tendance à ne pas laisser de traces, contrairement à ce qui se passe avec les espèces plus grandes, qui sont fréquemment consommées sur les lieux et ne le sont que partiellement, pouvant laisser des restes pendant des mois (Ponce et al., 2010).

Photo 6-32.
Les charognards retirent rapidement les cadavres, enregistrant des taux de disparition supérieurs à 70%.
Renard roux (*Vulpes vulpes*). © Daniel Burón.

Le taux de disparition est établi à partir d'expériences avec des oiseaux morts, de différentes tailles, placés sous ou à proximité de la ligne électrique. Les carcasses sont contrôlées périodiquement par des observateurs pendant un temps déterminé pour quantifier et mesurer l'action des charognards présents dans la zone d'étude.

Ces expériences permettent d'obtenir un autre élément de correction indispensable pour cerner la mortalité réelle, le **taux de détectabilité**, puisque les observateurs ne détectent pas toutes les carcasses même sans l'action des charognards. Ce taux de détectabilité varie considérablement d'un individu à l'autre, les valeurs enregistrées étant comprises entre 25 et 85 % (Borner et al., 2017). Outre les aptitudes plus ou moins élevées de chaque observateur, d'autres facteurs sont à prendre en compte tels que la taille de l'oiseau (les plus grands sont plus facilement détectés) ou la densité et la hauteur de la végétation (il est plus difficile de retrouver les cadavres dans les broussailles ou les prairies denses) (Borner et al., 2017).

Les taux de disparition et de détectabilité dépendent en grande partie de l'emplacement de la ligne électrique, qui détermine en définitive des facteurs tels que la présence et la densité des charognards et la facilité plus ou moins grande dont ils disposent (ainsi que des observateurs) pour retrouver les carcasses ; cela varie également selon la période de l'année.

Par conséquent, les carcasses retrouvées lors de l'examen d'une ligne électrique ne font qu'attester du problème et donnent une idée de la gravité possible du problème en fonction de la quantité de restes retrouvés et des espèces affectées. **Il n'est pas possible d'obtenir une bonne approximation des taux de mortalité réels sans mener d'études à l'échelle locale pour obtenir des valeurs spécifiques des taux de disparition et de détectabilité dans la zone d'étude.** En ce qui concerne la fréquence d'échantillonnage pour établir ces taux, une visite mensuelle peut suffire pour les oiseaux de taille moyenne et grande, mais pour les petits oiseaux, des visites hebdomadaires ou même plus fréquentes sont nécessaires pour obtenir une valeur pouvant être considérée comme fiable (Borner et al., 2017).

L'obtention de taux de mortalité aussi réalistes que possible, spécifiques à chaque site, pourrait être utilisée pour établir les priorités de correction entre les zones présentant un nombre d'accidents élevé (Photo 6-33).

Photo 6-33. Les cadavres découverts ne montrent que l'évidence du problème et donnent une idée de son éventuelle gravité réelle. Aigle de Bonelli (*Aquila fasciata*) et circaète Jean-le-Blanc (*Circaetus gallicus*) électrocutés. © Justo Martín.

7

Espèces vulnérables

Le phénomène de la mortalité des oiseaux due aux lignes électriques est mondial et se manifeste dans toutes les parties de la planète où se trouvent des lignes électriques, avec des accidents enregistrés chez des centaines d'espèces.

Photo 7-1. Les oiseaux ont généralement une bonne vision latérale grâce à un œil de chaque côté de la tête, mais cela leur donne une mauvaise perception des distances par rapport aux objets qui ne sont pas très proches. Barge rousse (*Limosa lapponica*). © Daniel Burón.

Comme expliqué dans le chapitre précédent, de nombreux facteurs influents sur l'incidence des lignes électriques sur les oiseaux. Beaucoup sont liés à la biologie de l'espèce (taille, morphologie, comportement), de sorte que, comme nous l'avons vu, certaines espèces ou groupes d'espèces sont plus susceptibles que d'autres de subir des accidents, soit par électrocution, soit par collision (voir les révisions APLIC, 2006 ; Lehman et al., 2007 ; Prinsen et al., 2011a ; APLIC, 2012, Ferrer, 2012 ; Bernardino et al., 2018 ; Eccleston & Harness, 2018).

7.1. SENSIBILITÉ AUX COLLISIONS

La structure ou la typologie de la ligne électrique, sauf en raison de l'existence ou non d'un câble de garde, a peu d'importance sur le risque de collision, et bien que les caractéristiques morphologiques de l'oiseau aient une influence, ce sont avant tout le comportement et le type d'utilisation de l'espace qui déterminent les principaux facteurs de sensibilité des différents types d'oiseaux à ce risque.

En général, la façon dont les oiseaux « voient » limite leur capacité à détecter des obstacles tels que les lignes électriques. Chez eux, la vision latérale prédomine, ce qui leur donne un large champ de vision, mais au contraire, ils ont une mauvaise perception de la profondeur de ce champ et, par conséquent, une difficulté à estimer les distances (Photo 7-1). Cette fonctionnalité serait un inconvénient pour détecter avec précision et éviter correctement les câbles en vol chez tous les oiseaux ayant cette disposition oculaire (Martin, 2011).

Ceci est le cas même chez les rapaces, et bien qu'ils aient une meilleure vision binoculaire, ils ont d'importants « angles morts » au-dessus et derrière la tête. Ainsi, lorsqu'ils volent en ligne droite, la tête penchée vers le bas, à la recherche d'une proie, d'un perchoir ou de congénères, ces angles morts les empêchent de détecter un obstacle se trouvant juste devant eux, telle une ligne électrique (Bevanger, 1994 ; Martin & Shaw, 2010) (Photo 7-2).

Ce sont avant tout le comportement et le type d'utilisation de l'espace qui déterminent les principaux facteurs de sensibilité des différents types d'oiseaux au risque de collision.

Photo 7-2. Les rapaces, bien que bénéficiant d'une bonne vision binoculaire, ont d'importants « angles morts » au-dessus et derrière la tête, ce qui les rend très sensibles aux collisions. Milan royal (*Milvus milvus*).
© Daniel Burón.

En ce qui concerne le comportement des oiseaux devant les lignes électriques, certaines études suggèrent qu'ils pourraient apprendre à éviter les collisions grâce à leur propre expérience (après une collision sans conséquences graves) ou par la visualisation d'accidents (Bevanger, 1998).

Tenant compte de cette forme de perception et de comportement des oiseaux devant les lignes électriques, les **facteurs qui influencent leur sensibilité plus ou moins grande à ce problème sont les suivants :**

- ➔ **Caractéristiques morphologiques.** La capacité de vol d'un oiseau et sa manœuvrabilité sont essentielles pour éviter les obstacles. Cette capacité est liée à la taille et à la forme relative de ses ailes par rapport à son poids, de sorte que les oiseaux à faible manœuvrabilité, tels que les outardes, les cigognes, les grues, les anatidés ou les échassiers, ont moins de facilité pour changer de direction de vol face à un obstacle imprévu (Bevanger, 1998 ; Barrientos et al., 2012 ; Rioux et al., 2013) (Photo 7-3).

Photo 7-3. Les anatidés, avec leur vol rapide et leur faible manœuvrabilité, forment un groupe très affecté par les collisions, également en raison de leur comportement grégaire. Sarcelles marbrées (*Marmaronetta angustirostris*) en vol. © Íñigo Fajardo.

- ➔ **Âge, sexe et condition physique.** Certaines études montrent que les individus immatures, en particulier les anatidés et d'autres oiseaux aquatiques tels que les aigrettes, les grues et les cigognes, sont plus sensibles aux collisions que les adultes, avec des proportions parfois supérieures à 90 % de la mortalité totale enregistrée (Henderson et al., 1996 ; Garrido & Fernández-Cruz, 2003 ; Bernardino et al., 2018). Il existe également des variations concernant le sexe chez certaines espèces ; chez les outardes, les mâles ont enregistré un plus grand nombre de collisions, probablement en raison de leur taille et de leur poids plus importants et, par conséquent, d'une moindre capacité de manœuvrabilité en vol (Jenkins et al., 2011). Bien qu'aucune étude ne le prouve, les oiseaux affaiblis par différentes causes (maladie, faim, etc.) doivent être plus vulnérables à la collision que les animaux en bonne santé (Kelly & Kelly, 2005).
- ➔ **Comportement en vol.** En principe, les espèces au comportement grégaire telles que les anatidés, les grues, les pigeons ou les étourneaux sansonnets semblent plus sujettes aux collisions que celles au comportement solitaire, même s'il est également vrai que les groupes réagissent plus tôt à la présence de lignes électriques que les individus solitaires grâce au fait d'avoir « plus d'yeux » en alerte (Drewitt & Langston, 2008 ; APLIC, 2012). Chez les rapaces, il a été constaté que le risque est plus grand chez les adultes lorsque les lignes électriques traversent leurs zones de chasse et qu'ils doivent les traverser pour se déplacer entre les zones de nidification et d'alimentation ; en revanche, les lignes électriques situées près des nids ne posent généralement pas de problème (Rollan et al., 2010). Cependant, pour les jeunes qui commencent à voler, la présence de lignes électriques près des nids est toujours un facteur de risque.

Photo 7-4.

Les rapaces qui chassent au moyen de vols rapides et de poursuites, tels que les faucons et les autours, peuvent entrer en collision avec les lignes électriques pendant leurs poursuites. Faucon pèlerin (*Falco peregrinus*). © Daniel Burón.

Chez certaines espèces effectuant des vols rapides et poursuivant leurs proies (faucons, autours), le risque de collision peut être augmenté en focalisant l'attention sur la poursuite (Bevanger, 1994) (Photo 7-4). Cette attention moindre portée aux obstacles éventuels se produit également pendant la saison de reproduction pour certaines espèces exposées à des vols et des conflits territoriaux au cours desquelles ils peuvent être plus distraits envers l'environnement (Sundar & Choudhury, 2005).

Chez les rapaces, il a été constaté que le risque de collision est plus grand chez les adultes lorsque les lignes électriques traversent leurs zones de chasse.

La bécasse des bois (*Scolopax rusticola*) a un comportement qui la rend particulièrement sensible aux collisions. Pendant l'époque de rut, les mâles effectuent quelques vols d'exposition pour attirer les femelles. Ils consistent en quelques itinéraires circulaires au-dessus des arbres tout en émettant un chant caractéristique (« croule » ou « *roding* »). Ces vols ont lieu au crépuscule et seraient à l'origine de l'apparition fréquente de l'espèce en tant que victime de collisions (Derouaux et al., 2012).

Photo 7-5.

Les espèces nocturnes, telles que les hiboux, les effraies et les engoulevents, ne semblent pas compter beaucoup de victimes par collision. Engoulevent à collier roux (*Caprimulgus ruficollis*).
© Daniel Burón.

➔ **Habitudes circadiennes.** Le caractère diurne ou nocturne des oiseaux, ainsi que leur comportement grégaire et les conditions de luminosité ambiante ont une grande influence sur le risque de collision. Il existe des espèces telles que les grues, les flamants roses, les hérons, les goélands et autres oiseaux aquatiques qui voyagent quotidiennement au crépuscule ou à l'aube, voire même la nuit, ce qui augmente le risque de collision. En revanche, les espèces éminemment nocturnes, telles que les hiboux, les chouettes et les engoulevents, ne semblent pas subir beaucoup de pertes, du moins par rapport à d'autres causes de nature anthropique (Alonso et al., 1994 ; Schaub et al., 2010) (Photo 7-5).

Photo 7-6. Les collisions se produisent bien plus lors des déplacements quotidiens que lors des migrations. Volée de hérons garde-bœufs (*Bubulcus ibis*) traversant une ligne électrique dans leur trajet de retour vers leurs zones de repos habituelles. © Justo Martín.

➔ **Déplacements quotidiens et saisonniers.** En principe, les oiseaux sont plus sensibles aux collisions lors de leurs déplacements quotidiens en traversant des lignes électriques entre leurs aires de reproduction ou de repos et d'alimentation, que lors de leurs déplacements migratoires (Photo 7-6). Au cours de ceux-ci, ils se déplacent généralement beaucoup plus haut que les lignes électriques, de sorte que le risque de collision est beaucoup plus faible. Cependant, il existe de nom-

breux cas de collision associés à des déplacements migratoires, liés à des espèces grégaires quand elles volent à basse altitude près des points de repos lors de leurs déplacements (souvent en association avec une faible luminosité et une visibilité réduite) et qu'il existe des lignes électriques à proximité (Janss & Ferrer, 2000 ; van Rooyen & Diamond, 2008 ; Shaw, 2013). Dans ces cas, les espèces de passage ont un taux de collision plus élevé que les résidents, car ces derniers connaissent mieux les obstacles (Shimada, 2001). Certaines espèces qui voyagent la nuit semblent être plus sensibles aux collisions que celles qui se déplacent le jour (Photo 7-7), surtout si ces dernières utilisent des courants thermiques ascendants pour se déplacer, leur permettant de voler bien au-dessus des lignes électriques (Drewitt & Langston, 2008 ; Luzenski et al., 2016).

Photo 7-7.

Les espèces qui utilisent les courants thermiques lors de leurs migrations sont peu susceptibles de subir des collisions. Groupe de vautours fauves (*Gyps fulvus*) en migration.
© Justo Martín.

7.2. SENSIBILITÉ AUX ÉLECTROCUTIONS

Le risque d'électrocution est directement lié au type de pylône et à la configuration de la traverse, dont dépend la possibilité plus ou moins élevée qu'un oiseau lors de l'utilisation du support établisse un contact avec deux conducteurs ou avec un conducteur et une pièce métallique, comme expliqué plus en détail au chapitre 5.1. Ainsi, **la sensibilité d'une espèce d'oiseau à l'électrocution est déterminée par trois grands types de facteurs** (Bevanger, 1994) :

- ➔ Ses caractéristiques morphologiques, qui détermineront la facilité avec laquelle ce contact peut se produire.

- ➔ Son comportement, car sa tendance à utiliser des lignes électriques déterminera le degré de sensibilité à ce problème.
- ➔ Autres facteurs pouvant avoir une influence, tels que le sexe ou l'âge.

Caractéristiques morphologiques. Il est évident que plus un oiseau est grand, plus le risque d'électrocution est élevé, car il peut établir un contact plus facilement (APLIC, 2006 ; Lehman et al., 2007). Dans cette perspective, les oiseaux de plus d'un mètre de hauteur (corbeaux, rapaces de taille moyenne ou grande, cigognes, etc.) sont considérés comme les plus vulnérables (Photo 7-8). Quoi qu'il en soit, sur certains pylônes dotés de transformateurs ou sectionneurs, ou bien présentant de nombreux connecteurs, des électrocutions peuvent survenir chez presque toutes les espèces d'oiseaux. Il existe des cas de faucons pèlerins et de faucons crécerelles, de petits rapaces nocturnes tels que des hiboux ou des Petit-duc scops et même des passériformes, tels les étourneaux ou les fringillidés.

Photo 7-8. Pour les grands aigles (royaux, ibériques, de Bonelli), l'électrocution est l'un de leurs principaux problèmes de conservation. Aigle royal (*Aquila chrysaetos*). © Justo Martín.

Comportement. Parmi les espèces de taille moyenne ou grande, celles qui ont tendance à utiliser les pylônes comme points de chasse, lieux de repos ou dorts sont les plus sensibles. Parmi ces espèces, le groupe le plus touché est probablement celui des rapaces, en particulier les grands aigles, les vautours, les buses et les milans, qui cherchent leur nourriture dans des espaces plus ou moins dégagés. Les espèces plus forestières, telles que les faucons, les éperviers, les circaètes Jean-le-Blanc ou les aigles bottés, ont tendance à être moins sensibles, car dans leur environnement, il existe de nombreux perchoirs naturels comme alternatives aux poteaux électriques. Les oiseaux de proie nocturnes méritent une mention spéciale car, malgré le fait qu'ils chassent depuis des perchoirs, ils sont généralement moins vulnérables au problème (Photo 7-9). En effet, ils chassent à l'oreille et ont besoin de perchoirs d'une hauteur inférieure à celle des supports des lignes électriques à haute et moyenne tension. Seules les espèces les plus grandes (les Grand-ducs), dont la taille et la capacité d'audition sont plus grandes, ce qui leur permet d'utiliser des supports plus élevés, présentent des taux élevés d'électrocution (Taylor, 1994 ; Fajardo, 1998).

Photo 7-9. Les rapaces nocturnes de petite et moyenne taille sont peu affectés par les électrocutions. Chouette chevêche (*Athene noctua*). © Iñigo Fajardo.

En ce qui concerne le comportement, il convient de garder à l'esprit que l'utilisation permanente de pylônes augmente le risque par pur effet de probabilité, de sorte que des pylônes peu dangereux peuvent enregistrer des électrocutions s'ils sont utilisés de manière intensive (Godino et al., 2016 ; Garrido et al., 2018a).

Les espèces grégaires qui utilisent les pylônes électriques comme dortoirs ou comme lieux de repos risquent de subir de multiples électrocutions simultanées.

Dans le cas des espèces grégaires qui utilisent les pylônes de lignes électriques comme dortoirs ou tout simplement comme lieux de repos (hérons garde-bœufs, gypaètes, milans ou cigognes, par exemple), de multiples électrocutions simultanées peuvent se produire si les oiseaux sont en contact, de sorte que si l'un d'entre eux subit une décharge, tout le groupe est électrocuté (Photo 7-10). Ce risque est évidemment plus élevé les jours de pluie ou de brouillard, à la fois en raison du plumage humide et du risque de formation d'arcs électriques. Le comportement de certaines de ces espèces qui utilisent les pylônes pour se réchauffer au soleil ou pour se sécher après une pluie, déployant les ailes comme les milans ou les vautours, augmente le risque d'électrocutions en groupe.

Photo 7-10. Groupe de vautours fauves (*Gyps fulvus*) se reposant sur un pylône électrique après un orage. Tout le groupe risque l'électrocution. © Rachid El Khamliichi.

Des accidents de ce type ont même lieu sur des pylônes de lignes électriques de transport, généralement peu dangereux en raison de la grande distance qui sépare les connecteurs. Dans ces cas, l'électrocution se produit parce que différents oiseaux en contact intime touchent les conducteurs, entraînant la fermeture du circuit et l'électrocution de chacun d'entre eux (Ferrer, 2012).

Un autre groupe d'espèces à risque comprend celles qui utilisent les pylônes comme plates-formes de nidification, comme les cigognes, certains aigles (ibérique, de Bonelli), les corvidés, les faucons et les crécerelles. Leur propre utilisation les expose davantage au risque de subir ces accidents, un risque qui s'étend à toute la reproduction. Les petits nés dans ces nids sur des pylônes sont également très sensibles à l'électrocution, en particulier lorsqu'à la fin de leur croissance, ils exercent leurs ailes et effectuent leurs premiers et maladroits vols (Ferrer, 2012).

Autres facteurs. Le sexe peut-être un facteur de risque, ou en raison de la différence de taille (chez les rapaces, la femelle a tendance à être plus grande, Ferrer & Hiraldo, 1992) ou de différents comportements (Dwyer, 2009). L'âge de l'oiseau peut aussi avoir une influence. Pour certaines espèces, comme l'aigle ibérique (Photo 7-11), il a été prouvé que les jeunes spécimens sont plus sensibles aux électrocutions (Ferrer & Hiraldo, 1992).

Photo 7-11. Les jeunes aigles ibériques (*Aquila adalberti*) sont plus sensibles aux électrocutions que les adultes.
© Daniel Burón.

7.3. GROUPES D'OISEAUX SENSIBLES AUX LIGNES ÉLECTRIQUES

L'impact des lignes électriques a été étudié pour différents groupes d'oiseaux et catégorisation de leur sensibilité à la mortalité occasionnée par ces lignes a été établie (Prinsen et al., 2011a).

En général, **les groupes les plus touchés par l'électrocution sont les cigognes, les rapaces de taille moyenne et grande** (diurnes et nocturnes) **et les corvidés** (Lehman et al., 2007). Dans les zones côtières, les laridés peuvent représenter une proportion élevée, jusqu'à près de 30 %, selon les études menées sur l'île de Minorque, en Espagne (de Pablo, 2017).

Dans le cas des collisions, la liste est plus longue : oiseaux aquatiques (anatidés, échassiers, rallidés, cormorans, hérons, flamants roses, grues et laridés), outardes (barbue, houbara, canepetière), quelques rapaces, pigeons, pics, engoulevents, martinets noirs, martins-pêcheurs, corvidés, étourneaux et certains autres groupes de passereaux migrateurs qui volent la nuit, comme dans le cas de certaines espèces de grives et de fauvettes (Bernardino et al., 2018) (Photo 7-12).

Photo 7-12. Les flamants roses et généralement tous les oiseaux aquatiques font partie des groupes d'oiseaux les plus touchés par les collisions. Groupe de flamants roses (*Phoenicopterus roseus*). © Justo Martín.

