

Influence des rayonnements non ionisants (RNI) sur les oiseaux : situation juridique, état des connaissances scientifiques et recommandations pour la protection des oiseaux¹

Erich Bächler



Fig. 1 Segmentation du spectre électromagnétique, selon les longueurs d'ondes retenues dans l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant, ORNI. CM : champ magnétique ; CE : champ électrique ; CEM : champ électro-magnétique ; IR : infra-rouge ; UV : ultra-violet.

Les rayonnements non ionisants (RNI) ont toujours existé. Cependant, depuis la maîtrise de l'électricité, des sources artificielles se sont ajoutées aux naturelles. Ces évolutions technologiques ont été accompagnées d'un cadre légal, visant à protéger les populations humaines, ainsi que la faune et la flore, de leurs effets néfastes, avérés ou potentiels. Toutefois, de nombreuses questions se posent quant aux effets des RNI sur les oiseaux. Si beaucoup demeurent incertains, quelques-uns sont bien établis. Cet article en dresse un état des lieux.

Les RNI englobent toutes les ondes électromagnétiques, dont l'énergie est insuffisante pour rompre les liaisons atomiques ; ils sont aujourd'hui omniprésents dans les habitats des oiseaux. La législation les définit comme des champs électriques et magnétiques, dont la fréquence est comprise entre 0 et 300 GHz (cf. art. 2, al. 1, let. a, de l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant,

ORNI). Outre les nombreuses sources anthropiques de RNI, telles que le courant ferroviaire, le courant secteur, les émetteurs de télévision et de radio, la téléphonie mobile, le Wi-Fi, les radars ou les communications par satellite, les RNI comprennent aussi le champ magnétique statique de la Terre, le rayonnement thermique, la lumière visible et une partie du rayonnement UV (fig. 1).

¹ La version originale de cet article, plus détaillée, est parue dans l'*Ornithologischer Beobachter* 122 (2025) : 352-368.

La loi impose de protéger les êtres humains, les animaux et les plantes des effets négatifs des RNI d'origine anthropique, mais les valeurs limites n'ont été définies que pour les humains. Pour les animaux et les plantes, la loi sur la protection de l'environnement prévoit des évaluations au cas par cas, qui doivent se fonder sur les connaissances scientifiques actuelles. Cette synthèse les présente en ce qui concerne les oiseaux.

Bases légales

La protection contre les immissions est régie par la loi fédérale sur la protection de l'environnement (LPE) et ses ordonnances. La LPE stipule que les êtres humains, les animaux et les plantes doivent être protégés des effets nuisibles ou incommodants (art. 1, al. 1, LPE), et définit le principe de précaution, qui s'applique non seulement aux êtres humains, mais aussi aux animaux et donc aux oiseaux (art. 1, al. 2, LPE). Conformément à ce principe, les effets qui pourraient être nuisibles ou incommodants doivent être limités à un stade précoce (cf. également art. 11, al. 2, LPE).

L'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI) fixe des valeurs limites pour protéger la population, qui s'appliquent partout où des personnes peuvent séjourner (cf. art. 13, al. 1, ORNI) et visent à protéger quiconque des effets scientifiquement reconnus des RNI. Aucune ordonnance, cependant, ne fixe de valeurs limites pour les animaux et les plantes. À défaut de réglementation, il convient de déterminer, au cas par cas, si les immissions sont nocives ou incommodantes (art. 12, al. 2, LPE). Les valeurs limites d'immissions doivent être fixées de manière à ce que, selon l'état de la science ou de l'expérience, les immissions inférieures à ces valeurs ne mettent pas en danger les êtres humains, les animaux et les végétaux (art. 14, let. a, LPE).

Concrètement, par exemple lors de l'octroi de permis de construire pour des installations fixes générant des RNI, il faut donc évaluer, sur la base de travaux scientifiques, si la protection des oiseaux contre les RNI prévue par la loi est garantie. Cette évaluation au cas par cas répond aux mêmes principes matériels que la fixation des valeurs limites d'immissions par ordonnance (TF 1C 338/2007 consid. 4).

Aperçu des travaux scientifiques

Étant donné que les effets potentiels des RNI sur les organismes dépendent de la fréquence, on distingue les champs électriques et magnétiques statiques (0 Hz), les champs électromagnétiques à basse fréquence (1 Hz à 100 kHz) et les champs électromagnétiques à haute fréquence (100 kHz à 300 GHz).

Champs magnétiques statiques

Les champs magnétiques statiques sont des champs de force, dont l'intensité et la direction sont constantes. Ils peuvent être générés, par exemple, par des aimants permanents ou des conducteurs parcourus par un courant continu, mais le champ magnétique terrestre est également un champ magnétique statique.