Photo 7-13.
Lorsqu'une espèce est rare, l'électrocution peut compromettre la viabilité de ses populations, comme cela a été constaté pour l'aigle ibérique (*Aquila adalberti*).
© Daniel Burón.

Le Tableau 7.1 montre la gravité (réelle ou potentielle) des effets des collisions et des électrocutions sur les différents groupes d'oiseaux présents en Europe et en Afrique du Nord, sur la base des résultats obtenus par différentes études.

Tableau 7.1. Gravité des impacts (réels ou potentiels) sur les populations d'oiseaux, de la mortalité par électrocution et collision avec des lignes électriques pour différentes familles d'oiseaux en Europe et Afrique du Nord. 0 = il n'y a aucune victime signalée ou probable ; I = décès signalés, mais pas de menace apparente pour la population d'oiseaux de cette famille ; II = pertes régionales ou locales élevées, mais sans impact significatif sur l'état de conservation global de l'espèce ; III = les victimes sont un facteur important de mortalité, menaçant une espèce en voie d'extinction, au niveau régional ou à plus grande échelle. Sources : Prinsen et al., 2011 ; Derouaux et al., 2012.

Groupe des oiseaux	(a) victimes d'électrocutions	(b) victimes de collisions
Autours, éperviers et faucons (Accipitriformes et Falconiformes)	II – III	I - II
Canards, oies, cygnes et harles (Anatidae)	0	II
Cigognes (Ciconidae)	III	II
Corbeaux, corneilles et geais (Corvidae)	II	I - II
Cormorans (Phalacrocoracidae)	I	I
Coucous (Cuculidae)	0	I-II
Engoulevents (Caprimulgidae) et martinets (Apodidae)	0	I-II
Flamants (Phoenicopteridae)	0	II
Fous, fous de Bassan (Sulidae)	0	I
Gangas (Pteroclididae)	0	II
Grues (Gruidae)	0	III
Guêpiers (Meropidae)	0 – I	I-II

Groupe des oiseaux	(a) victimes d'électrocutions	(b) victimes de collisions
Hérons et butors (Ardeidae)	I	II
Hiboux (Strigiformes)	II - III	II
Huppes (Upupidae) et martins-pêcheurs (Alcedinidae)	I	I-II
Ibis (Threskiornithidae)	I	II
Labbes (Stercorariidae), laridés et goélands (Laridae)	I	II
Oiseaux chanteurs de petite taille et de taille moyenne (Passériformes)	I	I-II
Outardes (Otidae)	0	III
Pélicans (Pelicanidae)	I	II - III
Perdrix, cailles et téttras (Galliformes)	0	II - III
Pics (Picidae)	I	I-II
Pigeons et tourterelles (Columbidae)	I-II	II
Pingouins et guillemots (Alcidae)	0	I
Plongeurs (Gaviidae) et grèbes (Podicipedidae)	0	II
Pluviers et échassiers (Charadriidae et Scolopacidae)	I	II - III
Puffins et pétrels (Procellariidae)	0	II
Râles, poules d'eau et foulques (Rallidae)	0	II
Rolliers (Coraciidae) et perroquets (Psittadidae)	I-II	I-II
Sternes (Sternidae)	0 - I	I-II

La mortalité produite par les lignes électriques a des conséquences différentes en fonction des caractéristiques démographiques et biologiques des espèces touchées. S'il s'agit d'une espèce abondante et que l'effet est à l'échelle locale, son incidence sur la population peut être presque négligeable. Cependant, si l'effet est général et sur une espèce rare, il devient le principal facteur de mortalité de l'espèce, en compromettant ainsi son avenir ou son rétablissement (Photo 7-13).

En général, les espèces les plus touchées sont celles qui répondent à une ou plusieurs de ces caractéristiques :

- ➔ Espèces présentes avec de faibles densités de population et donc avec une faible capacité de substitution d'individus.
- ➔ Espèces à faible potentiel de reproduction, dans lesquelles une augmentation de la mortalité adulte empêche le rétablissement des pertes de population.
- ➔ Espèces à faible fécondité, à faible mortalité naturelle et à longue espérance de vie dont la stabilité de la population dépend du taux de survie élevé des adultes, lorsque cette fraction de la population est particulièrement touchée.
- ➔ Espèces rares et menacées, en particulier si d'autres caractéristiques défavorables coïncident (faible densité, faible fertilité, etc.).

7.4. ESPÈCES SENSIBLES PRÉSENTES EN AFRIQUE DU NORD

Les groupes d'oiseaux les plus sensibles aux lignes électriques sont bien représentés dans l'avifaune d'Afrique du Nord. Dans de nombreux cas, il s'agit d'espèces qui se trouvent dans un état de conservation défavorable, que ce soit dans cette région ou à un niveau général, et l'on manque généralement de connaissances sur l'état de leurs populations nord-africaines.

Les espèces les plus sensibles aux **électrocutions** sont les suivantes :

- ➔ **Vautour percnoptère** (*Neophron percnopterus*), espèce très rare dans la région et classée dans la catégorie « En danger » au niveau mondial selon la Liste rouge de l'UICN™ (BirdLife International, 2017f).

- ➔ **Gypaète barbu** (*Gypaetus barbatus*), espèce également à très faible densité et qui, malgré des populations en bonne santé dans d'autres parties du monde, est actuellement en déclin dans toute l'Afrique (Botha et al., 2017) (Photo 7-14), ainsi qu'au niveau mondial.
- ➔ **Milan royal** (*Milvus milvus*), espèce très rare dans cette partie du monde et en déclin dans sa principale zone de distribution européenne (Knott et al., 2009 ; BirdLife International, 2017e).

Les groupes d'oiseaux les plus sensibles aux accidents avec des lignes électriques sont bien représentés dans l'avifaune d'Afrique du Nord et, dans de nombreux cas, il s'agit d'espèces qui se trouvent dans un état de conservation défavorable.

- ➔ **Vautour de Rüppell** (*Gyps rueppelli*), espèce classée dans la catégorie « En danger critique d'extinction » (BirdLife International, 2017c) et possédant une très petite population nord-africaine (Botha et al., 2017) (Photo 7-15).
- ➔ **Aigle ibérique** (*Aquila adalberti*), espèce qui se reproduisait autrefois en Afrique du Nord et qui reste classée dans la catégorie « Vulnérable » à l'échelle mondiale (BirdLife International, 2017a) ; elle est observée de plus en plus en Afrique du Nord (Godino et al., 2016 ; Morandini et al., 2016 ; Garrido et al., 2018a). L'électrocution (MTE, 2018b) est l'un de ses principaux problèmes pesant sur sa conservation. Ce facteur pourrait donc jouer un rôle clé dans la recolonisation de ses anciens domaines du sud de la Méditerranée.
- ➔ **Ibis chauve** (*Geronticus eremita*), espèce classée dans la catégorie « En danger » (BirdLife International, 2017b) et dont la majeure partie de la population mondiale vit au Maroc ; bien qu'il n'y ait aucune référence aux électrocutions en Afrique du Nord, la principale cause de mortalité non naturelle de la population réintroduite dans le sud de l'Espagne est attribuable aux lignes électriques, notamment en raison de leur utilisation comme dortoirs (López et al., 2015) (Photo 7-16).

Photo 7-14. Le gypaète barbu (*Gypaetus barbatus*) est en déclin dans toute l'Afrique du Nord. Couple de gypaètes barbus dans le Haut Atlas marocain. © José Rafael Garrido.

Photo 7-15.

Il est peu probable que le vautour de Rüppell (*Gyps rueppelli*) continue de se reproduire dans le nord du continent africain. © Íñigo Fajardo.

Photo 7-16. L'ibis chauve (*Geronticus eremita*) survit en petit nombre en Afrique du Nord. Les lignes électriques sont une menace potentielle pour leurs faibles populations. © Francisco Peña.

Outre ces espèces, il en existe d'autres qui, bien qu'elles se situent à un niveau de conservation plus favorable, sont particulièrement touchées par ce problème, selon des données recueillies dans d'autres parties du monde (Lehman et al., 2007 ; Prinsen et al., 2011a ; Eccleston & Harness, 2018) ; ainsi, cela pourrait sérieusement affecter leurs populations au niveau local ou régional. Ce groupe comprend **l'aigle de Bonelli**, **l'aigle royal**, **l'aigle ravisseur (*Aquila rapax*)**, **la buse féroce**, **le faucon lanier**, **le Grand-duc du désert** et **la cigogne blanche**, toutes avec des cas déjà enregistrés en Afrique du Nord (Godino et al., 2016) ou dans d'autres parties du continent (Taylor, 2015). Le **corbeau commun (*Corvus corax*)** et le **corbeau du désert (*Corvus ruficollis*)** figureraient également sur la liste des oiseaux atteints, en raison de leurs caractéristiques morphologiques et comportementales. Le **vautour fauve**, presque disparu en Afrique du Nord en tant que reproducteur, mais commun dans les mouvements migratoires (Botha et al., 2017), pourrait voir le potentiel de recolonisation de ses anciennes aires de reproduction nord-africaines compromis par ce facteur.

Les groupes les plus sensibles aux **collisions** sont les oiseaux des steppes et les oiseaux des zones humides en général.

➔ *Oiseaux des steppes*. Non seulement ils sont sensibles aux collisions, mais également à la modification de l'habitat découlant de l'introduction de lignes électriques sur leurs territoires.

- La **grande outarde** (*Otis tarda*), espèce classée « Vulnérable » (BirdLife International, 2017g) a montré que les collisions constituaient un grave problème pour ses dernières populations nord-africaines (Alonso et al., 2015, UICN & HCEFLCD, 2016) (Photo 7-17).
- L'**outarde houbara d'Afrique** (*Chlamydotis undulata*), classée « Vulnérable » (BirdLife International, 2016b) et l'**outarde canepetière** (*Tetrax tetrax*), sont deux espèces dont les populations connaissent un déclin.

Photo 7-17. Les collisions avec les lignes électriques sont l'une des principales menaces des dernières grandes outardes (*Otus tarda*) nord-africaines. © Daniel Burón.

➔ *Oiseaux des zones humides*. Ils sont représentés par un grand nombre d'espèces en Afrique du Nord, dont les zones humides abritent non seulement d'importantes populations reproductrices, mais également d'importants contingents d'oiseaux hivernants provenant d'Europe.

- Le groupe de **limicoles** pourrait être considéré comme le plus sensible de cette zone géographique, en particulier les espèces hivernantes (barges, courlis, bécassines, etc.).

Les oiseaux les plus sensibles aux collisions sont les oiseaux des steppes et les oiseaux des zones humides.

- Le groupe d'**anatidés**, avec des populations reproductrices appartenant à deux espèces menacées au niveau mondial selon la Liste rouge de l'UICN™, l'**érismaure à tête blanche** (*Oxyura leucocephala*) (Photo 7-18), espèce classée « En danger » (BirdLife International, 2017h) et la **marmaronette marbrée** (*Marmaronetta angustirostris*), espèce classée « Vulnérable » (BirdLife International, 2017d).
- L'**ibis chauve** (mentionné précédemment).
- Le **flamant rose** (*Phoenicopterus roseus*), qui regroupe d'importants contingents dans plusieurs zones humides de la région et dont la population méditerranéenne se comporte comme une métapopulation (Balkiz, 2006), de sorte qu'un effet local important pourrait avoir un impact à l'échelle régionale.
- La **grue cendrée** (*Grus grus*) qui, même si elle ne se reproduit pas dans cette région, elle y hiverne en nombre important (Alonso et al., 2016).
- Selon les données acquises dans d'autres parties du monde, les hérons, les laridés et les cigognes sont d'autres groupes d'espèces sensibles (Prinsen et al., 2011a ; Bernardino et al., 2018).

Photo 7-18. L'érismature à tête blanche (*Oxyura leucocephala*), espèce classée « En danger » dans le monde entier, conserve des populations en Afrique du Nord. © Íñigo Fajardo.

8

Collecte
et analyse des
informations
sur les lignes
électriques
dangereuses

8.1. COLLECTE D'INFORMATIONS SUR LE TERRAIN : PROCÈS-VERBAUX ET FORMULAIRES DE SAISIE DE DONNÉES

Le point de départ pour adopter des mesures visant à réduire la mortalité causée par les lignes électriques est de disposer de données indiquant où et comment agir. L'efficacité des mesures à adopter et leur rapport coûts/bénéfices sont directement liés à la qualité des données initiales recueillies dans les études sur le terrain, y compris l'inventaire et le suivi des populations d'oiseaux existantes.

Photo 8-1.

Le système de collecte d'informations sur le terrain et son traitement doivent être normalisés et centralisés. Caractérisation de lignes électriques au Maroc. © Justo Martín.

Compte tenu du grand nombre de détails techniques et de lignes électriques et pylônes pouvant nécessiter une évaluation, il est essentiel de disposer d'un système de saisie et de traitement de l'information normalisé, de sorte qu'il soit homogène, comparable et utilisable de manière égale, quelle que soit la personne qui recueille les données et l'endroit où elles sont obtenues (Photo 8-1).

L'efficacité des mesures à adopter et leur rapport coûts/bénéfices sont directement liés à la qualité des données dont on dispose, y compris celles sur les populations d'oiseaux.

Pour cela, le meilleur moyen consiste à concevoir des protocoles pour la saisie de ces informations en créant des procès-verbaux ou des fiches de saisie, aussi bien pour l'identification et la caractérisation des lignes électriques et des pylônes dangereux, que pour le relever des accidents, en faisant figurer les informations de base suivantes :

Données générales. Informations élémentaires pour identifier le document, la personne qui recueille les informations, le lieu, etc.

- ➔ *Code d'identification.* Bien que cela ne soit pas essentiel *a priori*, il est conseillé de disposer d'un code pour l'identification ultérieure du document.
- ➔ *Personne recueillant les informations.* Nom complet et mode de contact (téléphone, courrier électronique).
- ➔ *Date et heure.*
- ➔ *Identification de l'endroit.* Nom du lieu, commune, espace naturel, etc.
- ➔ *Habitat.* Type d'habitat général : forêt, garrigue, culture herbacée, culture arboricole, etc.

- ➔ *Localisation.* Coordonnées géographiques obtenues par GPS (ou App équivalente pour smartphone) du pylône ou du lieu de l'accident (Photo 8-2). Il est conseillé d'utiliser le même système, UTM ou latitude et longitude, afin de faciliter le traitement ultérieur des informations. Si vous utilisez des coordonnées UTM, il faut veiller à ce que le système de référence utilisé et le fuseau géographique soient corrects. La précision maximale possible des informations est nécessaire ; des erreurs de quelques dizaines de mètres peuvent conduire à des identifications erronées des pylônes, entraînant alors des erreurs dans l'exécution des travaux de correction. En raison de l'extension et la facilité d'utilisation, le plus pratique est le système de coordonnées géographiques mondial WGS84 (celui utilisé par *Google Earth*).

Photo 8-2. La géo-localisation des données doit être aussi précise que possible, en indiquant toujours le système de référence utilisé. Caractérisation de lignes électriques au Maroc. © Helena Clavero.

Description de la faune affectée (s'il s'agit d'un accident) (Photo 8-3)

- ➔ *Espèce.*
- ➔ *Nombre de spécimens.*
- ➔ *Sexe.*
- ➔ *Âge.*
- ➔ *État du spécimen* (blessé ou mort).
- ➔ *État de la carcasse* (frais, en décomposition, squelette).
- ➔ *Lésions apparentes* (selon les Tableaux 6.1 et 6.2).

Photo 8-3. Dans le cas de la découverte d'oiseaux, il est important de rechercher sur le terrain des signes pouvant indiquer la cause du décès. Cadavre de cigogne blanche (*Ciconia ciconia*) sur une ligne électrique au Maroc. © Íñigo Fajardo.

Identification et caractérisation de la ligne électrique. La ligne électrique doit être décrite en suivant la terminologie de base décrite dans le premier chapitre de ce manuel.

- ➔ *Titularité de la ligne* (information généralement obtenue *a posteriori*).
- ➔ *Nom de la ligne* (identique à la titularité).
- ➔ *Tension nominale* (si inconnue sur le moment, à remplir plus tard).
- ➔ *Code de la ligne* (figurant sur une plaque ou identification possible plus tard).
- ➔ *Code du pylône* (identique à la ligne électrique).
- ➔ *Description du/des pylônes(s)*. Il est nécessaire d'indiquer le type de traverse, la présence et la disposition des chaînes d'ancrage et des ponts, la présence de sectionneurs ou de transformateur, etc. Dans le cas de plusieurs pylônes, la description doit être individualisée.
- ➔ *Localisation*. Elle est prise au pied du pylône ; s'il s'agit d'un tronçon à risque de collision, les deux points extrêmes de chaque pylône définissant la portée.
- ➔ *Éléments isolants*. S'il s'agit d'un pylône qui a été corrigé, il est nécessaire de décrire la correction et l'état de ses éléments, en accordant une attention particulière aux défaillances.
- ➔ *Éléments dissuasifs*. De même s'il existe des éléments anti-perchage, des supports, des plates-formes, etc.
- ➔ *Éléments de signalisation*. De même s'il existe un quelconque système de balisage anti-collision.

Dans la mesure du possible, les informations doivent être accompagnées de **photographies**, au moins de l'état du cadavre et de ses restes, ainsi que du pylône, du tronçon ou de la ligne électrique. De nombreux appareils photo et téléphones portables permettent l'inclusion d'informations géographiques lors de la prise des images, il est conseillé d'activer cette option (Photo 8-4).

Photo 8-4. Les informations doivent toujours être accompagnées de la prise de photos, avec un appareil photo ou un téléphone portable. Prospection de lignes électriques au Maroc. © Carlos Torralvo.

Les procès-verbaux et les fiches de saisie de données doivent être conçus de manière à ce que leur utilisation par le collecteur d'informations et son interprétation ultérieure soient aussi simples que possible : utilisation de schémas et de dessins, utilisation de cases à cocher « oui/non », espaces spécifiques pour chaque information, etc.

Il est pratique d'inclure un champ pour des « observations » pour y consigner tout aspect intéressant n'ayant pu être renseigné dans les autres parties du procès-verbal ou pour fournir un complément d'information jugé nécessaire. Par exemple, l'existence de nids, leur nombre, l'espèce à laquelle ils appartiennent, leur état, etc., y compris leur emplacement ou une photographie, ou bien s'il y a des références à d'autres accidents pouvant avoir eu lieu dans le passé. Cet espace permet aussi de signaler la présence d'autres lignes électriques à proximité qui pourraient avoir un intérêt, etc.

En complément du procès-verbal ou de la fiche, il est intéressant de joindre des informations complémentaires utiles : glossaire sur les éléments techniques des lignes électriques, personne à contacter chargée de recevoir les informations, adresse (physique ou électronique) pour l'envoi des informations, etc.

Remplir des procès-verbaux et des fiches de saisie implique un grand effort de collecte de données, en plus de parcourir de nombreux kilomètres de lignes électriques à pied.

Ceci est aujourd'hui plus simple et plus efficace grâce aux nouvelles technologies. Certaines **applications mobiles** ont déjà été développées dans certaines parties du monde, permettant la collecte et l'envoi de données directement par téléphone (Harness et al., 2016 ; GREFA, comm. pers. 2018). L'UICN-Med développe une application mobile gratuite (e-faunalert) spécialement conçue pour collecter des données sur les lignes électriques dangereuses pour les oiseaux partout dans le monde, en collaboration avec la *Fundación Amigos del Águila Imperial, Lince Ibérico y Espacios Naturales Privados*, disponible en plusieurs langues (Figure 8-1).

Figure 8-1.

L'utilisation d'applications mobiles facilite la collecte, le contrôle et le traitement des données. Interface d'une application développée par l'UICN-Med.
© Jose María Martínez.

Les **plateformes scientifiques citoyennes** pour la collecte et la consultation de données sur la biodiversité sont également utiles. Les utilisateurs, via le portail Web ou une application mobile, saisissent leurs observations sur le terrain sur la plateforme, lesquelles sont conservées sur les serveurs du développeur pour consultation et utilisation. Ces plates-formes rassemblent les informations fournies en permanence par des millions d'utilisateurs du monde entier, de sorte que la requête de données de mortalité permet d'être utilisée pour détecter des points noirs sur lesquels agir. Actuellement, les plateformes qui comptent le plus grand nombre d'utilisateurs sont *ebird* (<https://ebird.org>), géré par le laboratoire d'ornithologie de l'Université Cornell aux États-Unis, *Observation* (<https://observation.org>), développé par la fondation Observation International, basée aux Pays-Bas, et *iNaturalist* (<https://www.inaturalist.org/>), initiative conjointe de l'Académie des Sciences de la Californie (California Academy of Sciences) et de National Geographic Society.

Une autre utilisation des nouvelles technologies est la révision et la caractérisation des pylônes par le biais de drones (Mulero-Pázmány et al., 2013).

8.2. CRÉATION DE BASES DE DONNÉES

Toutes les informations recueillies, que ce soit par procès-verbal ou par tout autre moyen, **doivent être numérisées et intégrées à une base de données**. Compte tenu de la grande quantité d'informations pouvant être collectée, il est recommandé de les centraliser au maximum, ou du moins de conserver les différentes bases de données existantes (par département, région, espace naturel, etc.), tout en maintenant la même structure de manière à faciliter le transfert et la comparaison des informations de l'une à l'autre.

Les champs affichés de la base de données doivent logiquement coïncider avec ceux saisis sur le procès-verbal, même si d'autres champs peuvent être inclus, tels que la date de correction, la société responsable, la date de révision, etc. Il est recommandé que chaque relevé corresponde à une observation⁴ ou à un pylône spécifique, en fonction de la conception de la base de données. Il est également nécessaire de

⁴ Si un pylône est caractérisé sans incident, ce support n'apparaîtra qu'une fois dans la base de données. Si, en revanche, il s'agit d'un pylône sur lequel différents accidents ont eu lieu au fil du temps, il convient de relever chacun des incidents. Si dans le même épisode il y a plus d'un spécimen de la même espèce, un seul relevé peut être inclus pour tous les spécimens ; si l'épisode affecte plusieurs espèces, un relevé doit être effectué par espèce.

développer un **mode d'emploi** (ou équivalent), pour qu'il n'y ait pas de divergences dans la manière de saisir les informations même si la base de données est gérée par différentes personnes.

Il est important que la base de données soit compatible avec un système d'information géographique.

La base de données peut être conçue via un programme de gestion de bases de données ou à l'aide de feuilles de calcul. L'important est qu'il soit compatible avec un **système d'information géographique (SIG)**, afin de fonctionner directement sous forme cartographique. Un bon outil est QGIS, un SIG à code libre pour les plateformes GNU/Linux, Unix, Mac OS, Microsoft Windows et Android (Figure 8-2) ; il existe d'autres outils gratuits comme GRASS, Saga-gis ou Kosmo. ArcGIS est peut-être le plus célèbre des SIG et offre de plus grandes possibilités, mais sa licence d'utilisation est payante.

Figure 8-2. L'association des informations collectées à un système d'information géographique facilite l'analyse des données et la prise de décision. Interface QGIS, avec cartographie et données associées. © Justo Martín.

Pour visualiser des informations et pour les envoyer ou les recevoir de manière simple en vue d'être utilisées par des personnes ne sachant pas utiliser un SIG, vous pouvez utiliser *Google Earth* et son format .KMZ, vers lequel vous pouvez également exporter les informations traitées avec le SIG.

L'utilisation des SIG permet non seulement de gérer les informations collectées, mais également de les associer à d'autres sources d'informations disponibles pour une consultation libre et gratuite. En l'absence d'informations préalables, ces sources peuvent également être utilisées pour établir un point de départ dans les études.

L'utilisation des SIG permet non seulement de gérer les informations collectées, mais également de les associer à d'autres sources d'informations disponibles.

Outre les informations que chaque pays peut posséder et le type cartographique générique tel que *Google Maps*, *Google Earth*, *Bing Maps* ou *Apple Maps*, il existe deux sources intéressantes pour extraire des informations sur les lignes électriques et les oiseaux dans la région :

- ➔ Le site Web du Réseau européen des gestionnaires de réseau de transport d'électricité (www.entsoe.eu/data/map/) où l'on peut consulter une cartographie des principales lignes électriques en Europe et en Afrique du Nord, y compris celles en construction.
- ➔ L'outil Web de BirdLife International faisant référence aux voies migratoires des oiseaux du bassin méditerranéen, de l'Afrique du Nord ou du Moyen-Orient, **Soaring Bird Sensitivity Mapping Tool** (<https://maps.birdlife.org/MSBtool/>). Bien qu'il ne contienne que des informations sur les oiseaux planeurs, il fournit des détails sur les itinéraires de vol sur lesquels il est possible de chevaucher la cartographie des aires naturelles protégées et des zones importantes pour la conservation des oiseaux (ZICO), d'effectuer des sélections par pays ou par zone géographique, etc.

8.3. TRAITEMENT DES INFORMATIONS : IDENTIFICATION DES ZONES PRIORITAIRES

Étant donné que les lignes électriques s'étendent sur une grande partie de la surface de chaque région ou pays, **il est essentiel de déterminer les zones prioritaires afin de concentrer les efforts sur la recherche des lignes électriques dangereuses et la mise en place de mesures correctives et d'atténuation.** Toujours dans le cas de projets d'installation de nouvelles lignes électriques, il est important de disposer d'informations géographiques de base facilitant les procédures d'évaluation environnementale et la sélection des meilleures options à l'égard de ce problème, ainsi que des exigences techniques et économiques (Photo 8-5).

8.3.1. Espèces et zones prioritaires

Ces domaines prioritaires peuvent être déterminés de plusieurs manières. Une façon simple est d'identifier le nombre d'espèces prioritaires présentes dans les zones importantes pour les oiseaux et la pertinence de leurs populations (CE, 2018). Les espèces prioritaires⁵ seraient celles qui, selon la Liste rouge des espèces menacées de l'UICN™, sont considérées comme menacées (catégories Vulnérable, En danger, En danger critique) aux niveaux mondial, régional ou national. (Figure 8-3).

Photo 8-5.

Il est essentiel de déterminer les domaines dans lesquels concentrer les efforts de recherche et de correction. Paysage du Haut Atlas marocain.
© José Rafael Garrido.

⁵ Les espèces prioritaires peuvent également inclure celles dont la conservation (au sens large du terme) permet d'atteindre des objectifs qui transcendent leur propre conservation, en favorisant la conservation des habitats et d'autres caractéristiques importantes de la biodiversité à différentes échelles géographiques et divers niveaux d'intégration biologique (March et al., 2009).

Figure 8-3. Les zones prioritaires peuvent être définies en fonction de la présence d'espèces qui sont considérées comme menacées selon la Liste rouge des espèces menacées de l'UICN™.

Ces zones peuvent être classées en tant que **zones de priorité I, II ou III**, en fonction de critères d'importance par rapport à l'abondance et la densité provisoire ou permanente des espèces prioritaires qui y sont présentes.

Pour délimiter des zones prioritaires, il est essentiel d'établir des programmes d'inventaire et de surveillance des aires de nidification, d'hivernage et de dispersion des espèces d'oiseaux.

Les zones de **priorité I** correspondraient aux zones internationales importantes pour la conservation des oiseaux, celles de **priorité II** aux zones nationales importantes et celles de **priorité III** aux zones régionales ou locales importantes.

Pour délimiter ces zones, il est essentiel d'établir des programmes d'inventaire et de surveillance des espèces d'oiseaux permettant de déterminer avec précision les zones de nidification, d'hivernage et de dispersion ou de colonie provisoire, qui peuvent ne pas être situées dans des aires protégées ou même être inconnues, comme dans le cas de Guelmin au Maroc.

Le Tableau 8.1 présente certains critères à suivre pour élaborer cette catégorisation.

Tableau 8.1. Niveaux de priorité et types de zones d'importance correspondantes. Source: modifié de CE, 2018.

Niveau de priorité	Type de zones d'importance
Zones de priorité I (ZICO)	<p>« Hotspots » pour plusieurs espèces prioritaires à forte densité d'individus :</p> <ul style="list-style-type: none">• Aires de reproduction clé (au niveau mondial) pour plusieurs espèces prioritaires• Aires de repos• Points intermédiaires des voies de migration• Zones de concentration des voies de migration• Voies de migration importantes• Itinéraires importantes entre les aires de repos et d'alimentation
Zones de priorité II	<p>Zones d'importance nationale pour une ou plusieurs espèces prioritaires :</p> <ul style="list-style-type: none">• Zones de reproduction importantes pour certaines espèces prioritaires• Zones les plus importantes en termes de colonies provisoires• Regroupements d'oiseaux d'intérêt national
Zones de priorité III	<p>Zones importantes d'intérêt régional ou local pour les espèces prioritaires et non prioritaires :</p> <ul style="list-style-type: none">• Voies de déplacement locales• Zones importantes en termes de reproduction, de colonie et de dispersion au niveau local, jouant un rôle de « source » pour les autres zones périphériques à proximité.

Dans les zones prioritaires, les efforts devraient se focaliser sur les points ou les zones où se concentrent les espèces plus sensibles à l'impact des lignes électriques et dont l'état de conservation est le plus préoccupant. Logiquement, les mesures proposées les concerneront, ainsi que le reste des espèces sensibles présentes (Moleón et al., 2007).

8.3.2. Cartes de sensibilité et de risques

Si vous disposez de bonnes informations de départ, vous pouvez créer des cartes de sensibilité et des cartes de risques.

Les **cartes de sensibilité** sont basées sur l'établissement pour chaque espèce d'un indice de sensibilité spécifique, qui pondère et évalue certaines caractéristiques liées à un problème à évaluer. La conjugaison de ces indices aux données sur leur distribution permet d'élaborer des cartes de sensibilité indiquant les **zones où la concentration de ces espèces sensibles est la plus élevée**, en identifiant les zones d'importance différente en fonction de leur sensibilité (élevée, moyenne ou faible). Cette méthodologie a été utilisée, par exemple, pour créer des cartes de sensibilité des oiseaux à la présence de parcs éoliens, en tant qu'outil d'aide à la planification de nouvelles installations et à la conservation de l'avifaune (Garthe & Hüppop, 2004 ; Bright et al., 2008 ; McGuinness et al., 2015).

Dans le cas des lignes électriques, il existe des exemples d'élaboration de cartes de sensibilité aux électrocutions (Pérez García, 2014) et aux collisions (REE, 2017), établissant l'indice de sensibilité sur la base de caractéristiques telles que l'état de conservation, l'anatomie, le comportement, les préférences, l'utilisation de l'habitat, etc.

Si, en plus des informations sur la répartition des espèces sensibles, nous disposons d'informations sur les accidents avec des lignes électriques et sur les facteurs qui les déterminent, des **cartes de risque** peuvent être préparées. Cela nécessite des données sur l'utilisation des sols, la topographie, les zones de concentration d'oiseaux (sites d'enfouissement des déchets, zones humides, points d'eau, etc.) ou la fréquence des brouillards (en cas de collision) (Photo 8-6).

L'association des cartes de sensibilité et des cartes de risques permet d'identifier les zones prioritaires pour la correction ou la protection des oiseaux contre les lignes électriques, et offre une plus grande précision lors de la définition des zones les mieux adaptées à l'installation de nouvelles lignes et les critères pour y procéder.

Photo 8-6. La connaissance de la communauté d'oiseaux d'un lieu permet de déterminer les zones à plus haut risque. Le milan royal (*Milvus milvus*), une espèce présente mais peu fréquente en Afrique du Nord. © Justo Martín.

8.3.3. Lignes et pylônes prioritaires

Une fois les zones prioritaires et/ou à risque déterminées, si nous disposons d'une base cartographique numérique du territoire et des lignes électriques présentes, nous pourrions également **hiérarchiser les pylônes sur lesquels agir**. Il faut se souvenir qu'un faible nombre d'entre eux concentrent la plupart des électrocutions, de sorte que leur identification présente un intérêt primordial pour concentrer les efforts sur ces derniers.

Cette identification peut être réalisée à l'aide de **modèles prédictifs** qui, en s'appuyant sur des variables liées au type de pylône (type d'isolateur, présence et mise en place de ponts, etc.) et à leur localisation (habitat, topographie), permettent de catégoriser la dangerosité des pylônes et, par conséquent, la sélection de ceux potentiellement plus dangereux (de la Cova, 1997 ; Tintó et al., 2010 ; Guil et al., 2011 ; Dwyer et al., 2014 ; Hernández-Lambrano et al., 2018 ; Mojica et al., 2018).

Les modèles prédictifs qui incluent les caractéristiques du pylône fonctionnent très bien, mais ont pour inconvénient de collecter une grande quantité d'informations très détaillées, de sorte que leur utilisation à des échelles géographiques plus ou moins grandes est compliquée. De plus, dans ces cas, il semble que d'autres facteurs, tels que l'utilisation des sols, la densité des lignes électriques et l'abondance des barrages, pourraient être encore plus importants pour évaluer la mortalité et donc sélectionner les domaines d'action prioritaires (Pérez-García, 2014 ; Guil et al., 2015).

Photo 8-7.
Pour les points noirs,
il est nécessaire
d'établir un plan d'action
indiquant les priorités
et l'ordre d'exécution.
Ligne électrique
avec accumulation
d'électrocutions
dans la région de
Guelmin (Maroc).
© Daniel Burón.

Dans le cas des points noirs comportant des taux de mortalité élevés et une concentration importante de pylônes potentiellement dangereux sur lesquels il est nécessaire de hiérarchiser les actions (pour des raisons opérationnelles ou en raison d'un manque de ressources économiques), **il est conseillé de concevoir un plan d'action établissant ces priorités** (Photo 8-7).

Les critères pour la priorisation des pylônes à corriger pourraient être comme suit (selon le plan d'action élaboré pour les corrections dans la zone de Guelmin, UICN, CAGPDS & HCEFLCD, 2018) :

- 1) Taux de mortalité (nombre d'individus électrocutés retrouvés sur le pylône).
- 2) Utilisation du pylône comme lieu de pose.
- 3) Proximité du pylône avec d'autres supports répondant aux critères précédents.
- 4) Configuration du pylône, selon les critères spécifiques qui déterminent sa dangerosité intrinsèque pour les oiseaux.

8.3.4. Zones principales et secondaires pour les nouvelles lignes

En ce qui concerne l'installation de nouvelles lignes électriques, il est conseillé d'avoir une **cartographie** comportant au moins deux catégories :

- ➔ *Zones principales.* Zones dans lesquelles il convient d'éviter autant que possible l'établissement de lignes électriques ; si cela n'est pas possible, envisager l'installation de lignes électriques souterraines ou à câbles torsadés. Si les câbles nus sont la seule possibilité, ces zones doivent être considérées comme des zones secondaires.
- ➔ *Zones secondaires.* Zones dans lesquelles les tracés nouvellement créés évitent les points particulièrement sensibles pour les espèces et leurs habitats, en s'efforçant de rendre le parcours le plus court possible. Dans ces zones, il convient d'utiliser des pylônes sûrs pour les nouvelles installations et des revêtements isolants sur les pylônes ne correspondant pas à de nouvelles installations, en signalant par des balises les portées potentiellement plus dangereuses. Il est conseillé également d'éviter les tracés près des rivières et des zones humides et leurs traversées, les crêtes, les coteaux et les falaises et leurs environs, et éviter les tracés dans les zones forestières et les steppes d'intérêt pour les oiseaux.

Cette catégorisation peut être faite sur l'ensemble du territoire ou bien au niveau des zones les plus intéressantes pour les oiseaux. Cela concernerait au départ les espaces naturels déclarés protégés par les législations nationales ou régionales, auxquels il conviendrait d'ajouter, si ce n'est pas déjà fait, les ZICO selon les critères de BirdLife International (Photo 8-8).

Pour l'installation de nouvelles lignes électriques, il est conseillé d'avoir une cartographie comportant au moins des zones principales, à éviter, et des zones secondaires où des pylônes sûrs seront utilisés.

En outre, il convient d'inclure d'autres zones qui, ne faisant pas partie des zones mentionnées, présentent les caractéristiques suivantes, favorables à la présence de communautés d'oiseaux, avec des espèces d'intérêt :

- ➔ Rochers, isolés ou dans des zones montagneuses.
- ➔ Corridors migratoires (« goulets d'étranglement »).
- ➔ Dortoirs communautaires.
- ➔ Autres zones où des concentrations d'oiseaux peuvent se produire de manière régulière, provisoire ou saisonnière (décharges de déchets, certaines zones agricoles, etc.).

À l'évidence, pour la détermination de ces zones, les programmes d'inventaire et de surveillance mentionnés ci-dessus sont essentiels.

Photo 8-8. Le réseau d'espaces naturels protégés devrait faire partie des domaines prioritaires pour étudier et résoudre le problème des lignes électriques et des oiseaux. Parc national de Jebel Zaghouan (Tunisie). © Justo Martín.

9

Bases pour un plan d'action

Photo 9-1. La résolution finale du problème entre les lignes électriques et les oiseaux passe par l'élaboration et la mise en œuvre d'un plan d'action spécifique. Buse féroce (*Buteo rufinus*). © Justo Martín.

Étant donné l'ampleur et la complexité du problème de l'impact des lignes électriques sur les oiseaux, sa résolution finale implique l'adoption de diverses mesures permettant une approche intégrée et efficace.

Idéalement, cet ensemble de mesures devrait être mis en œuvre de manière systématique et ordonnée par le biais d'un **Plan d'action visant à prévenir et à éviter l'impact des lignes électriques sur l'avifaune**, où leur échelle spatiale et temporelle ainsi que les modalités et les délais d'exécution seraient détaillés (Photo 9-1). Il incomberait à l'État, à travers les différentes administrations impliquées (environnement, industrie, énergie, urbanisme, aménagement du territoire), d'initier sa conception et son élaboration, en collaboration avec les sociétés d'électricité et la société civile à travers les ONG impliquées dans la conservation de la nature.

Ce plan d'action devrait au moins contenir les mesures présentées ci-après (d'après Antal, 2010 ; Prinsen et al., 2011a ; BirdLife International, 2015 ; Dwyer et al., 2017 ; CE, 2018).

9.1. MISE EN PLACE D'UN CADRE JURIDIQUE SPÉCIFIQUE ET APPROPRIÉ

Il est de la plus haute importance qu'au niveau étatique des lois spécifiques soient promulguées, incluant en particulier :

- ➔ De manière générale, la **protection des oiseaux** contre les effets négatifs des lignes électriques, en considérant l'adoption de mesures préventives les plus appropriées dans chaque cas.
- ➔ **L'obligation d'adopter des configurations plus sûres** pour les oiseaux sur les futures lignes électriques, de sorte qu'aucune installation de systèmes d'isolation ne soit nécessaire, à l'exception des cas où cela n'est pas possible.
- ➔ **L'obligation d'agir sur les lignes électriques et pylônes existants lorsqu'ils ont été identifiés comme dangereux** suite aux données recueillies, ceci en définissant un délai maximum raisonnablement court pour assurer l'adoption rapide des mesures correctives nécessaires.
- ➔ La prise en compte des aspects relatifs à la protection des oiseaux dans les procédures de légalisation et de révision des lignes électriques au même niveau que les aspects techniques et de sécurité, en prévoyant que la non-adoption des mesures proposées, une mauvaise application ou un mauvais entretien, constituent des raisons de cessation d'exploitation et d'utilisation de la ligne électrique.

Photo 9-2.

Un plan d'action efficace doit être convenu entre l'administration et les sociétés d'électricité. Lignes électriques en Tunisie. © Íñigo Fajardo.

La mise en place d'un cadre réglementaire présentant ces caractéristiques est important, mais pas essentiel pour la mise en œuvre du Plan d'action. Il suffirait d'établir des protocoles de travail et d'action reprenant le contenu de base de ces points, convenus entre l'administration et les sociétés d'électricité, avec l'engagement ferme de la part de tous les acteurs impliqués dans la mise en œuvre du Plan (Photo 9-2).

La mise en place de protocoles de travail entre l'administration et les sociétés d'électricité, avec l'engagement ferme de la part de tous les acteurs impliqués, est essentielle pour la mise en œuvre d'un Plan d'action.

9.2. INCLUSION DE L'IMPACT DES LIGNES ÉLECTRIQUES SUR LES OISEAUX DANS LA PLANIFICATION ENVIRONNEMENTALE GÉNÉRALE

Le problème des lignes électriques et des oiseaux devrait être inclus dans la planification environnementale générale de l'État afin qu'il soit présent lors de la préparation des futurs plans de développement économique. Pour cela, il est nécessaire de suivre les étapes suivantes :

- 1) La création du **registre national des lignes électriques dangereuses** pour les oiseaux, sur la base des données collectées sur le terrain.
- 2) L'identification et la délimitation des **zones à risque, sensibles et/ou prioritaires**, sur la base de l'analyse des données recueillies dans le registre national.
- 3) L'identification des **itinéraires optimaux** pour le déploiement de nouvelles lignes électriques sur la base de critères techniques, économiques et écologiques, en tenant compte à la fois de la présence d'aires protégées et des facteurs qui influent sur le taux d'accidents d'oiseaux sur des lignes électriques.

Ainsi, le développement du réseau électrique avec un impact minimal sur la richesse ornithologique du pays serait garanti (Photo 9-3).

Photo 9-3. L'objectif final du plan d'action est de mettre en place un réseau électrique avec le moins possible d'impact sur la richesse ornithologique du pays. Inspection de lignes électriques dans le sud du Maroc. © Íñigo Fajardo.

9.3. IDENTIFICATION DES SITES ET DES ESPÈCES PRIORITAIRES

Le registre national des lignes électriques dangereuses et leur analyse permettraient de déterminer les zones et les espèces prioritaires sur lesquelles concentrer les efforts d'application de mesures correctives, aussi bien sur les lignes électriques existantes que sur celles à venir, en établissant également une hiérarchie pour les différentes actions à mener.