Les oiseaux peuvent utiliser le champ magnétique terrestre pour s'orienter (MOURITSEN 2018). De nombreuses expériences ont montré que leur boussole peut être influencée par des champs magnétiques statiques artificiels, dont l'intensité se situe dans le domaine de celui de la Terre (30-60 μ T) (WILTSCHKO 1968; WILTSCHKO *et al.* 2007; PACKMOR *et al.* 2021). De plus, le sens de l'orientation des oiseaux peut être influencé par des impulsions magnétiques courtes et très fortes (0,1-0,5 T) (BEASON *et al.* 1997; WILTSCHKO *et al.* 2002; HOLLAND & HELM 2013). La fonction de la glande pinéale, et donc la sécrétion de mélatonine, peuvent également être modifiées par des champs magnétiques statiques générés artificiellement (SEMM 1992; SCHNEIDER *et al.* 1994a). La mélatonine joue un rôle important dans la régulation du rythme circadien des oiseaux (HELM & LIEDVOGEL 2024) et, comme cette horloge interne est aussi notable pour l'orientation, une modification du taux de mélatonine peut également nuire à leur capacité d'orientation (SCHNEIDER *et al.* 1994b).

Il existe également quelques études sur l'influence des champs magnétiques statiques faibles sur le développement, la physiologie et le comportement des embryons de poulets et de cailles (THALAU 2002; DRIESSEN *et al.* 2020). Cependant, leurs résultats sont trop hétérogènes pour tirer des conclusions valables; il est même parfois impossible de déterminer si les effets sur les animaux sont positifs ou négatifs (DRIESSEN *et al.* 2020).

Champs électriques statiques

Les champs électriques statiques se forment entre des potentiels électriques distincts et différents. Ceux générés techniquement se produisent, par exemple, dans les lignes de transport d'électricité à courant continu, les tramways à courant continu ou les batteries. Les champs électriques statiques sont toutefois présents naturellement partout dans l'environnement, et peuvent atteindre des intensités de plusieurs kV/m sous les nuages d'orage (WHO 2006). La charge statique due au frottement peut générer des champs électriques très puissants, jusqu'à 500 kV/m sur le corps humain (PETRI *et al.* 2017). Cependant, en raison de la bonne conductivité de la surface du corps des humains et des animaux, les champs électriques statiques n'y pénètrent pratiquement pas, mais la chargent (WHO 2006). Au contact d'un objet mis à la terre, il se produit une décharge pouvant être perçue comme désagréable par stimulation sensorielle.

Une méta-analyse sur l'influence des champs électriques statiques sur les vertébrés a certes mis en évidence certains effets sur la physiologie et le comportement, mais il s'agit très probablement de réactions secondaires à la stimulation sensorielle, qui se produit lors de la décharge des champs à la surface du corps (PETRI *et al.* 2017). Hormis la stimulation sensorielle, aucune preuve fiable d'effets négatifs des champs électriques statiques sur les humains et les animaux n'a été trouvée à ce jour.

Champs électriques et magnétiques à basse fréquence

Les champs électriques (CE-BF) et magnétiques (CM-BF) à basse fréquence (1 Hz-100 kHz) changent périodiquement d'intensité (les champs alternatifs changent également de direction) et sont causés par des courants alternatifs ou des courants continus pulsés. Les principales sources de CE-BF et de CM-BF sont le réseau ferroviaire (16,7 Hz) et les réseaux électriques publics (50 Hz) avec leurs lignes de transport et leurs appareils consommateurs. À basse fréquence, les composantes électriques et magnétiques ne sont généralement pas couplées et ne se propagent donc pas dans l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques.

Les champs magnétiques à basse fréquence induisent dans le corps des humains et des

animaux des courants qui peuvent à leur tour stimuler les nerfs (ICNIRP 2010).

Études en laboratoire

Pour des raisons éthiques évidentes, on utilise souvent des modèles animaux, principalement des souris et des rats, mais aussi des poulets ou des cailles, pour étudier les effets des champs électromagnétiques (CEM) sur l'être humain (BRENT 1999; THALAU 2002). Les travaux, principalement relatifs au stade embryonnaire, sont donc relativement nombreux (résumés dans BRENT 1999; THALAU 2002; RAJENDRA *et al.* 2004; JUUTILAINEN 2005; SHAFÉY *et al.* 2006; NISHIMURA *et al.* 2009; POURLIS 2009; MILD & MATTSOON 2010, *et*, plus récemment, dans RODA *et al.* 2011; NISHIMURA *et al.* 2013; PAWLAK *et al.* 2013; LIS 2019). Leur grande majorité a été réalisée à une fréquence de 50 Hz ou 60 Hz (fréquence du réseau électrique en Europe et aux États-Unis).