9.4. DÉVELOPPEMENT DE PLANS DE SENSIBILISATION ET DE FORMATION

L'un des aspects clés consiste à concevoir et à mettre en œuvre un plan de sensibilisation et de formation prenant en compte tous les acteurs susceptibles d'être impliqués dans ce problème. Le plan doit avoir un calendrier clairement défini et être mis à jour régulièrement. Ce plan est particulièrement nécessaire à deux niveaux, celui des techniciens de l'administration publique et des techniciens et ouvriers des sociétés d'électricité, mais la société civile devrait également y être incluse.

Photo 9-4.

La formation du personnel technique spécialisé de l'administration et pleinement dévoué au problème des lignes électriques et des oiseaux est essentielle. Stage pratique sur le terrain au Maroc en 2018. © Justo Martín.

Formation du personnel technique de l'administration. Comme dans d'autres axes d'action propres, l'administration de l'environnement devrait disposer d'un personnel technique à plein temps spécialement formé à ce problème, en associant les connaissances techniques liées aux lignes électriques et celles à caractère naturaliste et scientifique sur les oiseaux, leur biologie et leur comportement (Photo 9-4).

La formation doit être étendue à d'autres fonctionnaires, responsables aussi bien de l'administration environnementale que d'autres, dont le travail peut y être associé : le corps de gardes forestiers, le corps des ingénieurs, le corps des avocats de l'État, etc. Chacun d'entre eux doit avoir un plan de formation spécifique.

Formation du personnel technique et des ouvriers des sociétés d'électricité. Toutes les personnes participant au montage et à la modification de lignes électriques doivent suivre une formation spécifique sur les problèmes de ces structures vis-à-vis

des oiseaux. Cette formation doit être dispensée au moyen de plans de formation spécifiques garantissant la connaissance du problème, les différentes mesures de prévention et d'atténuation existantes, leur efficacité et les bonnes pratiques en matière d'utilisation et d'installation. En plus de garantir une installation correcte et la vérification des mesures, cette formation sera également utile pour pouvoir rendre compte précisément des accidents d'animaux survenus sur les installations, y compris pour remplir leurs propres procès-verbaux d'incident, à l'aide des modèles de formulaire établis, voire des applications mobiles existant à cet effet (Photo 9-5).

Photo 9-5. La sensibilisation et la formation des techniciens des sociétés d'électricité sont une priorité pour assurer le succès des mesures à mettre en œuvre. Réunion de travail lors de l'atelier organisé en Tunisie en 2017. © Justo Martín.

9.5. MISE EN PLACE DE PLANS DE CONTRÔLE ET DE SUIVI

En complément de la formation, il devrait exister des mécanismes de contrôle couvrant à la fois la bonne mise en œuvre des mesures préventives et correctives, ainsi que le suivi de leur état et de leur efficacité, en utilisant toujours des protocoles normalisés.

Mise en place de protocoles de vérification. Il est particulièrement important qu'il existe des mécanismes pour contrôler et vérifier l'application des mesures préventives et d'atténuation. Outre les travaux effectués par les sociétés d'électricité conformément à leurs normes et critères de qualité, un suivi devrait être mis en œuvre de la part de l'administration par le biais de techniciens spécialisés.

Des mécanismes de contrôle et de suivi des mesures préventives et correctives, ainsi que de leur état et efficacité, doivent être établis suivant des protocoles normalisés.

Établissement de révisions régulières. Les mesures appliquées ayant un caractère provisoire devraient faire l'objet d'un plan de révisions régulières permettant d'évaluer leur état et d'empêcher leur détérioration. Ce plan pourrait être associé au suivi de son efficacité. La périodicité doit être au moins identique à l'inspection de l'état et de la sécurité de la ligne électrique elle-même, et ne pas dépasser trois ans.

Évaluation de l'efficacité des mesures. La mise en place des mesures devrait être complétée par des études visant à évaluer leur efficacité, un aspect particulièrement important dans le cas des mesures anti-collision, où leur effet réel est plus difficile à prévoir (Photo 9-6).

Photo 9-6.
L'application des
mesures devrait être
complétée par des
inspections périodiques
et des études évaluant
leur efficacité.
Inspection d'un pylône
corrigé. © Justo Martín.

9.6. CRÉATION D'UN COMITÉ NATIONAL POUR LES OISEAUX ET LES LIGNES ÉLECTRIQUES

Pour faciliter la communication et la coordination des efforts entre les administrations publiques, les sociétés d'électricité et la société civile (ONG), il serait opportun de créer un comité national où les trois parties seraient représentées.

Ce comité aurait pour fonction principale d'optimiser les efforts visant à réduire l'impact des lignes électriques sur les oiseaux, d'assurer la cohérence entre les actions présentes et futures, et d'établir les priorités de mise en œuvre.

La diffusion des travaux et de leurs résultats, ainsi que l'échange d'expériences entre différentes régions d'un même pays ou de plusieurs pays, relèverait également des fonctions de ce comité. Il existe un comité de ce type en France depuis 2004, le Comité national avifaune (CNA, <http://rapaces.lpo.fr/cna-oiseaux-et-lignes-electriques>), avec des résultats très satisfaisants.

10

Bibliographie

- Alonso, J.C., Alonso, J.A. & Muñoz-Pulido, R. (1994). 'Mitigation of bird collisions with transmission lines through groundwire marking'. *Biological Conservation* 67(2):129–134. [doi.org/10.1016/0006-3207\(94\)90358-1](https://doi.org/10.1016/0006-3207(94)90358-1)
- Alonso, J.C., Palacín, C. & Onrubia, A. (2015). 'Status of the Great Bustard (*Otis tarda*) in Morocco: update 2015'. Museo Nacional de Ciencias Naturales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), España/Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification, Royaume du Maroc.
- Alonso, J.C., Alonso, J.A., Onrubia, A., Cruz, C.M., Cangarato, R. & Rocha, P. (2016). *Assessing four decades of wintering crane counts in Spain, Portugal and Morocco*. Dans : Asociación Amigos de Gallocanta (ed.). *Scientific proceedings of oral and poster contributions*. VII Congrès européen sur la Grue cendrée, Gallocanta, Espagne.
- Amezian, M., Irizi, A., Errati, A., Loran, H., El Khamlichi, R., Morandini, V., González, D. G. & Garrido, J.R. (2015). 'Spanish Imperial Eagles and other eagles found electrocuted in Morocco and proposition of correction measures'. doi.org/10.6084/m9.figshare.1613292
- Angelov, I., Hashim, I. & Oppel, S. (2013). 'Persistent electrocution mortality of Egyptian Vultures *Neophron percnopterus* over 28 years in East Africa'. *Bird Conservation International* 23(1):1-6. doi.org/10.1017/S0959270912000123
- Antal, M. (2010). 'Policy measures to address bird interactions with power lines – a comparative case study of four countries'. *Ostrich* 81(3):217-223. doi.org/10.2989/00306525.2010.517921
- Asistencias Técnicas Clave (1992). *Análisis de impactos de líneas eléctricas sobre avifauna de espacios naturales protegidos. Manual para la valoración de riesgos y soluciones*. Sevillana de Electricidad, Iberdrola, Red Eléctrica Española (eds.).
- Avian Power Line Interaction Committee (2006). *Suggested practices for avian protection on power lines: the state of the art in 2006*. Washington, D.C. et Sacramento, États-Unis : Edison Electric Institute, Avian Power Line, Interaction Committee et California Energy Commission.

- Avian Power Line Interaction Committee (2012). *Reducing avian collisions with power lines: the state of the art in 2012*. Washington, D.C. et Sacramento, États-Unis : Edison Electric Institute, Avian Power Line, Interaction Committee et California Energy Commission.
- Balkiz, Ö. (2006). *Dynamique de la métapopulation de flamants roses en Méditerranée : implications pour la conservation*. Thèse de doctorat. Université Montpellier II, Montpellier, France.
- Balmori, A. (2015). 'Anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields as an emerging threat to wildlife orientation'. *Science of the Total Environment* 518-519:58-60. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.077
- Barrientos, R., Alonso, J.C., Ponce, C. & Palacín, C. (2011). 'Meta-analysis of the effectiveness of marked wire in reducing avian collisions with power lines'. *Conservation Biology* 25(5):893–903. doi.org/10.1111/j.1523-1739.2011.01699.x.
- Barrientos, R., Ponce, C., Palacín, C., Martín, C.A., Martín, B. & Alonso, J.C. (2012). 'Wire marking results in a small but significant reduction in avian mortality at power lines: a BACI designed study'. *PLoS One* 7(3): e32569. doi.org/10.1371/journal.pone.0032569
- Barros, M.I., Brito, J.C., Campos, J.C. et al. (2018). 'The effect of rainfall on population dynamics in Sahara-Sahel rodents'. *Mammal Research* 63(4):485-492. doi.org/10.1007/s13364-018-0377-x
- Bergier, P., Franchimont, J., Thévenot, M. & la Commission d'Homologation Marocaine (2011). 'Rare birds in Morocco: report of the Moroccan Rare Birds Committee (2007-2009)'. *African Bird Club Bulletin* 18:40-60.
- Bernardino, J., Bevanger, K., Barrientos, R., Dwyer, J. F., Marques, A.T., Martins, R.C. & Moreira, F. (2018). 'Bird collisions with power lines: State of the art and priority areas for research'. *Biological Conservation* 222:1-13. doi.org/10.1016/j.biocon.2018.02.029

- Bevanger, K. (1994). 'Bird interactions with utility structures: collision and electrocution, causes and mitigation measures'. *Ibis* 136(4):412–425.
doi.org/10.1111/j.1474-919X.1994.tb01116.x
- Bevanger, K. (1998). 'Biological and conservation aspects of bird mortality caused by electricity power lines: a review'. *Biological Conservation* 86:67–76.
[doi.org/10.1016/S0006-3207\(97\)00176-6](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(97)00176-6)
- Biasotto, L. D. & Kindel, A. (2018). 'Power lines and impacts on biodiversity: A systematic review'. *Environmental Impact Assessment Review* 71:110-119.
doi.org/10.1016/j.eiar.2018.04.010
- BirdLife International (2015). *Guidance on appropriate means of impact assessment of electricity power grids on migratory soaring birds in the Rift Valley/Red Sea Flyway*. Regional Flyway Facility. Amman, Jordan.
migratorysoaringbirds.undp.birdlife.org/sites/default/files/msb_guidance_-_impact_assessment_of_power_grids.pdf
- BirdLife International (2016a). *Aquila fasciata*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: e.T22696076A89510184. doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-3.RLTS.T22696076A89510184.en (Consulté : le 18 août 2018).
- BirdLife International (2016b). *Chlamydotis undulata*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: e.T22728245A90341807. doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-3.RLTS.T22728245A90341807.en (Consulté : le 19 août 2018).
- BirdLife International (2017a). *Aquila adalberti* (amended version of 2016 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T22696042A110743671. doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-1.RLTS.T22696042A110743671.en (Consulté : le 18 août 2018).
- BirdLife International (2017b). *Geronticus eremita* (amended version of 2016 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T22697488A118847366. doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T22697488A118847366.en (Consulté : le 18 août 2018).

- BirdLife International (2017c). *Gyps rueppelli* (amended version of 2016 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T22695207A118595083. dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T22695207A118595083.en (Consulté : le 18 août 2018).
- BirdLife International (2017d). *Marmaronetta angustirostris* (amended version of 2016 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T22680339A110054350. doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-1.RLTS.T22680339A110054350.en (Consulté : le 19 août 2018).
- BirdLife International (2017e). *Milvus milvus* (amended version of 2016 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T22695072A110921280. doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-1.RLTS.T22695072A110921280.en (Consulté : le 18 août 2018).
- BirdLife International (2017f). *Neophron percnopterus* (amended version of 2016 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T22695180A118600142. doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T22695180A118600142.en (Consulté : le 18 août 2018).
- BirdLife International (2017g). *Otis tarda*. The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T22691900A119044104. doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T22691900A119044104.en (Consulté : le 19 août 2018).
- BirdLife International (2017h). *Oxyura leucocephala*. The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T22679814A119403602. doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T22679814A119403602.en (Consulté : le 19 août 2018).
- Borner, L., Duriez, O., Besnard, A., Robert, A., Carrere, V. & Jiguet, F. (2017). 'Bird collision with power lines: estimating carcass persistence and detection associated with ground search surveys'. *Ecosphere* 8(11), e01966.

- Boshoff, A.F., Minnie, J.C., Tambling, C.J. & Michael, M.D. (2011). 'The impact of power line-related mortality on the Cape Vulture *Gyps coprotheres* in a part of its range, with an emphasis on electrocution'. *Bird Conservation International* 21(3): 311-327. doi.org/10.1017/S095927091100013X
- Botha, A.J., Andevski, J., Bowden, C.G.R., Gudka, M., Safford, R.J., Tavares, J. & Williams, N.P. (2017). 'Multi-species Action Plan to Conserve African-Eurasian Vultures (Vulture MsAP)'. CMS Raptors MOU Technical Publication No. 5. CMS Technical Series No. 35. Coordinating Unit of the CMS Raptors MOU, Abu Dhabi, United Arab Emirates.
- Bright, J., Langston, R., Bullman, R., Evans, R., Gardner, S. & Pearce-Higgins, J. (2008). 'Map of bird sensitivities to wind farms in Scotland: a tool to aid planning and conservation'. *Biological Conservation* 141(9):2342-2356. doi.org/10.1016/j.biocon.2008.06.029.
- Cerezo, E., Aledo, E. & Manso, A. (2010). *Patrimonio Natural y Líneas Eléctricas en la Región de Murcia*. Serie técnica nº 8. Proyecto LIFE06NAT/E/000214 Corrección de tendidos eléctricos peligrosos en Zonas de Especial Protección para las Aves de la Región de Murcia. Dirección General de Patrimonio Natural y Biodiversidad. Consejería de Agricultura y Agua. Región de Murcia, Murcia. www.murcianatural.carm.es/europa/life00214/pdf/documentacion/Manual_tendidos.pdf
- Commission européenne (2018). *Guidance on Energy Transmission Infrastructure and EU nature legislation*. Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg. ec.europa.eu/environment/nature/natura2000/management/docs/Energy_guidance_and_EU_Nature_legislation.pdf
- de la Cova, R.R.L. (1997). *Impacto de los tendidos eléctricos sobre la avifauna en Castilla-La Mancha. Determinación de un índice de valoración de la peligrosidad de tendidos eléctricos para aves rapaces*. Actes II Congrès forestier espagnol, 23-27 juin. Pamplona, Espagne.

- de Pablo, F. (2017). *Electrocución de aves en tendidos eléctricos en Reserva de la Biosfera de Menorca. Años 2016-17. Informe técnico 06/2017*. Departament de Medi Ambient i Reserva de Biosfera. Consell Insular de Menorca.
- Demerdzhiev, D.A. (2014). 'Factors influencing bird mortality caused by power lines within Special Protected Areas and undertaken conservation efforts'. *Acta zoologica Bulgarica* 66(2):411-423.
- Demeter, I. (2004). *Medium-voltage power lines and bird mortality in Hungary*. MME BirdLife Hungary, Budapest, Hungary.
- Demeter, I., Horváth, M., Nagy, K., Görögh, Z., Tóth, P., Bagyura, J., Solt, S., Kovács, A., Dwyer, J.F. & Harness, R.E. (2018). 'Documenting and reducing avian electrocutions in Hungary: a conservation contribution from citizen scientists'. *The Wilson Journal of Ornithology*, 130(3):600–614. doi.org/10.1676/17-031.1
- Departamento de Medio Ambiente del Gobierno de Aragón (2004). *Soluciones constructivas para la protección de la avifauna en instalaciones eléctricas aéreas de distribución (<20 Kv)*. Proyecto LIFE-Naturaleza (LIFE04NAT/E/0034) para la Adecuación de Tendedos eléctricos en las ZEPAs de Aragón.
- Derouaux, A., Everaert, J., Brackx, N., Driessens, G., Martin Gil, A. & Paquet, J.-Y. (2012). *Reducing bird mortality caused by high- and very-high voltage power lines in Belgium, Final report*. Elia and Aves-Natagora.
- Dixon, A., Rahman, M.L., Galtbalt, B., Gunga, A., Sugarsaikhan, B. & Batbayar, N. (2017). 'Avian electrocution rates associated with density of active small mammal holes and power-pole mitigation: Implications for the conservation of Threatened raptors in Mongolia'. *Journal for nature conservation* 36:14-19. doi.org/10.1016/j.jnc.2017.01.001
- Drewitt, A.L. & Langston, R.H.W. (2008). 'Collision effects of wind-power generators and other obstacles on birds'. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1134: 233–266. doi.org/10.1196/annals.1439.015.

- Dwyer, J.F. (2009). 'Raptor electrocution: a case study on ecological traps, sinks, and additive mortality'. *Journal of Natural Resources and Life Sciences Education* 38:93-98. doi.org/10.4195/jnlise.2009.0002u
- Dwyer, J.F., Harness, R.E. & Donohue, K. (2014). 'Predictive model of avian electrocution risk on overhead power lines'. *Conservation Biology* 28(1):159-168. doi.org/10.1111/cobi.12145
- Dwyer, J.F., Harness, R.E. & Eccleston, D. (2017). 'Avian electrocutions on incorrectly retrofitted power poles'. *Journal of Raptor Research* 51(3):293-304. doi.org/10.3356/JRR-16-93.1
- Eccleston, D.T. & Harness, R.E. (2018). 'Raptor Electrocutions and Power Line Collisions'. Dans : Sarasola, J.H., Grande, J.M. & Negro, J.J (eds.). *Birds of Prey. Biology and conservation in the XXI century*, pp. 273-302. Springer. doi.org/10.1007/978-3-319-73745-4_12
- EirGrid (2013). *SEA Statement of the GRID25: Implementation Programme 2011–2016. Strategic Environmental Assessment*. Dublin, Irlande.
- Eskom-EWT Strategic Partnership (2011). *Data from Central Incident Register*. Non publié.
- Fajardo, I. (1998). Selección y uso del hábitat por la lechuza común, *Tyto alba* (Aves, Strigiformes), en la Iberia Mediterránea. Implicaciones en la Conservación. Thèse de doctorat. Université Complutense de Madrid, Madrid, Espagne.
- Fajardo, I. & Zorrilla, I. (2016). *Manual de técnica policial ambiental. Identificación in situ de causas de muerte en fauna silvestre*. Séville, Espagne : Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.
- Faure, R. (1988). 'Electricité de France et le génocide des oiseaux'. *L'Oiseau et la Revue française d'ornithologie* 10:16-23.
- Ferrer, M. (2012). *Aves y tendidos eléctricos. Del conflicto a la solución*. Endesa S.A. et Fundación Migres, Séville.

- Ferrer, M. & Hiraldo, F. (1992). 'Man-induced sex-biased mortality in the Spanish imperial eagle'. *Biological Conservation* 60:57-60.
- Fox, N. & Wynne, C. (2010). 'The impact of electrocution on the New Zealand falcon (*Falco novaeseelandiae*)'. *Notornis* 57:71–74.
- Gangoso, L. & Palacios, C.J. (2002). 'Endangered Egyptian Vulture (*Neophron percnopterus*) entangled in a power line ground-wire stabilizer'. *Journal of Raptor Research* 36(3):238-239.
- Garrido, J.R. & Fernández-Cruz, M. (2003). 'Effects of power lines on a White Stork *Ciconia ciconia* population in central Spain'. *Ardeola* 50:191–200.
- Garrido, J.R. & Martín, J. (2015). 'Identificación de tendidos eléctricos peligrosos'. Dans : Fajardo, I.; Martín, J. & Ruiz, A. (eds.). *Manual para la protección legal de la biodiversidad para los agentes de la autoridad ambiental en Andalucía*. Troisième édition, révisée, corrigée et augmentée. Séville, Espagne : Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.
- Garrido, J.R., Barrios, V., Numa, C., Dwyer, J.F. & Harness, R.E. (2018a). *No pole design without effective mitigation techniques is safe for raptors in Morocco*. Présenté au congrès annuel de la Raptor Research Foundation, 12-16 November 2018. Skukuza, Kruger National Park, Afrique du Sud.
- Garrido, J.R., Martín, J., Fajardo, I., Dwyer, J.F. & Harness, R.E. (2018b). *Lessons to improve retrofitting: Quantifying bird electrocutions on retrofitted pylons*. Présenté au congrès annuel de la Raptor Research Foundation, 12-16 November 2018. Skukuza, Kruger National Park, Afrique du Sud.
- Garthe, S. & Hüppop, O. (2004). 'Scaling possible adverse effects of marine wind farms on seabirds: developing and applying a vulnerability index'. *Journal of applied Ecology* 41(4):724-734. doi.org/10.1111/j.0021-8901.2004.00918.x.