De nombreuses études ont porté sur les effets tératogènes (influences extérieures pouvant entraîner des malformations) des CE/CM-BF et la mortalité embryonnaire. Chez la poule, des taux de malformations plus élevés ont été constatés, même pour des champs magnétiques faibles (FARRELL *et al.* 1997). Ces résultats sont toutefois hétérogènes et difficiles à reproduire (JUUTILAINEN & SAALI 1986; BERMAN *et al.* 1990), en raison de différences génétiques entre les embryons de poulet (FARRELL *et al.* 1997; DI CARLO & LITOVITZ 1999; THALAU 2002). Les causes des malformations embryonnaires sont en outre souvent multifactorielles, les influences environnementales s'ajoutant aux prédispositions génétiques (THALAU 2002). Outre l'effet tératogène, d'autres influences des CM-BF sur les embryons de poulet ont pu être démontrées et reproduites (MILD & MATTSOON 2010), par exemple une activité accrue de l'enzyme ornithine décarboxylase (ODC), importante pour la croissance cellulaire, une augmentation du niveau de stress oxydatif (voir ci-dessous) ou la production de protéines de stress (Hsp70).

Il est toutefois remarquable que certains effets puissent se manifester à des intensités très faibles, dans le domaine de la valeur limite fixée par l'ORNI pour la protection des êtres humains (1 μ T). Il est aujourd'hui largement reconnu que les systèmes biologiques

peuvent être influencés par des CE/CM et des CEM faibles (LANDLER & KEAYS 2018; ZADEH-HAGHIGHI & SIMON 2022), même si la manière exacte dont ces effets se produisent n'est pas encore clairement établie. Les protéines cryptochromes (CRY), qui ont été détectées aussi bien chez les plantes que chez les animaux et régulent une multitude de processus physiologiques tels que le rythme circadien ou la formation de composés oxygénés réactifs et donc l'équilibre oxydatif, sont des récepteurs potentiels des CE/CM et des CEM à faible dose (JUUTILAINEN *et al.* 2018; SHERRARD *et al.* 2018; KARKI *et al.* 2021). Chez les oiseaux, les CRY sont cruciales pour l'orientation magnétique (voir ci-dessous). Outre les CRY, les particules de magnétite pourraient également jouer un rôle en tant que récepteurs biologiques pour les RNI. Elles sont peut-être aussi impliquées dans les mécanismes d'orientation des oiseaux migrateurs (HOLLAND & HELM 2013).

D'autres études en laboratoire, portant sur des poussins et des oiseaux adultes, ont pris en compte divers paramètres reproducteurs ou physiologiques (DURFEE *et al.* 1975; KRUEGER *et al.* 1975; VEICSTEINAS *et al.* 1996; FERNIE & REYNOLDS 2005; SUN *et al.* 2010; RODA *et al.* 2011), morphologiques (SHAFEEY *et al.* 2006), le comportement d'apprentissage et la mémoire (CHE *et al.* 2007; SUN *et al.* 2010) ou le rythme circadien (LINTZEN *et al.* 1989). Si des effets ont parfois été observés, la variété des conditions d'exposition et, dans certains cas, des espèces prises en compte, empêche de tirer des conclusions générales.

Études en plein air

La validation des résultats de laboratoire en conditions contrôlées doit être confirmée par des études de terrain appropriées. Étant donné que d'autres facteurs, difficiles à maîtriser,