- Godino, A., Garrido, J.R., El Khamlichi, R., Burón, D., Machado, C., Amezian, M., Irizi, A., Numa, C. & Barrios, V. (2016). *Identification de la mortalité des rapaces par électrocution dans le sud-ouest du Maroc*. Malaga, Espagne : UICN.
- Guil, F., Fernández-Olalla, M., Moreno-Opo, R., Mosqueda, I., Gómez, M.E., Aranda, A. & Margalida, A. (2011). 'Minimising mortality in endangered raptors due to power lines: the importance of spatial aggregation to optimize the application of mitigation measures'. *PLoS One* 6(11), e28212. doi.org/10.1371/journal.pone.0028212
- Guil, F., Colomer, M.À., Moreno-Opo, R. & Margalida, A. (2015). 'Space-time trends in Spanish bird electrocution rates from alternative information sources'. *Global Ecol. Conserv.* 3: 379-388. doi.org/10.1016/j.gecco.2015.01.005.
- Guil, F., Soria, M.À., Margalida, A. & Pérez-García, J.M. (2018). 'Wildfires as collateral effects of wildlife electrocution: An economic approach to the situation in Spain in recent years'. *Science of the Total Environment* 625:460-469. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.242
- Haas, D., Nipkow, M., Fiedler, G., Schneider, R., Haas, W. & Schürenberg, B. (2003). *Protecting birds from power lines: a practical guide on the risks to birds from electricity transmission facilities and how to minimise any such adverse effects*. Council of Europe, Strasbourg, France.
- Harness, R.E., Gombobaatar S. & Yosef, R. (2008). *Mongolian distribution power lines and raptor electrocutions*. Actes de la conférence Rural Electric Power (REPC), 27–30 avril 2008, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp C1.1–C1.6. Washington, D.C./Charleston, États-Unis.
- Harness, R.E., Eccleston, D. & Baker, M. (2016). *Cost-effective avian protection plans using mobile data collection*. Actes de la conférence Rural Electric Power (REPC), 2016, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 85-90. Westminster, Colorado, États-Unis.

- Henderson, I.G., Langston, R.H.W. & Clark, N.A. (1996). 'The response of common terns *Sterna hirundo* to power lines: an assessment of risk in relation to breeding commitment, age and wind speed'. *Biological Conservation* 77(2-3):185–192.
[doi.org/10.1016/0006-3207\(95\)00144-1](https://doi.org/10.1016/0006-3207(95)00144-1)
- Hernández- Lambraño, R.E., Sánchez- Agudo, J.Á. & Carbonell, R. (2018). 'Where to start? Development of a spatial tool to prioritise retrofitting of power line poles that are dangerous to raptors'. *Journal of Applied Ecology* 55(6):2685-2697.
doi.org/10.1111/1365-2664.13200
- Hernández-Matías, A., Real, J., Parés, F. & Pradel, R. (2015). 'Electrocution threatens the viability of populations of the endangered Bonelli's eagle (*Aquila fasciata*) in Southern Europe'. *Biological Conservation* 191:110-116.
doi.org/10.1016/j.biocon.2015.06.028
- Hunting, K. (2002). *A roadmap for PIER research on avian collisions with power lines in California*. Rapport technique P500–02-071F. Sacramento, États-Unis : California Energy Commission.
- Iglesias, J.J. & Álvarez, E. (2016). 'Sorprendentes águilas perdiceras: dos ejemplares cruzaron el Estrecho'. *Quercus* 361:30-33.
- Izquierdo Rosigue, A., Marín Cantarino, C. & Rico Alcaraz, L. (1997). 'Factores técnicos y ambientales implicados en la electrocución de aves en los tendidos eléctricos'. *Informes de la Construcción* 49(451):49-55.
- Janss, G.F.E. & Ferrer, M. (2000). 'Common crane and great bustard collision with power lines: collision rate and risk exposure'. *Wildlife Society Bulletin* 28(3):675–680.
www.jstor.org/stable/3783619.
- Jenkins, A.R., Smallie, J.J. & Diamond, M. (2010). 'Avian collisions with power lines: a global review of causes and mitigation with a South African perspective'. *Bird Conservation International* 20(3):263-278. doi.org/10.1017/S0959270910000122

- Jenkins, A.R., Shaw, J.M., Smallie, J.J., Gibbons, B., Visagie, R. & Ryan, P.G. (2011). 'Estimating the impacts of power line collisions on Ludwig's Bustards *Neotis ludwigii*'. *Bird Conservation International* 21(3):303-310. doi.org/10.1017/S0959270911000128
- Kelly, A. & Kelly, S. (2005). 'Are mute swans with elevated blood lead levels more likely to collide with overhead power lines?' *Waterbirds: The International Journal of Waterbird Biology* 28(3):331–334. [doi.org/10.1675/1524-4695\(2005\)028\[0331:AMSWEB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1675/1524-4695(2005)028[0331:AMSWEB]2.0.CO;2)
- Kibuule, M. & Pomeroy, D. (2015). 'Avian mortality rates on a power line near Kampa-la, Uganda'. *Scopus* 34: 52–55.
- Knott, J., Newbery, P. & Barov, B. (2009). *Action plan for the red kite *Milvus milvus* in the European Union*. BirdLife International for the European Union.
- Kocliert, M.N. & Steenhof, K. (2002). 'Golden eagles in the US and Canada: status, trends, and conservation challenges'. *Journal of Raptor Research*, 36:32-40.
- Lambertucci, S.A. (2007). 'Biología y conservación del Cóndor Andino (*Vultur gryphus*) en Argentina'. *Hornero* 22:149–158.
- Lehman, R.N., Kennedy, P.L. & Savidge, J.A. (2007). 'The state of the art in raptor electrocution research: a global review'. *Biological Conservation* 136(2):159-174. doi.org/10.1016/j.biocon.2006.09.015
- López, J.M., Quevedo, M.A., Sánchez, I., Rodríguez, B., Gimeno, D. & Aguilera, E. (2015). 'Crónica de la reintroducción del «ibis eremita» en Andalucía'. *Quercus* 349:14-23.
- López-López, P., Ferrer, M., Madero, A., Casado, E. & McGrady, M. (2011). 'Solving man-induced large-scale conservation problems: the Spanish imperial eagle and power lines'. *PLoS One* 6(3), e17196. doi.org/10.1371/journal.pone.0017196

- Loss, S.R., Will, T. & Marra, P.P. (2014). 'Refining estimates of bird collision and electrocution mortality at power lines in the United States'. *PLoS One* 9(7), e101565. doi.org/10.1371/journal.pone.0101565
- Luzenski, J., Rocca, C.E., Harness, R.E., Cummings, J.L., Austin, D.D., Landon, M.A. & Dwyer, J.F. (2016). 'Collision avoidance by migrating raptors encountering a new electric power transmission line'. *The Condor* 118(2):402-410. doi.org/10.1650/CONDOR-15-55.1
- Mañosa, S. (2001). 'Strategies to identify dangerous electricity pylons for birds'. *Biodiversity and Conservation* 10:1997-2012.
- March, I.J., Carvajal, M.A., Vidal, R.M., San Román, J.E. & Ruiz, G. (2009). 'Planificación y desarrollo de estrategias para la conservación de la biodiversidad'. *Capital natural de México* 2:545-573.
- Martin, G.R. (2011). 'Understanding bird collisions with man-made objects: a sensory ecology approach'. *Ibis* 153:239-254. doi.org/10.1111/j.1474-919X.2011.01117.x
- Martin, G.R. & Shaw, J.M. (2010). 'Bird collisions with power lines: failing to see the way ahead?' *Biological Conservation* 143(11):2695-2702. doi.org/10.1016/j.biocon.2010.07.014
- Martín Martín, J., Garrido, J.R., Dwyer, J.F. & Aniceto, J.J. (2017). 'Líneas eléctricas peligrosas para las aves. Guía de identificación de correcciones defectuosas'. Sociedad Gaditana de Historia Natural, *El Corzo* 5:56-66.
- Matsyna, A.I. & Matsyna, E.L. (2011). *Protection of birds on the power lines in Russia*. Poster présenté à la conférence internationale « Power Lines and Bird Mortality in Europe », Budapest, Hongrie.
- McGuinness, S., Muldoon, C., Tierney, N., Cummins, S., Murray, A., Egan, S., & Crowe, O. (2015). *Bird sensitivity mapping for wind energy developments and associated infrastructure in the Republic of Ireland*. BirdWatch Ireland, Kilcoole, Wicklow.

- Ministerio para la Transición Ecológica (2018a). *Recomendaciones técnicas para la corrección de los apoyos eléctricos del riesgo de electrocución de aves, para la adaptación de las líneas eléctricas al R.D. 1432/2008*. Madrid: Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural.
- Ministerio para la Transición Ecológica (2018b). *Estrategia Española para la conservación del águila imperial ibérica (Aquila adalberti)*. Madrid: Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural.
- Mojica, E.K., Dwyer, J.F., Harness, R.E., Williams, G.E. & Woodbridge, B. (2018). 'Review and synthesis of research investigating golden eagle electrocutions'. *The Journal of Wildlife Management* 82(3):495-506. doi.org/10.1002/jwmg.21412
- Moleón, M., Bautista, J., Garrido, J.R., Martín-Jaramillo, J., Ávila, E. & Madero, A. (2007). 'Correcting power lines in dispersal areas of Bonelli's eagles: potential positive effects on the raptor community'. *Ardeola* 54(2):319–325.
- Morandini, V., Sayago, C.F., Garrido, J.R., Jiménez, F.J.M., de Diego Collantes, S., Perea, M.G. & Baena, M.F. (2016). 'Águila imperial ibérica: recuperando espacio más allá de las fronteras'. *Quercus* 361:24-29.
- Mulero-Pázmány, M., Negro, J.J. & Ferrer, M. (2013). 'A low cost way for assessing bird risk hazards in power lines: Fixed-wing small unmanned aircraft systems'. *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 2(1):5-15. doi.org/10.1139/juvs-2013-0012
- Negro, J.J. (1999). 'Past and future research on wildlife interactions with power lines'. Dans Ferrer, M. & Janss, G.F. (eds) *Aves y líneas eléctricas*, pp. 21-28. Madrid: Quercus.
- Olendorff, R.R., Miller, A.D. & Lehman, R.N. (1981). 'Suggested practices for raptor protection on power lines – the state-of the-art in 1981'. *Raptor Research Report*, 4. St. Paul, Minnesota: Raptor Research Foundation.
- Palacín, C., Alonso, J.C., Martín, C.A. & Alonso, J.A. (2017). 'Changes in bird-migration patterns associated with human-induced mortality'. *Conservation Biology* 31(1):106-115. doi.org/10.1111/cobi.12758

- Pérez-García, J.M. (2014). *Modelos predictivos aplicados a la corrección y gestión del impacto de la electrocución de aves en tendidos eléctricos*. Thèse de doctorat. Université Miguel Hernández, Elche, Espagne.
- Ponce, C., Alonso, J.C., Argandoña, G., García Fernández, A. & Carrasco, M. (2010). 'Carcass removal by scavengers and search accuracy affect bird mortality estimates at power lines'. *Animal Conservation* 13(6):603–612.
doi.org/10.1111/j.1469-1795.2010.00387.x
- Prinsen, H.A.M., Boere, G.C., Pires, N. & Smallie, J.J. (2011a). *Review of the conflict between migratory birds and electricity power grids in the African-Eurasian region*. Bonn, Allemagne : Série technique de la CMS n° 20, Série technique de l'AEWA n° 20.
- Prinsen, H.A.M., Smallie, J.J., Boere, G.C. & Pires, N. (2011b). *Guidelines on how to avoid or mitigate impact of electricity power grids on migratory birds in the African-Eurasian region*. Bonn, Allemagne : Série technique de la CMS n° 20, Série technique de l'AEWA n° 20.
- Raab, R., Spakovszky, P., Julius, E., Schuetz, C. & Schulze, C.H. (2011). 'Effects of power lines on flight behaviour of the West-Pannonian Great Bustard *Otis tarda* population'. *Bird Conservation International* 21(2):142-155.
doi.org/10.1017/S0959270910000432.
- Raab, R., Schütz, C., Spakovszky, P., Julius, E. & Schulze, C.H. (2012). 'Underground cabling and marking of power lines: conservation measures rapidly reduced mortality of West-Pannonian Great Bustards *Otis tarda*'. *Bird Conservation International* 22(3):299–306. doi.org/10.1017/S0959270911000463
- Ramírez, J., Lebrija, J.J.I., Perea, M.G., de la Cruz, A. & Morandini, V. (2016). 'Lluvias torrenciales y roedores, detrás de la concentración de grandes águilas al sur de Marruecos'. *Quercus* 361:34-37.

- Red Eléctrica Española (2017). *Identificación, caracterización y cartografiado de los corredores de vuelo de las aves que interactúan con las líneas de eléctricas de alta tensión*. Sommaire du projet.
www.ree.es/sites/default/files/page/2017/11/file/corredores-de-vuelo-resumen.pdf
- Renssen, T.A. (1975). *Vogelsterfte in Nederland tengevolge van aanvaringen hoogspanningslijnen*. Rapport. Arnhem, Pays Bas : Dutch Institute for Forestry and Nature Research (IBN-DLO).
- Rioux, S., Savard, J.-P.L. & Gerick, A.A. (2013). 'Avian mortalities due to transmission line collisions: a review of current estimates and field methods with an emphasis on applications to the Canadian electric network'. *Avian Conservation and Ecology* 8(2):7. doi.org/10.5751/ACE-00614-080207
- Rollan, À., Real, J., Bosch, R., Tintó, A. & Hernández-Matías, A. (2010). 'Modelling the risk of collision with power lines in Bonelli's Eagle *Hieraetus fasciatus* and its conservation implications'. *Bird Conservation International* 20:279–294.
doi.org/10.1017/S0959270910000250
- Sarasola, J.H., Grande, J.M. & Negro, J.J. (eds.) (2018). *Birds of Prey: Biology and conservation in the XXI century*. Springer. doi.org/10.1007/978-3-319-73745-4
- Schaub, M., Aebischer, A., Gimenez, O., Berger, S. & Arlettaz, R. (2010). 'Massive immigration balances high anthropogenic mortality in a stable eagle owl population: lessons for conservation'. *Biological Conservation* 143(8):1911–1918.
doi.org/10.1016/j.biocon.2010.04.047
- Shaw, J.M. (2013). *Power Line Collisions in the Karoo Conserving Ludwig's Bustard*. University of Cape Town.
- Shimada, T. (2001). 'Choice of daily flight routes of greater white-fronted geese: effects of power lines'. *Waterbirds: The International Journal of Waterbird Biology* 24(3):425–429. doi.org/10.2307/1522075

- Shobrak, M. (2012). 'Electrocution and collision of birds with power lines in Saudi Arabia: (Aves)'. *Zoology in the Middle East* 57(1):45-52.
doi.org/10.1080/09397140.2012.10648962
- Schulze, C., Peters, M., Baumgärtner, W. & Wohlsein, P. (2016). 'Electrical Injuries in Animals: Causes, Pathogenesis, and Morphological Findings'. *Veterinary Pathology* 53(5):1018 - 1029. doi.org/10.1177/0300985816643371
- Silva, J.P., Santos, M., Queirós, L., Leitão, D., Moreira, F., Pinto, M. & Cabral, J.A. (2010). 'Estimating the influence of overhead transmission power lines and landscape context on the density of little bustard *Tetrax tetrax* breeding populations'. *Ecological Modelling* 221(16):1954-1963. doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.03.027
- Soria, M.A. & Guil, F. (2017). *Primera aproximación general al impacto provocado por la electrocución de aves rapaces: incidencia sobre las aves e impacto económico asociado*. Actes VII Congrès forestier espagnol, 26-30 juin. Plasencia, Espagne.
- Sundar, K.S.G. & Choudhury, B.C. (2005). 'Mortality of sarus cranes (*Grus anti-gone*) due to electricity wires in Uttar Pradesh, India'. *Environmental Conservation* 32(3):260-269. doi.org/10.1017/S0376892905002341
- Taylor, I. (1994). *Barn owls. Predator-prey relationships and conservation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Taylor, M.R. (2015). 'Tawny Eagle *Aquila rapax*'. Dans : Taylor, M.R., Peacock, F. & Wanless, R.M. (eds). *The 2015 Eskom Red Data Book of Birds of South Africa, Lesotho and Swaziland*. Johannesburg, Afrique du Sud : BirdLife Afrique du Sud.
- Thévenot, M., Vernon, R. & Bergier, P. (2003). *The birds of Morocco: an annotated checklist*. Tring, Royaume-Uni : British Ornithologists' Union.
- Tintó, A., Real, J. & Mañosa, S. (2010). 'Predicting and correcting electrocution of birds in Mediterranean areas'. *Journal of Wildlife Management* 74(8):1852-1862.
doi.org/10.2193/2009-521

- Tragsatec (2014). *Estudio de integración de necesidades de financiación impuestas por el R.D. 1432/2008, con el mecanismo previsto a través de un Plan de Impulso al Medio Ambiente*. Rapport final.
- Trashorras, J. (2017). *Avifauna y líneas eléctricas. Colección Manuales Técnicos de Electricidad. Volumen 2*. Creaciones Copyright.
- Tryjanowski, P., Kosicki, J. Z., Kuźniak, S. & Sparks, T. H. (2009). 'Long-term changes and breeding success in relation to nesting structures used by the white stork, *Ciconia ciconia*'. *Annales Zoologici Fennici* 46(1):34-39. doi.org/10.5735/086.046.0104.
- Tyler, N., Stokkan, K.A., Hogg, C., Nellemann, C., Vistnes, A.I. & Jeffery, G. (2014). 'Ultraviolet vision and avoidance of power lines in birds and mammals' *Conservation Biology* 28(3):630-631. doi.org/10.1111/cobi.12262.
- UICN & HCEFLCD (2016). *Stratégie et plan d'action pour la conservation de la grande outarde (Otis tarda) au Maroc 2016-2025*. Malaga, Espagne : UICN/HCEFLCD. 52 pp. portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2016-024-Fr.pdf
- UICN, CAGPDS & HCEFLCD (2018). *Plan d'action pour mettre en place des mesures de correction urgentes dans les infrastructures électriques les plus dangereuses pour les oiseaux dans le secteur de Guelmin (Oued Bouissafène)*. Non publié.
- van Rooyen, C. & Diamond, M. (2008). 'Wildlife - power line interaction management'. *INDWA (Journal of the South African Crane Working Group)* 6(2):411-423.

A Annexes

Table des matières des annexes

ANNEXE I	
Guide des pylônes et mesures correctives	208
Légende	210
Typologie des pylônes inclus dans ce guide	211
A1. Pylônes avec isolateurs suspendus en armement alterné	218
A2. Pylônes avec isolateurs suspendus en montage vertical	220
A3. Pylônes avec isolateurs suspendus en nappe-voûte	222
A4. Pylônes avec isolateurs suspendus en montage horizontal	224
B1. Pylônes avec isolateurs dressés en armement alterné	226
B2. Pylônes avec isolateurs dressés en montage vertical	228
B3. Pylônes avec isolateurs dressés en nappe-voûte	230
B4. Pylônes avec isolateurs dressés en montage horizontal	232
B5. Pylônes avec isolateurs dressés avec montage en croix	234
C1. Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessous en armement alterné	236
C2. Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessous en montage vertical	238
C3. Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessous en nappe-voûte	240
C4. Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessous en montage horizontal	242
D1. Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessus en armement alterné	244
D2. Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessus en montage horizontal	246
D3. Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessus en montage horizontal	248
E1. Pylônes avec sectionneurs ou fusibles au-dessus, sans d'autres dispositifs	250

E2. Pylônes avec sectionneurs ou fusibles au-dessous, sans d'autres dispositifs	252
F. Pylônes avec transformateur extérieur ou/et avec d'autres dispositifs de contrôle	254
G. Pylônes de raccordement aéro-souterrain	256
H. Pylônes de dérivation	258

ANNEXE II

Lignes électriques de nouvelle création: configurations sûres, mesures préventives et recommandations pour l'installation des mesures

	260
1. Configurations sûres contre les électrocutions sur les lignes de nouvelle création	261
2. Recommandations pour l'installation des protections isolantes	265
3. Mesures de prévention contre les collisions sur les lignes de nouvelle création	267
4. Mesures pour réduire l'impact environnemental et paysager	269

ANNEXE III

Législation régionale de référence

	270
Algérie	271
Maroc	271
Tunisie	271

Annexe I

Guide des pylônes et mesures correctives

La classification et les mesures décrites ci-après se réfèrent en général à des supports de lignes moyenne tension jusqu'à 45 kV. La plupart des électrocutions se produisent sur ces lignes, car l'écartement entre ses éléments est à l'origine de ce type d'accident.

Pour faciliter la lecture des fiches, nous avons adopté une infographie et un code de couleurs pour indiquer le niveau de dangerosité et de risque de chaque type de pylône.

Étant donné que le même type de pylône peut présenter divers dangers en fonction des distances entre ses différents éléments, la couleur est associée aux valeurs qui déterminent le niveau de dangerosité. Ces valeurs ont été établies au chapitre 5 et sont les suivantes :

DISTANCE CRITIQUE BASIQUE		VALEUR FIABLE
D1	Distance entre les conducteurs.	1,5 m
D2	Distance verticale entre le point où l'oiseau se pose et l'élément sous tension le plus proche à un niveau inférieur (conducteur ou pont d'ancrage).	1 m
D3	Distance verticale entre le point où l'oiseau se pose et l'élément sous tension le plus proche à un niveau supérieur (conducteur ou pont d'ancrage).	1,5 m
D4	Distance verticale entre la base de la traverse et l'élément sous tension le plus proche à un niveau supérieur.	1 m
D5	Distance horizontale entre le point où l'oiseau se pose et l'élément sous tension.	1 m (1,5 m)

LÉGENDE

- Les niveaux de **DANGEROSITÉ** ont été établis comme suit :

Élevé ou Très Élevé

Modéré

Faible

Pour chaque type de pylône, le niveau de dangerosité est établi en fonction des distances critiques basiques. Exemple :

$D2 < 1m$ et $D3 < 1,5m$

**$D2 < 1m$ et $D3 > 1,5m$
ou $D2 > 1m$ et $D3 < 1,5m$**

$D2 > 1m$ et $D3 > 1,5m$

La catégorie « Élevé ou Très Élevé » regroupe des configurations et modèles présentant différents degrés de danger. On suppose qu'il existe des différences relatives entre les différents types, mais il a été décidé de les regrouper dans une seule catégorie à des fins de simplification.

- Concernant le **RISQUE**, trois possibilités sont envisagées pour chaque type de pylône, chacune indiquée par une couleur. Les points de risque sont indiqués au moyen d'une infographie :

**Contact phase-phase
(bleu)**

**Contact phase-métal
(vert)**

**Contact par défécation
(jaune)**

TYPOLOGIE DES PYLÔNES INCLUS DANS CE GUIDE

Selon la disposition des isolateurs et la configuration des traverses, ainsi que la présence d'autres éléments sur le pylône :

A. Pylônes de suspension avec des isolateurs suspendus. La chaîne d'isolateurs est placée sur la traverse en position suspendue.

A1. Armement alterné et similaire. Les phases sont placées à différents niveaux en alternance. Les demi-traverses peuvent être horizontales ou haubanées (avec un renfort d'angle) ; a) montage canadien ; b) montage en armement alterné plat ; c) montage en armement alterné haubané ; d) faux armement alterné.

A2. Montage vertical. Les phases sont placées sur le même plan vertical sur trois niveaux, avec un seul circuit (circuit unique ou « en drapeau », avec trois phases) ou double (avec six phases), ou sur deux niveaux, avec un circuit de chaque côté. Les demi-traverses peuvent être horizontales ou haubanées (avec un renfort d'angle) ; a) circuit simple plat ; b) circuit simple haubané ; c) double circuit sur trois niveaux demi-traverse plat ; d) double circuit sur trois niveaux demi-traverse haubanée ; e) double circuit sur deux niveaux.

A3. Armement nappe-voûte. La traverse est surélevée sur l'extrémité du poteau avec les phases suspendues, soit sur deux plans horizontaux, le plan central étant plus élevé que les phases latérales, soit sur un seul plan (voûte horizontale ou triangle) ; a) voûte sur deux plans ; b) voûte sur deux plans avec console centrale ; c) voûte horizontale d) en treillis.

A4. Montage horizontal (ou « 0 »). Les trois phases sont placées sur le même plan horizontal. Parfois, la traverse est disposée sur plus d'un poteau (2 ou 3), auquel cas on parle de montage en « portique » ; a) montage horizontal simple (une nappe) ; b) montage en portique (plus d'une nappe).

B. Pylônes de suspension avec isolateurs dressés. La chaîne d'isolateurs est disposée verticalement sur son point de fixation à la traverse.

B1. En armement alterné et similaire ; a) canadien ; b) armement alterné.

B2. Montage vertical ; a) circuit simple ; b) double circuit.

B3. En nappe-voûte ; a) à deux niveaux ; b) voûte horizontale.

B4. Montage horizontal (ou « 0 »).

B5. Montage en croix (ou « 1 »). Les phases sont placées sur deux plans, la phase centrale étant plus haute que les phases latérales.

B1

a

b

B2

a

b

B3

a

b

B4

B5

C. Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessous des isolateurs

C1. Armement alterné et similaire ; a) montage en armement alterné horizontal ; b) montage en armement alterné haubané.

C2. Montage vertical ; a) circuit simple plat ; b) circuit simple haubané ; c) double circuit plat ; d) double circuit haubané.

C3. En nappe-voûte ; a) voûte sur deux plans ; b) voûte sur deux plans avec traverse centrale ; c) voûte horizontale ; d) en treillis.

C4. Montage horizontal (ou « 0 ») ; a) montage horizontal simple ; b) montage en portique.

D. Pylônes d'ancrage avec ponts d'union au-dessus des isolateurs

D1. Armement alterné.

D2. *Montage horizontal* (ou « 0 ») ; a) les trois ponts au-dessus ; b) pont central au-dessus et ponts latéraux au-dessous ; c) pont central suspendu au-dessus ; d) pont central suspendu dans une voûte.

D3. *Montage en croix* (ou "1") ; a) les trois ponts au-dessus ; b) pont central au-dessus et ponts latéraux au-dessous ; c) pont central suspendu au-dessus verticalement ; d) pont central suspendu au-dessus latéralement.

D2

D3

E. Pylônes avec sectionneurs ou fusibles, sans transformateur extérieur ni d'autres dispositifs de contrôle

E1. Sectionneurs ou fusibles au-dessus. Supports d'ancrage, généralement à montage horizontal, avec la présence d'un sectionneur tripolaire, trois sectionneurs indépendants ou trois sectionneurs-fusibles, un par phase ; a) placés en position dressée sur la traverse ; b) placés en position dressée sur la traverse, montage en portique ; c) en tête de série du support.

E2. Sectionneurs ou fusibles au-dessous. Supports d'ancrage à configurations différentes généralement à montage horizontal ou en armement alterné, avec la présence de trois sectionneurs ou trois sectionneurs-fusibles, un par phase, disposés de manière suspendue à la traverse ou d'une traverse auxiliaire inférieure ; a) montage en armement alterné ; b) montage horizontal ; c) montage horizontal avec traverse auxiliaire inférieure ; d) sur la console centrale, montage en portique.

E1

E2

F. Pylônes avec transformateur extérieur ou/et avec d'autres dispositifs de contrôle

Supports à configurations variable, généralement d'ancrage et à montage horizontal (aussi en armement alterné ou en portique), dotés de différents éléments installés sur le poteau ou traverses auxiliaires. Ceux-ci peuvent être un transformateur extérieur souvent en bout de ligne, un interrupteur-sectionneur, un réenclencheur, etc. Ils disposent aussi de dispositifs de manœuvre et/ou de protection (sectionneurs, fusibles, valves automatiques).

a) Transformateur sur le poteau, montage horizontal ; b) transformateur sur la console centrale, montage en portique ; c) dispositif de contrôle sur branche latérale, en armement alterné ; d) dispositif de contrôle sur branche latérale, montage horizontal. Il peut y avoir plus de variations.

G. Pylônes de raccordement aéro-souterrain

Supports à configuration variable, généralement d'ancrage et à montage horizontal, souvent en bout de ligne, sur lesquels la ligne passe de transport aérien à souterrain ; a) montage en armement alterné ; b) montage vertical avec double circuit ; c) montage horizontal ; d) montage en portique.

H. Pylônes de dérivation

Supports de montage très variable, généralement d'ancrage ou avec des isolateurs dressés ou suspendus, sur lesquels se trouvent une traverse supérieure et une autre inférieure (mais pas toujours), d'où démarre une dérivation de la ligne électrique, munie ou non de fusibles.

A1

PYLÔNES AVEC ISOLATEURS SUSPENDUS EN ARMEMENT ALTERNÉ

Type de support

Pylônes de suspension avec des isolateurs suspendus

Montage

En armement alterné et similaire

Description

Les phases sont placées sur deux (ou trois) plans verticaux, soit en alternance sur trois niveaux, soit sur un niveau supérieur et sur un autre inférieur. Le fût peut être métallique ou en béton.

Variations

a) montage canadien. b) montage en armement alterné plat. c) montage en armement alterné avec haubans. d) faux armement alterné.

Photos

1a

2b

3c

4d

1a : montage canadien. 2b : montage en armement alterné plat. 3c : montage en armement alterné avec haubans. 4d : faux armement alterné. Auteur : Justo Martín

Dangerosité	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> $D2 < 1\text{m}$ et $D3 < 1,5\text{m}$ </div> <div style="text-align: center;"> $D2 < 1\text{m}$ et $D3 > 1,5\text{m}$ ou $D2 > 1\text{m}$ et $D3 < 1,5\text{m}$ </div> <div style="text-align: center;"> $D2 > 1\text{m}$ et $D3 > 1,5\text{m}$ </div> </div>
Risque

Mesures correctives	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> Structurelles </div> <div style="text-align: center;"> Non structurelles </div> </div>
Exemples de mesures correctives	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> 1a </div> <div style="text-align: center;"> 2a </div> <div style="text-align: center;"> 3c </div> </div> <p>Isolation de conducteurs : 1a et 2a à armement alterné plat, 3c avec haubans. Photos 1 et 3 avec éléments anticollision (petite et grande spirale, respectivement) et photo 2 avec « parapluie » anti-perchage. Auteurs : José Rafael Garrido (1), Justo Martín (2) et Équipe Lignes électriques GREFA (3).</p>

A2

PYLÔNES AVEC ISOLATEURS SUSPENDUS EN MONTAGE VERTICAL

Type de support

Pylônes de suspension avec des isolateurs suspendus

Montage

Montage vertical avec circuit simple ou double

Description

Les phases d'un même circuit sont placées sur le même plan vertical sur trois niveaux, ou sur deux niveaux, avec un circuit de chaque côté.

Variations

a) un circuit (drapeau simple), avec les trois phases d'un côté, avec demi-traverse plate. b) un circuit (drapeau simple), avec les trois phases d'un côté, avec demi-traverse haubanée. c) circuit double (double drapeau), avec trois phases de chaque côté sur trois niveaux, demi-traverse plate. d) double circuit (double drapeau), avec trois phases de chaque côté sur trois niveaux, demi-traverse haubanée. e) circuit double avec trois phases de chaque côté sur deux niveaux.

1a

2b

3c

4d

5e

Photos

1a : circuit simple plat. 2b : circuit simple haubané. 3c : circuit double plat. 4d : circuit double haubané. 5e : circuit double sur deux niveaux. Auteurs : Justo Martín (1, 2, 3 et 5) et Équipe Lignes électriques GREFA (4).

Dangerosité	<p>$D2 < 1\text{m}$ et $D3 < 1,5\text{m}$</p> <p>$D2 < 1\text{m}$ et $D3 > 1,5\text{m}$ ou $D2 > 1\text{m}$ et $D3 < 1,5\text{m}$</p> <p>$D2 > 1\text{m}$ et $D3 > 1,5\text{m}$</p>
Risque

Mesures correctives	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Structurelles</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Non structurelles</p> </div> </div>
Exemples de mesures correctives	<p>Circuit double haubané corrigé. Auteur : Équipe Lignes électriques GREFA.</p>

A3

PYLÔNES AVEC ISOLATEURS SUSPENDUS EN NAPPE-VOÛTE

Type de support

Pylônes de suspension avec des isolateurs suspendus

Montage

Armement en nappe-voûte

Description

Support sur la traverse surélevée à l'extrémité du poteau avec les phases suspendues, soit sur deux plans horizontaux, avec le plan central plus élevé que les phases latérales, soit sur un seul plan (voûte plate ou triangulaire). Le poteau peut être métallique, en béton ou bois.

Variations

a) nappe-voûte sur deux plans. b) nappe-voûte sur deux plans et console centrale sur la base de la traverse. c) nappe-voûte plate ou triangulaire. d) nappe-voûte en treillis.

Photos

1a, 2a, 3a, 4a et 5a : nappe-voûte sur deux plans. 6b : nappe-voûte avec console centrale. 7c et 8c : nappe-voûte plate. 9d : nappe-voûte en treillis (avec dérivation). Auteurs : Justo Martín (1, 3, 4 et 9), Lahouari Djardini & Amina Fellous Djardini (2), Daniel Burón (5 et 6) et Équipe Lignes électriques GREFA (7 et 8).

<p> Dangerosité</p>	<p>$D2 < 1\text{m}$ et $D4 < 1\text{m}$</p> <p>$D2 < 1\text{m}$ et $D4 > 1\text{m}$ ou $D2 > 1\text{m}$ et $D4 < 1\text{m}$</p> <p>$D2 > 1\text{m}$ et $D4 > 1\text{m}$</p>
<p> Risque</p>
<p> Mesures correctives</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Structurelles</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Non structurelles</p> </div> </div>
<p> Exemples de mesures correctives</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>1a</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>2c</p> </div> </div> <p>Isolation des conducteurs avec pièces préformées (1a) et sans pièce préformée (2c). Dans le deuxième cas, du fait d'une nappe-voûte plate, il est recommandé d'isoler les trois conducteurs. Auteur : Équipe Lignes électriques GREFA.</p>

A4

PYLÔNES AVEC ISOLATEURS SUSPENDUS EN MONTAGE HORIZONTAL

Pylônes de suspension avec des isolateurs suspendus

Horizontal (ou « 0 »)

Les trois phases sont placées sur le même plan, suspendues à une structure horizontale. Parfois, la traverse est disposée sur plus d'un poteau (2 ou 3), auquel cas on parle de montage en « portique ». Le poteau peut être métallique ou en béton.

a) montage horizontal simple (une nappe). b) montage en portique (plus d'une nappe)

1a: montage horizontal simple. 2b Montage horizontal en portique. Auteurs: Équipe Lignes électriques GREFA (1a), Justo Martín (2b).

<p> </p> <p>Dangerosité</p>	<p>$D2 < 1m$</p> <p>$D2 > 1m$</p>
<p> </p> <p>Risque</p>
<p> </p> <p>Mesures correctives</p>	<p>Structurelles</p> <p>$D2 > 1m$</p> <p>Non structurelles</p> <p>$>1m$</p> <p>$>1m$</p> <p>$>1m$</p> <p>$>1m$</p> <p>$>1m$</p> <p>$>1m$</p>
<p> </p> <p>Exemples de mesures correctives</p>	<p>1a</p> <p>2c</p> <p>Isolation des conducteurs avec pièces préformées (1a) et sans pièce préformée (2c). Dans le deuxième cas, du fait d'une nappe-voûte plate, il est recommandé d'isoler les trois conducteurs. Auteur : Équipe Lignes électriques GREFA.</p>

B1

PYLÔNES AVEC ISOLATEURS DRESSÉS EN ARMEMENT ALTERNÉ

Type de support

Pylônes de suspension avec isolateurs dressés

Montage

En armement alterné et similaire

Description

Les phases sont placées sur deux plans verticaux en alternance sur trois niveaux.

Variations

a) armement canadien. b) armement alterné

Photos

Armement alterné. Auteur : José Rafael Garrido.

Dangersité	Très dangereux en toutes circonstances
Risque

Mesures correctives	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Structurelles</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Non structurelles</p> </div> </div>
Exemples de mesures correctives

Armement alterné isolé. Auteur : José Rafael Garrido.

B2

PYLÔNES AVEC ISOLATEURS DRESSÉS EN MONTAGE VERTICAL

Pylônes de suspension avec isolateurs dressés

Montage vertical avec circuit simple ou double

Description

Les phases d'un même circuit sont placées sur le même plan vertical sur trois niveaux.

Variations

a) circuit simple (drapeau), avec les trois phases d'un côté. b) double circuit, avec trois phases de chaque côté.

Photos

1a : circuit simple (en drapeau). 2b : double circuit. Auteurs : José Rafael Garrido (1a) et Justo Martín (2b).

<p> </p> <p>Dangerosité</p>	<p> </p> <p>Très dangereux en toutes circonstances</p>
<p> </p> <p>Risque</p>
<p> </p> <p>Mesures correctives</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Structurelles</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Non structurelles</p> </div> </div>
<p> </p> <p>Exemples de mesures correctives</p>	<p>b</p> <p>Mesures correctives semblables à d'autres type à montage avec isolateurs dressés. Ici exemple de conducteurs gainés dans un montage en armement alterné isolé. Auteur : José Rafael Garrido.</p>

<div>B3</div>	<div>PYLÔNES AVEC ISOLATEURS DRESSÉS EN NAPPE-VOÛTE</div>
<div> <div>Type de support</div> </div>	<div>Pylônes de suspension avec isolateurs dressés</div>	
<div> <div>Montage</div> </div>	<div>Montage en nappe-voûte</div>	
<div> <div>Description</div> </div>	<div>Support dont la traverse est surélevée à l'extrémité du poteau avec les phases en disposition rigide, soit sur deux plans horizontaux, avec le plan central plus élevé que les phases latérales, soit sur un seul plan (voûte plate ou triangulaire). Le poteau peut être métallique ou en béton.</div>	
<div> <div>Variations</div> </div>	<div> <div>a) nappe-voûte sur deux plans. b) nappe-voûte plate ou triangulaire</div> <div> </div> </div>	
<div> <div>Photos</div> </div>	<div> <div> <div>1a</div> </div> <div> <div>2b</div> </div> <div> <div>1a : nappe-voûte sur deux plans. 2b : nappe-voûte plate. Auteurs : José Rafael Garrido (1a) et Équipe Lignes électriques GREFA (2b).</div> </div> </div>

Dangerosité	Très dangereux en toutes circonstances
Risque

Mesures correctives	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Structurelles</p> <p>$D2 > 1m$</p> <p>$D4 > 1m$</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Non structurelles</p> <p>$> 1m$</p> <p>$> 1m$</p> <p>$> 1m$</p> <p>$> 1m$</p> </div> </div>
Exemples de mesures correctives	Nappe-voûte plate ; Auteur : Justo Martín

B4

PYLÔNES AVEC ISOLATEURS DRESSÉS EN MONTAGE HORIZONTAL

Type de support

Pylônes de suspension avec isolateurs dressés

Montage

Horizontal (ou « 0 »)

Description

Les trois phases sont placées sur le même plan, sur une structure horizontale. Le poteau peut être métallique ou en béton.

Variations

Photos

Auteurs : Justo Martín (1 et 2) et Équipe Lignes électriques GREFA (3).

<p> Dangerosité</p>	<p>Très dangereux en toutes circonstances</p>
<p> Risque</p>
<p> Mesures correctives</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Structurelles</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Non structurelles</p> </div> </div>
<p> Exemples de mesures correctives</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>1</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>2</p> </div> </div> <p>Mesures correctives semblables à celles utilisées pour d'autres montages avec isolateurs dressés. 1 : gainage des conducteurs sur un montage en nappe-voûte plate. 2 : gainage des conducteurs sur un montage en croix. Auteur : Justo Martín.</p>

<div>B5</div>	<div>PYLÔNES AVEC ISOLATEURS DRESSÉS AVEC MONTAGE EN CROIX</div> <div></div>	<div></div>
<div></div> <div>Type de support</div>	<div>Pylônes de suspension avec isolateurs dressés</div>	
<div></div> <div>Montage</div>	<div>En croix (ou « 1 »)</div>	
<div></div> <div>Description</div>	<div>Les phases sont placées sur deux plans, avec la phase centrale surélevée par rapport aux phases latérales. Le poteau peut être métallique ou en béton.</div>	
<div></div> <div>Variations</div>	<div></div>	
<div></div> <div>Photos</div>	<div> <div>1</div> <div></div> <div>2</div> <div></div> <div>3</div> <div></div> </div> <div>Auteur : Justo Martín.</div>	

<p> Dangerosité</p>	<p>Très dangereux en toutes circonstances</p>
<p> Risque</p>
<p> Mesures correctives</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Structurelles</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Non structurelles</p> </div> </div>
<p> Exemples de mesures correctives</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>1</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>2</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>3</p> </div> </div> <p>1 et 2 : gainage des conducteurs. 3 : revêtement des consoles inférieures avec un tube en plastique et gainage du conducteur supérieur. Auteurs : Justo Martín (1), Daniel Burón (2) et Andrew Dixon (3).</p>

C1

PYLÔNES D'ANCRAGE AVEC PONTS AU-DESSOUS EN ARMEMENT ALTERNÉ

Type de support

Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessous des isolateurs

Montage

En armement alterné

Description

Les phases sont placées sur deux plans verticaux, en alternance sur trois niveaux. Le poteau peut être métallique ou en béton.

Variations

a) armement alterné plat. b) armement alterné haubané.

Photos

1a : armement alterné plat avec poteau en béton. 2a : armement alterné plat avec poteau métallique. 3b : armement alterné haubané avec poteau métallique. Auteurs : Justo Martín (1a) et Íñigo Fajardo (2a et 3b).

<p> Dangersité</p>	<div data-bbox="240 199 442 406"> <p>D2 < 1 m, D3 < 1,5 m et D5 < 1 m ou D2 < 1 m, D3 < 1,5 m et D5 > 1 m ou D2 > 1 m, D3 < 1,5 m et D5 < 1 m ou D2 < 1 m, D3 > 1,5 m et D5 < 1 m ou D2 < 1 m, D3 < 1,5 m et D5 > 1 m (2 ou 3 distances en dessous de D fiable)</p> </div> <div data-bbox="498 199 722 406"> <p>D2 < 1 m, D3 > 1,5 m et D5 > 1 m ou D2 > 1 m, D3 < 1,5 m et D5 > 1 m ou D2 < 1 m, D3 > 1,5 m et D5 < 1 m ou (1 distance en dessous de D fiable)</p> </div> <div data-bbox="778 199 980 406"> <p>D2 > 1 m, D3 > 1,5 m et D5 > 1 m</p> </div>
<p> Risque</p>
<p> Mesures correctives</p>	<div data-bbox="240 798 576 1053"> <p>Structurelles</p> <p>Isolateurs anti-perchage</p> </div> <div data-bbox="632 798 991 1021"> <p>Non structurelles</p> </div>
<p> Exemples de mesures correctives</p>	<div data-bbox="229 1077 397 1244"> <p>1a</p> </div> <div data-bbox="408 1077 576 1244"> <p>2b</p> </div> <div data-bbox="588 1077 756 1244"> <p>3b</p> </div> <div data-bbox="229 1252 397 1420"> <p>4a</p> </div> <div data-bbox="408 1252 576 1420"> <p>5b</p> </div> <div data-bbox="767 1069 1013 1460"> <p>1a, 2b et 3b : armement alterné avec gaines de protection (sur le 3b, parapluie anti-perchage et spirales anti-oiseaux). 4a : armement alterné plat avec combinaison d'isolateur polymère de 1 m de long avec spirale anti-perchage. 5b : armement alterné haubané avec isolateur polymère de plus de 1 m de long avec une configuration anti-perchage (il est recommandé dans ce cas d'isoler aussi les ponts). Auteurs : Justo Martín (1a, 2b et 5b) et Équipe Lignes électriques GREFA (3b et 4a).</p> </div>

<div>C2</div> <div>PYLÔNES D'ANCRAGE AVEC PONTS AU-DESSOUS EN MONTAGE VERTICAL</div> <div> </div>	
<div>Type de support</div>	<div>Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessous des isolateurs</div>
<div>Montage</div>	<div>Vertical</div>
<div>Description</div>	<div>Les phases sont placées sur un même plan vertical.</div>
<div>Variations</div>	<div> <p>a) circuit simple (drapeau simple), avec les trois phases sur un côté, avec demi-traverse plate. b) circuit simple (drapeau simple), avec les trois phases sur un côté, avec demi-traverse haubanée. c) double circuit (drapeau double), avec trois phases à chaque côté sur trois niveaux, avec demi-traverse plate. d) double circuit avec trois phases de chaque côté, avec demi-traverse haubanée.</p> <p>a b c d</p> </div>
<div>Photos</div>	<div> <p>1a 2b 3c</p> <p>1a : circuit simple avec demi-traverse plate. 2b : circuit simple avec demi-traverse haubanée. 3c : double circuit sur trois niveaux avec demi-traverse plate. Auteurs : Daniel Burón (1a) et Justo Martín (2b et 3c).</p> </div>

<p> </p> <p>Dangerosité</p>	<div data-bbox="277 204 338 481"> </div> <div data-bbox="551 204 611 481"> </div> <div data-bbox="815 204 875 481"> </div> <div data-bbox="224 502 464 582"> <p>D2 < 1m, D3 > 1,5m et D5 > 1m ou D2 > 1m, D3 < 1,5m et D5 > 1m ou D2 < 1m, D3 > 1,5m et D5 < 1m (2 distances en dessous de D fiable)</p> </div> <div data-bbox="498 502 728 582"> <p>D2 < 1m, D3 > 1,5m et D5 > 1m ou D2 > 1m, D3 < 1,5m et D5 > 1m ou D2 < 1m, D3 > 1,5m et D5 < 1m (1 distance en dessous de D fiable)</p> </div> <div data-bbox="778 502 980 518"> <p>D2 > 1m, D3 > 1,5m et D5 > 1m</p> </div>
<p> </p> <p>Risque</p>
<p> </p> <p>Mesures correctives</p>	<div data-bbox="369 869 476 890"> <p>Structurelles</p> </div> <div data-bbox="744 869 884 890"> <p>Non structurelles</p> </div> <div data-bbox="263 901 565 1173"> </div> <div data-bbox="632 901 996 1173"> </div> <div data-bbox="532 1149 728 1173"> <p>Isolateurs anti-perchage</p> </div>
<p> </p> <p>Exemples de mesures correctives</p>	<div data-bbox="229 1209 476 1453"> <p>1c</p> </div> <div data-bbox="492 1209 739 1453"> <p>2d</p> </div> <div data-bbox="750 1209 1008 1461"> <p>1c : double circuit avec demi-traverse plate. Le dispositif anti-perchage est un parapluie giratoire (mobile) dont la tige est verticale et la tête repliée pour éviter de blesser l'oiseau s'il essaie de se poser (il y a une dérivation). 2d : circuit double avec demi-traverse haubanée. Auteur : Justo Martín.</p> </div>

C3

PYLÔNES D'ANCRAGE AVEC PONTS AU-DESSOUS EN NAPPE-VOÛTE

Type de
support

Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessous des isolateurs

Montage

En nappe-voûte

Description

Support avec la traverse surélevée à l'extrémité du poteau avec les phases suspendues, soit sur deux plans horizontaux, avec le plan central plus élevé que les phases latérales, soit sur un seul plan (voûte horizontale ou triangulaire). Le poteau peut être métallique ou en béton.

Variations

a) nappe-voûte sur deux plans. b) nappe-voûte sur deux plans et console centrale sur la base de la traverse. c) nappe-voûte horizontale ou triangulaire. d) nappe en treillis.

Photos

1a, 2b et 3b : nappe-voûte sur deux plans. 4c et 5c : nappe-voûte horizontale. 6d : nappe-voûte en treillis. 1 et 4 : support en béton. 2, 3, 5 et 6 : support métallique. Auteurs : Justo Martín (2, 3, 5 et 6), Équipe Lignes électriques GREFA (1) et Daniel Burón (4).

<p> Dangerosité</p>	<div data-bbox="224 199 481 454"> <p>D2 < 1m, D3 > 1,5m et D5 > 1m ou D2 > 1m, D3 < 1,5m et D5 > 1m ou D2 < 1m, D3 > 1,5m et D5 < 1m (2 distances en dessous de D fiable)</p> </div> <div data-bbox="492 199 750 454"> <p>D2 < 1m, D3 > 1,5m et D5 > 1m ou D2 > 1m, D3 < 1,5m et D5 > 1m ou D2 < 1m, D3 > 1,5m et D5 < 1m (1 distance en dessous de D fiable)</p> </div> <div data-bbox="761 199 1019 454"> <p>D2 > 1m, D3 > 1,5m et D5 > 1m</p> </div>
<p> Risque</p>
<p> Mesures correctives</p>	<div data-bbox="224 805 604 1109"> <p>Structurelles</p> <p>Isolateurs anti-perchage</p> </div> <div data-bbox="616 805 1019 1109"> <p>Non structurelles</p> </div>
<p> Exemples de mesures correctives</p>	<div data-bbox="224 1141 476 1388"> <p>1a</p> </div> <div data-bbox="487 1141 739 1388"> <p>2d</p> </div> <p>1a : nappe-voûte sur deux plans. 2d : nappe-voûte en treillis. Auteur : Équipe Lignes électriques GREFA.</p>

C4

PYLÔNES D'ANCRAGE AVEC PONTS AU-DESSOUS EN MONTAGE HORIZONTAL

Type de support

Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessous des isolateurs

Montage

Horizontal (ou « 0 »)

Description

Les trois phases sont placées dans le même plan, suspendu à une structure horizontale. Parfois, la traverse est disposée sur plus d'un poteau (2 ou 3), auquel cas on parle de montage en « portique ». Le poteau peut être métallique ou en béton.

Variations

a) montage horizontal simple (un poteau). b) montage en portique (plus d'un poteau).

Photos

1a

2a

3a

4a

5b

6b

1a, 2a, 3a et 4a montage horizontal simple, 5b et 6b montage en portique. Avec poteau en béton (1a et 5b), isolateurs polymères (1a, 2a, 5b et 6b) et isolateurs en verre (3a et 4a, ce dernier est un support en angle). Auteur : Justo Martín.

<p>⚠</p> <p>Dangerosité</p>	<p>$D2 < 1\text{m}$ et $D5 < 1\text{m}$</p> <p>$D2 < 1\text{m}$ et $D5 > 1\text{m}$ ou $D2 > 1\text{m}$ et $D5 < 1\text{m}$</p> <p>$D2 > 1\text{m}$ et $D5 > 1\text{m}$</p>
<p>⚡</p> <p>Risque</p>
<p>⚙</p> <p>Mesures correctives</p>	<p>Structurelles</p> <p>Non structurelles</p> <p>Isolateurs anti-perchage</p>
<p>⚙</p> <p>Exemples de mesures correctives</p>	<p>1a</p> <p>2a</p> <p>3b</p> <p>1a et 2a : isolations des conducteurs et des ponts. 1a : installation avec des extensions dans les chaînes d'ancrage. 3b : dispositifs anti-perchage giratoires (il est recommandé de les associer à une isolation des ponts). Auteurs : Équipe Lignes électriques GREFA (1a), Justo Martín (2a) et Álvaro Camiña (3b).</p>

D1**PYLÔNES D'ANCRAGE AVEC PONTS
AU-DESSUS EN ARMEMENT ALTERNÉ** **Type de support****Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessus des isolateurs** **Montage**

Armement alterné

Description

Les phases sont placées sur deux plans verticaux en alternance sur trois niveaux. Le poteau peut être métallique ou en béton.

Variations

Montage horizontal simple (un poteau).

Photos

Auteur : José Rafael Garrido.

<p> Dangerosité</p>	<p>Très dangereux en toutes circonstances</p>
<p> Risque</p>
<p> Mesures correctives</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Structurelles</p> <p>Isolateurs anti-perchage</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Non structurelles</p> </div> </div>
<p> Exemples de mesures correctives</p>	<div style="display: flex; flex-wrap: wrap;"> <div style="width: 50%;"> <p>1a</p> </div> <div style="width: 50%;"> <p>2b</p> </div> <div style="width: 50%;"> <p>3b</p> </div> <div style="width: 50%;"> <p>4a</p> </div> <div style="width: 50%;"> <p>5b</p> </div> </div> <p>1a, 2b et 3b : armement alterné avec gaines de protection (sur le 3b, parapluie anti-perchage et spirales anti-oiseaux). 4a : armement alterné plat avec combinaison d'isolateur polymère de 1 m de long avec spirale anti-perchage. 5b : armement alterné haubané avec isolateur polymère de plus de 1 m de long avec une configuration anti-perchage (il est recommandé dans ce cas d'isoler aussi les ponts). Auteurs : Justo Martín (1a, 2b et 5b) et Équipe Lignes électriques GREFA (3b et 4a).</p>

D2

PYLÔNES D'ANCRAGE AVEC PONTS AU-DESSUS EN MONTAGE HORIZONTAL

Type de support

Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessus des isolateurs

Montage

Montage horizontal (ou « 0 »)

Description

Les trois phases sont placées sur le même plan horizontal, sur une structure horizontale, avec des ponts au-dessus d'au moins l'une des chaînes d'ancrage.

Variations

a) les trois ponts au-dessus. b) pont central au-dessus et ponts latéraux au-dessous. c) pont central suspendu au-dessus. d) pont central suspendu au-dessus dans une voûte.

Photos

1b

2b

3c

4d

1b et 2b : pont central au-dessus et ponts latéraux au-dessous. 3c : pont central suspendu au-dessus. 4d : pont central suspendu au-dessus dans une voûte. Auteurs : José Rafael Garrido (1b), Équipe Lignes électriques GREFA (2b) et Justo Martín (3c et 4d).

<p> </p> <p>Dangerosité</p>	<p> </p> <p>Très dangereux en toutes circonstances</p>
<p> </p> <p>Risque</p>
<p> </p> <p>Mesures correctives</p>	<p>Structurelles</p> <p>Isolateurs anti-perchage</p>
<p> </p> <p>Exemples de mesures correctives</p>	<div data-bbox="221 943 452 1174"> <p>1a</p> </div> <div data-bbox="468 943 698 1174"> <p>2a</p> </div> <div data-bbox="714 943 1000 1174"> <p>3b</p> </div> <p>1a et 2a : isolations des conducteurs et des ponts. 1a : installation avec des extensions dans les chaînes d'ancrage. 3b : dispositifs anti-perchage giratoires (il est recommandé de les associer à une isolation des ponts). Auteurs : Équipe Lignes électriques GREFA (1a), Justo Martín (2a) et Álvaro Camiña (3b).</p>

D3

PYLÔNES D'ANCRAGE AVEC PONTS AU-DESSUS EN MONTAGE HORIZONTAL

Pylônes d'ancrage avec ponts au-dessus des isolateurs

En croix (ou « 1 »)

Les phases sont placées sur deux plans horizontaux, la centrale sur un plan supérieur à celui des phases latérales, avec des ponts au-dessus d'au moins la chaîne d'ancrage centrale.

a) les trois ponts au-dessus. b) pont central au-dessus et ponts latéraux au-dessus. c) pont central au-dessus suspendu verticalement. d) pont central au-dessus suspendu latéralement.

1a : les trois ponts au-dessus. 2b et 3b : pont central au-dessus et ponts latéraux au-dessus. 4c : pont central au-dessus suspendu latéralement. Auteur : Justo Martín.

<p> Dangerosité</p>	<p> Très dangereux en toutes circonstances</p>
<p> Risque</p>
<p> Mesures correctives</p>	<p>Structurelles</p> <p>Isolateurs anti-perchage</p>
<p> Exemples de mesures correctives</p>	<div> </div> <p>1 2 3</p> <p>Le plus recommandé est un changement structurel, par exemple, par un pylône en montage horizontal et isolateurs suspendus avec isolation des conducteurs et des ponts (1 et 2). En cas de pont central au-dessus, si l'isolation est la seule solution, disposer le pont latéralement (3). Auteur : Équipe Lignes électriques GREFA (1 et 3) et Justo Martín (2).</p>

E1

PYLÔNES AVEC SECTIONNEURS OU FUSIBLES AU-DESSUS, SANS D'AUTRES DISPOSITIFS

Type de support

Pylônes avec sectionneurs ou fusibles, sans transformateur extérieur ni d'autres dispositifs de contrôle

Montage

Variable

Description

Supports d'ancrage de configurations variables généralement à montage horizontal ou en armement alterné, doté des sectionneurs unipolaires, tripolaires ou sectionneurs-fusibles, sans d'autres éléments. Le fût peut être métallique ou en béton.

Variations

a) placés en position dressée sur la traverse. b) placés en position dressée sur la traverse, montage en portique. c) en tête de série du support.

Photos

1a : sectionneur tripolaire en position dressée sur la traverse. 2b : sectionneur tripolaire en position dressée sur la traverse, montage en portique. 3c, 4c et 5c : sectionneur tripolaire en tête de série du support. Différentes versions, avec chaînes d'isolateurs en verre (1a et 3c), isolateurs polymères (2b, 4c et 5c), fût métallique (2b, 3c et 4c) et fût en béton (1a et 5c). Auteurs : Équipe Lignes électriques GREFA (1a), Justo Martín (2b, 4c et 5c) et Lahouari Djardini & Amina Fellous Djardini (3c).

<p> Dangerosité</p>	<p> Très dangereux en toutes circonstances</p>
<p> Risque</p>
<p> Mesures correctives</p>	<p>Structurelles</p>
<p> Exemples de mesures correctives</p>	<p>Le plus recommandé est un changement structurel par un pylône d'ancrage horizontal, avec isolants préformés pour les sectionneurs/fusibles, montés dans une traverse secondaire et avec tous les ponts et connexions isolés.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="227 994 456 1225"> <p>1c</p> </div> <div data-bbox="471 994 701 1225"> <p>2c</p> </div> <div data-bbox="715 994 945 1225"> <p>3c</p> </div> </div> <p>1c, 2c et 3c : fusibles sur traverse auxiliaire inférieure. 1c et 2c : montage horizontal. 3c : montage nappe-voûte. 1c et 3c : avec gaines de protection. 2c : avec combinaison d'isolateur polymère de 1 m de long avec spirale anti-perchage. Auteur : Équipe Lignes électriques GREFA.</p>

E2

PYLÔNES AVEC SECTIONNEURS OU FUSIBLES AU-DESSOUS, SANS D'AUTRES DISPOSITIFS

Type de support

Pylônes avec sectionneurs ou fusibles, sans transformateur extérieur ni d'autres dispositifs de contrôle

Montage

Variable

Description

Pylônes d'ancrage de différentes configurations, généralement à montage horizontal ou en armement alterné, avec la présence de trois sectionneurs ou trois sectionneurs-fusibles, un par phase, disposés de manière suspendue à la traverse ou d'une traverse auxiliaire inférieure. Le fût peut être métallique ou en béton.

Variations

a) armement alterné. b) montage horizontal. c) montage horizontal (ou d'un autre) avec traverse auxiliaire inférieure. d) sur la console centrale, montage en portique.

Photos

1a : montage en armement alterné haubané (il y a une dérivation). 2b et 3b : montage horizontal. 4d : montage horizontal en portique. Auteur : Justo Martín (1a, 2b et 4d) et Équipe Lignes électriques GREFA (3b).

<p> Dangerosité</p>	<p> Très dangereux en toutes circonstances</p>
<p> Risque</p>
<p> Mesures correctives</p>	<p>Structurelles</p> <p>Traverse secondaire</p> <p>Isolateurs anti-perchage</p>
<p> Exemples de mesures correctives</p>	<p>Le plus recommandé est un changement structurel par un pylône d'ancrage horizontal, avec isolants préformés pour les sectionneurs/fusibles, montés dans une traverse secondaire et avec tous les ponts et connexions isolés.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="227 991 456 1219"> <p>1c</p> </div> <div data-bbox="471 991 701 1219"> <p>2c</p> </div> <div data-bbox="715 991 945 1219"> <p>3c</p> </div> </div> <p>1c, 2c et 3c : fusibles sur traverse auxiliaire inférieure. 1c et 2c : montage horizontal. 3c : montage nappe-voûte. 1c et 3c : avec gaines de protection. 2c : avec combinaison d'isolateur polymère de 1 m de long avec spirale anti-perchage. Auteur : Équipe Lignes électriques GREFA.</p>

F

PYLÔNES AVEC TRANSFORMATEUR EXTÉRIEUR OU/ET AVEC D'AUTRES DISPOSITIFS DE CONTRÔLE

Type de support

Pylônes avec transformateur extérieur ou/et avec d'autres dispositifs de contrôle

Montage

Variable

Description

Supports à configuration variable, généralement d'ancrage et à montage horizontal (aussi en armement alterné ou en portique), doté de différents éléments installés sur le poteau ou traverses auxiliaires. Ceux-ci peuvent être un transformateur extérieur (souvent en bout de ligne, un interrupteur-sectionneur, un réenclencheur, etc. Ils disposent aussi de dispositifs de manœuvre et/ou de protection (sectionneurs, fusibles, valves automatiques). Le fût peut être métallique ou en béton.

Variations

a) transformateur sur le poteau, montage horizontal. b) transformateur sur la console centrale, montage en portique. c) dispositif de contrôle sur branche latérale, en armement alterné. d) dispositif de contrôle sur branche latérale, montage horizontal. Il peut y avoir plus de variations.

Photos

1a, 2a et 3a : supports à configuration variable avec transformateurs extérieurs sur le fût, en montage horizontal, 3a avec fusibles sur traverse auxiliaire inférieure. 4b : transformateur extérieur en portique. 5b : dispositif de contrôle en portique. 6d : dispositif de contrôle sur branche latérale, montage horizontal. Auteur : Justo Martín.

Dangerosité	Très dangereux en toutes circonstances
Risque

Mesures correctives	<p>Elles dépendent de la configuration du support. En général :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Suppression des ponts au-dessus de la traverse principale. • Isolation des points de tension et des ponts de connexion entre les éléments, de préférence en utilisant des isolants préformés. • Laisser une distance de sécurité d'au moins 1m autour des points où les oiseaux peuvent se poser.
Exemples de mesures correctives	<div style="display: grid; grid-template-columns: 1fr 1fr 1fr; gap: 10px;"> <div data-bbox="227 699 443 957"> <p>1a</p> </div> <div data-bbox="460 699 676 957"> <p>2a</p> </div> <div data-bbox="693 699 909 957"> <p>3a</p> </div> <div data-bbox="227 970 443 1228"> <p>4a</p> </div> <div data-bbox="460 970 676 1228"> <p>5c</p> </div> <div data-bbox="693 970 909 1228"> <p>6c</p> </div> </div> <p>1a, 2a et 3a : supports avec transformateur, avec sectionneurs-fusibles (1a), sectionneur tripolaire (2a), pourvus de parapluie anti-perchage (1a et 2a), avec des extensions dans les chaînes d'ancrage (3a). 4a : support avec dispositif de contrôle sur le fût, montage horizontal. 5c et 6c : support avec dispositif de contrôle sur branche latérale, montage en arrement alterné, avec parapluie giratoire anti-perchage (5c), avec parapluie non giratoire et sectionneurs (6c). Auteurs : Gabriel Babiloni (1a), Manuel Muñoz (2a et 4a), Équipe Lignes électriques GREFA (3a) et Justo Martín (5c et 6c).</p>

G

PYLÔNES DE RACCORDEMENT AÉRO-SOUTERRAIN

Pylônes de raccordement aéro-souterrain

Variable

Description

Supports avec configuration variable, généralement d'ancrage et à montage horizontal (parfois aussi en armement alterné), parfois avec des éléments de contrôle, sur lesquels la ligne passe de lignes aériennes à souterraines. Le fût peut être métallique ou en béton.

Variations

a) montage en armement alterné. b) montage vertical avec double circuit. c) montage horizontal. d) montage en portique.

Photos

Montage en armement alterné (1a), double circuit (2b), montage horizontal (3c, 4c et 5c), montage en portique (6d), avec sectionneurs unipolaires (2b), sectionneur tripolaire (4c) et interrupteur-sectionneur et fusibles (5c). Auteur : Justo Martín.

Dangerosité	Très dangereux en toutes circonstances
Risque

Mesures correctives	<p>Elles dépendent de la configuration du support. En général :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Suppression des ponts au-dessus de la traverse principale. • Isolation des points de tension et des ponts de connexion entre les éléments, de préférence en utilisant des isolants préformés. • Laisser une distance de sécurité d'au moins 1m autour des points où les oiseaux peuvent se poser.
Exemples de mesures correctives	<div style="display: flex; flex-wrap: wrap;"> <div style="width: 33%;"> <p>1a</p> </div> <div style="width: 33%;"> <p>2b</p> </div> <div style="width: 33%;"> <p>3c</p> </div> <div style="width: 33%;"> <p>4c</p> </div> <div style="width: 33%;"> <p>5c</p> </div> </div> <p>Montage en armement alterné (1a), double circuit avec dérivation (2b) et montage horizontal (3c, 4c et 5c), avec sectionneurs (1a, 2b et 4c), combinaison d'isolateur polymère de 1 m de long avec spirale anti-perchage (4c), parapluie anti-perchage fixe (1a) et mobile (2b). Il convient d'isoler les connecteurs avec éléments en tension (1a, 2b et 3c). Auteurs : Justo Martín (1a, 2b et 3c) et Équipe Lignes électriques GREFA (4c et 5c).</p>

H

PYLÔNES DE DÉRIVATION

Type de support

Pylônes de dérivation

Montage

Variable

Description

Supports à montage variable, généralement d'ancrage avec ponts au-dessous, desquels démarre une dérivation de la ligne, avec sectionneurs ou fusibles et généralement la présence d'une traverse inférieure.

Variations

Multiples combinaisons et possibilités.

Photos

Support d'ancrage avec ponts au-dessous en armement alterné (1), drapeau haubané (2), drapeau plat (3), voûte (4), montage horizontal simple (6 et 7), en portique (8). Support en suspension montage en voûte (5). Pylônes avec fusibles (1 et 2). Auteur : Justo Martín.

Dangerosité	Très dangereux en toutes circonstances
Risque

Mesures correctives	<p>Elles dépendent de la configuration du support. En général :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Suppression des ponts au-dessus de la traverse principale. • Isolation des points de tension et des ponts de connexion entre les éléments, de préférence en utilisant des isolants préformés. • Laisser une distance de sécurité d'au moins 1m autour des points où les oiseaux peuvent se poser.
Exemples de mesures correctives	<div style="display: flex; flex-wrap: wrap;"> <div style="width: 33%;"> <p>1</p> </div> <div style="width: 33%;"> <p>2</p> </div> <div style="width: 33%;"> <p>3</p> </div> <div style="width: 33%;"> <p>4</p> </div> <div style="width: 33%;"> <p>5</p> </div> <div style="width: 33%;"> <p>6</p> </div> </div> <p>Montages : armement alterné simple (1 et 2), armement alterné haubané (3), double circuit (4), montage en croix (5), en nappe-voûte (6). Auteurs : Manuel Muñoz (1), Équipe Lignes électriques GREFA (2 et 5) et Justo Martín (3, 4 et 6).</p>

Annexe II

Lignes électriques de nouvelle création:
configurations sûres, mesures préventives et
recommandations pour l'installation des mesures

1. CONFIGURATIONS SÛRES CONTRE LES ÉLECTROCUTIONS SUR LES LIGNES DE NOUVELLE CRÉATION

Prescriptions générales pour les lignes de nouvelle création

- a) Ne pas installer de supports avec des isolateurs dressés ; les configurations de type canadien sont les plus recommandées, en armement alterné ou en nappe-voûte.
- b) Sur les supports d'ancrage, ne pas installer de ponts de fixation au-dessus de la traverse ou de la sous-traverse, en fonction de la configuration du support.
- c) En cas d'utilisation d'isolateurs polymères, ceux-ci doivent avoir une configuration anti-perchage ou, à défaut, des systèmes accessoires ayant la même fonction, tels que des spirales.
- d) Sur les supports de raccordement aéro-souterrain, afin que les éléments sous tension ne dépassent pas les demi-traverses et les en-têtes, il est conseillé d'installer une demi-traverse auxiliaire pour faciliter l'arrivée du conducteur aérien à l'ensemble des paratonnerres et du terminal installés sur la demi-traverse inférieure consécutive.
- e) Sur les supports spéciaux dotés de sectionneurs, fusibles, vannes automatiques, conversions souterraines, jonctions, etc., tous les ponts ou connexions avec un câble nu entre les éléments sous tension et leurs bornes de connexion doivent être isolés :
 - Les connexions depuis les pinces des chaînes d'isolateurs aux sectionneurs ou aux fusibles et aux vannes automatiques.
 - Les connexions aux bornes d'un transformateur.
 - Mise en place de pièces préformées de matériau isolant sur les bornes des sectionneurs, des fusibles, des vannes automatiques et du transformateur.
 - Ponts entre les pinces d'ancrage et les autres pinces de fixation sur les traverses de dérivation.
- f) L'isolation doit être réalisée à l'aide d'un conducteur isolé ou en le recouvrant d'un isolant efficace de type préformé, en caoutchouc, en silicone solide ou dans un autre matériau similaire ; l'utilisation de rubans isolants est déconseillée car leur longévité est beaucoup plus courte.
- g) En général, éviter d'utiliser des systèmes anti-perchage ou antinidification métalliques, en particulier s'ils sont dressés et non mobiles car ils peuvent blesser les oiseaux à cause des parties saillantes et des bords tranchants.

- h) En général, éviter d'utiliser des supports propices à la pose d'un oiseau sur la traverse ou susceptibles de devenir des plateformes de nidification, surtout s'ils ne sont pas accompagnés d'autres mesures structurelles ou d'installation de systèmes isolants.

Distances génériques de sécurité entre les éléments

Distance entre conducteurs

- La distance entre les conducteurs non isolés doit être égale ou supérieure à 1,50 m.

Supports de suspension

- La distance verticale minimale entre la zone où se pose l'oiseau sur la traverse et le conducteur suspendu doit être égale ou supérieure à 1 m.
- La distance verticale entre la zone où se pose l'oiseau et l'élément sous tension le plus proche au niveau supérieur (verticalement) doit être égale ou supérieure à 1,5 m.
- Dans le cas d'armement en nappe-voûte, la distance verticale entre le conducteur central et la zone où se pose l'oiseau sur la base de la traverse doit être supérieure à 1 m.

Supports d'ancrage

- La distance horizontale entre la zone où se perche l'oiseau et l'extrémité de la chaîne d'ancrage doit être égale ou supérieure à 1 m. Dans la plupart des cas, 1 m est suffisant car l'électrocution se produit lorsqu'il y a contact avec les zones cutanées de l'aile et pas avec les plumes. Toutefois, comme cela a déjà été mentionné, dans les régions à climat très pluvieux comptant de grands aigles et des vautours, il est recommandé d'augmenter cette distance à 1,5 m, en particulier si le dispositif d'ancrage (isolateur polymère lisse, chaîne d'isolateurs avec extensions) permet aux oiseaux de se percher.

La distance verticale entre la demi-traverse et le point inférieur du pont d'ancrage, situé au-dessous, doit être égale ou supérieure à 1 m.

- La distance verticale entre la zone où se pose l'oiseau et le pont d'union supérieur le plus proche verticalement doit être égale ou supérieure à 1,5 m.
- En cas d'armement en nappe-voûte, la distance entre le pont d'union central et la zone où se pose l'oiseau sur la base de la traverse doit être supérieure à 1 m.

Spécifications selon le type de traverse

Figure 1. Distances de sécurité entre armement canadien avec des isolateurs suspendus (à gauche) et des ponts d'ancrage (à droite)

Figure 2. Distances de sécurité entre traverses à armement alterné avec des isolateurs suspendus (à gauche) et les ponts d'ancrage (à droite).

Figure 3. Distances de sécurité entre traverses à montage vertical avec des isolateurs suspendus (à gauche) et des ponts d'ancrage (à droite). Pour les armements horizontaux, les mesures seront les mêmes que pour la demi-traverse supérieure.

Figure 4. Distances de sécurité entre traverses à armement en nappe-voûte, avec isolateurs suspendus (à gauche) et ponts d'ancrage (à droite).

TABLEAU-RÉSUMÉ des distances de sécurité basiques entre les éléments, afin d'éviter les électrocutions sur les lignes électriques de nouvelle création.

SUPPORTS		DISTANCE CRITIQUE BASIQUE	VALEUR FIABLE
D1	TOUS	Distance entre les conducteurs.	1,5 m
D2	ARMEMENT ALTERNÉ MONTAGE VERTICAL MONTAGE HORIZONTAL NAPPE-VOÛTE (Ancrage et suspension)	Distance verticale entre le point où l'oiseau se pose et l'élément sous tension le plus proche à un niveau inférieur (conducteur ou pont d'ancrage).	1 m
D3	ARMEMENT ALTERNÉ MONTAGE VERTICAL MONTAGE HORIZONTAL (Ancrage et suspension)	Distance verticale entre le point où l'oiseau se pose et l'élément sous tension le plus proche à un niveau supérieur (conducteur ou pont d'ancrage).	1,5 m
D4	NAPPE-VOÛTE (Ancrage et suspension)	Distance verticale entre la base de la traverse et l'élément sous tension le plus proche à un niveau supérieur.	1 m
D5	TOUS AVEC DES PONTS D'ANCRAGE	Distance horizontale entre le point où l'oiseau se pose et l'élément sous tension le plus proche.	1 m (1,5 m)

2. RECOMMANDATIONS POUR L'INSTALLATION DES PROTECTIONS ISOLANTES

- ➔ En règle générale, **l'isolation doit être réalisée à l'aide de pièces préformées, de revêtements et de gaines adaptés** à chaque élément à isoler, fixes, qui s'emboîtent entre elles et ne laissent pas d'espaces ou de points sous tension à découvert.
- ➔ De même, il est généralement **déconseillé d'utiliser des rubans isolants** pour assembler différentes pièces afin de recouvrir des éléments ou des points sous tension (connexions entre les ponts et les différents éléments tels que les sectionneurs, les vannes automatiques, etc.). Leur utilisation est justifiée uniquement dans le cas où il n'y a pas de pièces préformées pour cet élément ou point, et toujours avec des rubans qui garantissent un support maximal et une longévité optimale.
- ➔ Lors de l'installation de gaines de protection sur les conducteurs, celles-ci doivent être fixées de manière à ne pas se séparer et, en raison de la courbure du conducteur, se déplacer par gravité vers la zone centrale de la portée, laissant des zones sous tension à découvert. Il est préférable d'utiliser des pinces de fixation pour les maintenir attachés à la chaîne d'isolateurs. La pose de bagues (tiges préformées, brides métalliques) est une solution moins efficace, car avec le temps, elles peuvent

se desserrer avec les vibrations, voire endommager l'extrémité de la gaine. Il est déconseillé d'utiliser des rubans isolants à cette fin, car il s'agit de la solution la moins efficace sur la durée.

- ➔ Lors de l'**isolation des conducteurs et des pinces**, aussi bien d'ancrage que de suspension, il est nécessaire que la gaine isolante recouvrant le câble soit à 3 ou 4 cm à l'intérieur du dispositif préformé d'isolation de la pince une fois fermée ; comme dans le cas précédent, son immobilité doit être assurée.
- ➔ **Sur les supports d'ancrage**, assurer les connexions entre les conducteurs constituant le pont au point le plus bas et à l'aide d'une cale de pression (de type AMPACT ou similaire), en les isolant de même que le conducteur par le biais d'une pièce préformée appropriée à sa forme et à sa taille.
- ➔ Lors de l'installation de la gaine sur les conducteurs, veiller à l'absence de séparation entre l'extrémité isolante du pont d'ancrage et la gaine, ceci pour qu'**aucun élément métallique ou aucune partie du conducteur sous tension ne reste à découvert**.
- ➔ Lors de l'utilisation de pièces préformées, il est important de **ne pas mélanger des éléments de fabricants différents**, car ils risqueraient de ne pas bien s'ajuster et de favoriser ainsi des assemblages défectueux qui perdraient leur efficacité. De la même manière, il convient de vérifier que les pièces recouvrent efficacement les éléments sous tension et si l'un d'entre eux reste à découvert, veiller à l'isoler en appliquant une double isolation avec des rubans.
- ➔ **Dans le cas des supports en nappe-voûte** avec des isolateurs en suspension et à risque d'électrocution par défécation d'oiseau, il faut isoler, en plus du conducteur central, les conducteurs latéraux à 1 m de chaque côté de la jonction avec la chaîne d'isolateurs ; s'il s'agit d'un support d'ancrage, les trois ponts d'ancrage doivent être isolés.
- ➔ **Dans les dérivations**, faites attention à la disposition du câblage par rapport aux zones haubanées, en particulier la traverse secondaire par rapport aux conducteurs de la traverse principale. Il peut arriver que, même si l'isolation minimale requise est atteinte, la traverse secondaire présente des points dangereux où les oiseaux peuvent se poser. Il est conseillé de prendre en compte les distances de sécurité par rapport aux points horizontaux et verticaux et d'isoler la longueur qui est nécessaire.

3. MESURES DE PRÉVENTION CONTRE LES COLLISIONS SUR LES LIGNES DE NOUVELLE CRÉATION

Installation de balises et de signalisateurs

- Les dispositifs « sauve-oiseaux », les signalisateurs visuels ou les balises seront placés sur les câbles de garde ; si la ligne électrique n'a pas de câble de garde, ces dispositifs seront placés sur les conducteurs.
- Sur les câbles de garde, les sauve-oiseaux seront disposés tous les 5 m, s'il n'y a qu'un seul câble de garde, ou en alternant tous les 10 m, s'il existe deux câbles de garde parallèles.
- La signalisation sur les conducteurs sera effectuée de manière à générer un effet visuel équivalent à un signal tous les 5 m, raison pour laquelle les signaux seront disposés en alternance sur chaque conducteur et avec une distance maximale de 10 m entre les signaux adjacents sur le même conducteur.

Avec câble de garde

Sans câble de garde

Figure 5. Distances de séparation recommandées entre balises, en tenant compte de la présence ou non d'un câble de garde.

Situations de risque de collision

Chaque ligne électrique doit faire l'objet d'une étude spécifique pour déterminer les sections spécifiques à signaler en tenant compte, au moins de manière générale, des recommandations suivantes :

- **Lignes électriques situées à moins de 1 km** des zones humides, des décharges de déchets solides urbains, des points de stockage d'animaux morts ou de leurs restes, ou bien de champs cultivés, ces zones produisant des concentrations d'oiseaux qui viennent s'y nourrir quotidiennement.
- Lignes électriques **dans un rayon de 3 km des plateformes de nidification** d'espèces singulières (vautour percnoptère, gypaète barbu, aigle de Bonelli, aigle royal), en particulier dans les régions de crêtes, boisées et montagneuses.
- Lignes électriques **dans un rayon de 3 km de sites de nidification** d'oiseaux coloniaux, tels que les hérons, les cigognes et d'autres oiseaux aquatiques et certains rapaces.
- Lignes électriques **dans un rayon de 3 km de nichoirs d'oiseaux grégaires**, tels que les hérons, les cigognes, les grues, les milans noirs, les faucons crécerelles, etc.
- Lignes électriques **sur lesquelles nichent des espèces menacées ou grégaires** (certains rapaces et les cigognes blanches, par exemple).
- Lignes électriques situées **dans des zones de concentration d'oiseaux de steppe** reproducteurs ou hivernaux, en particulier dans le cas de l'outarde barbue, l'outarde canepetière et l'outarde houbara africaine, ainsi que dans des zones servant de corridors à leurs populations.
- Lignes électriques **traversant des cours d'eau** qui servent de couloirs aux oiseaux marins et aux oiseaux migrateurs.
- Lignes électriques situées dans des **couloirs** ou des goulets d'étranglement **migratoires** qui s'étendent transversalement par rapport au flux des oiseaux, ou d'autres situations dans lesquelles la topographie donne lieu à des situations à risque.
- Lignes électriques dans un rayon de 1 km autour des points où des collisions d'oiseaux ont déjà été relevées.

4. MESURES POUR RÉDUIRE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET PAYSAGER

- Si cela est techniquement possible, **poser les nouvelles lignes sur des lignes existantes**, en créant des lignes à double circuit.
- Essayer d'acheminer les nouvelles lignes **à proximité des voies de communication** (routes, chemins, voies ferrées, autres lignes électriques), en créant des corridors d'infrastructures.
- **Éviter les tracés sur les sommets**, les lignes de crête, les points dominants, etc.
- Dans les **études d'impact environnemental**, inclure des mesures d'atténuation visant à améliorer l'habitat (abris pour les petits vertébrés, nichoirs pour les oiseaux de petite et moyenne taille, améliorations de la végétation, etc.).
- Essayer **d'éviter d'effectuer des tâches d'entretien pendant la période de nidification, de reproduction** et d'élevage sur les lignes électriques abritant des nids sur les supports ou à proximité de nids issus d'espèces prioritaires.

Annexe III

Législation régionale de référence

ALGÉRIE

- Loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
- Décret exécutif n° 10-70 du 15 Safar 1431 correspondant au 31 janvier 2010 relatif à l'usage des rapaces vivants pour l'exercice de la chasse au vol.
- Ordonnance n° 06-05 du 19 Joumada Ethania 1427 correspondant au 15 juillet 2006 relative à la protection et à la préservation de certaines espèces animales menacées de disparition.
- Décret exécutif n° 09-362 du 23 Dhou El Kaada 1430 correspondant au 11 novembre 2009 fixant les modalités d'organisation et de fonctionnement du réseau local de surveillance sanitaire de la faune sauvage et déterminant ses missions.
- Décret exécutif n° 12-235 du 3 Rajab 1433 correspondant au 24 mai 2012 fixant la liste des espèces animales non domestiques protégées.

MAROC

- Décret n° 2-12-484 du chaabane 1436 (21 mai 2015) pris pour l'application de la loi n° 29-05 relative à la protection des espèces de flore et faune sauvages et au contrôle de leur commerce.
- Loi n° 29-05 (2 juillet 2011) relative à la protection des espèces de flore et de faune sauvages et au contrôle de leur commerce.

TUNISIE

- Loi n° 88-20 du 13 avril 1988, portant refonte du code forestier.
 - Modifié par la loi n° 2001-28 du 19 mars 2001.
 - Modifié par la loi n° 2005-13 du 26 janvier 2005.
 - Modifié par la loi n° 2009-59 du 20 juillet 2009.

**UNION INTERNATIONALE POUR
LA CONSERVATION DE LA NATURE**

**Centre de Coopération
pour la Méditerranée de l'UICN**

Calle Marie Curie 22

29590 Campanillas

Malaga, Espagne

Tél. : +34 952 028430

Fax : +34 952 028145

uicnmed@iucn.org

www.iucn.org/resources/publications

www.iucn.org/mediterranean

Le Centre de Coopération pour la Méditerranée de l'UICN est soutenu par :