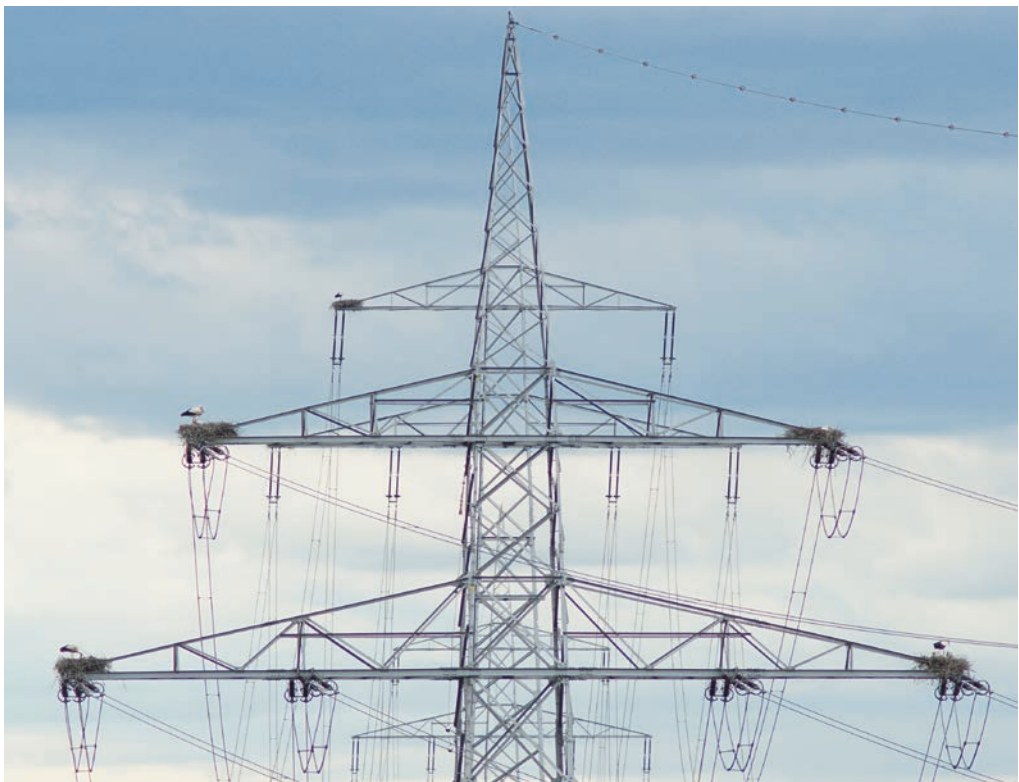


Fig. 2 Il a été démontré en laboratoire que les champs électriques et magnétiques à basse fréquence peuvent nuire à la santé des oiseaux. On ne sait pas encore si c'est également le cas en plein air, comme pour ces Cigognes blanches *Ciconia ciconia*, qui nichent sur une ligne à haute tension.

K. Walther

peuvent alors influencer les résultats, ces travaux sont très complexes à conduire et rarement significatifs.

La plupart de ces études comparent le succès à l'envol et d'autres paramètres de reproduction à proximité de lignes à haute tension à ceux d'individus de la même espèce vivant dans des habitats similaires, mais en dehors de la zone d'influence de ces lignes électriques (GILMER & WIEHE 1977; NIEMI & HANOWSKI 1984; HANOWSKI *et al.* 1996; DOHERTY & GRUBB 1998; HAMANN *et al.* 1998; FERNIE *et al.* 2000; COSTANTINI *et al.* 2007; DELL'OMO *et al.* 2009; TOMÁS *et al.* 2012). En raison de l'hétérogénéité de ces études, il est difficile de tirer des conclusions générales, d'autant qu'il n'est pas clair si ces effets sont positifs ou négatifs pour bon nombre d'entre eux. Pour compliquer encore les choses, rares sont les travaux qui ont été reproduits avec les mêmes espèces et dans des conditions similaires et, à quelques exceptions près, seule une variable indépendante (CE/CM-BF) a été prise en compte, tandis que d'autres facteurs susceptibles de l'influencer ne l'ont pas été. Les lacunes de connaissances sur l'influence des CE/CM-BF sur les oiseaux en milieu naturel sont donc encore importantes, par manque d'études rigoureuses tenant compte d'autres facteurs potentiels.

Champs électromagnétiques alternatifs à haute fréquence (CEM-HF)

Comme les champs électriques et magnétiques sont couplés dans le cas des rayonnements à haute fréquence (100-300 GHz), on parle de champs électromagnétiques. Les CEM-HF se propagent dans l'espace sous forme d'ondes et trouvent leur application principale dans la transmission sans fil (radio, émetteurs de radio et de télévision, téléphonie mobile, Wi-Fi, radars ou liaisons hertziennes). Dans un avenir proche, l'utilisation des fréquences supérieures à 6 GHz va aussi fortement augmenter, par exemple pour la téléphonie mobile et les systèmes de communication par satellite, tels que Starlink, OneWeb ou Kuiper.

Effets thermiques

Selon leur fréquence, les CEM-HF pénètrent plus ou moins profondément dans le corps, où ils sont convertis en énergie cinétique thermique et réchauffent les tissus. Cet effet, utilisé dans

les fours à micro-ondes, est connu et incontrasté, et appelé effet thermique (ICNIRP 2020). Il s'applique aussi bien aux oiseaux qu'aux humains, et à tout autre organisme biologique (EUROPEAN PARLIAMENT 2021).

Le maintien d'une température optimale pendant l'incubation est déterminant pour le taux d'éclosion, mais aussi pour la vitalité des oisillons (DuRANT *et al.* 2013). Les œufs d'oiseaux sont particulièrement sensibles à une augmentation de température (hyperthermie) lors de l'incubation (WEBB 1987; PETERKA *et al.* 1996), une élévation supérieure à 0,5°C pouvant déjà porter atteinte aux embryons (BROWN 1988; THALAU *et al.* 2003). Une autre étude expérimentale sur des œufs de poule a montré que des CEM-HF de 1,25 GHz et d'une densité de puissance supérieure à 1,25 mW/cm² (correspondant à une intensité de champ électrique de 69 V/m) entraînent une augmentation de température, qui peut aussi être préjudiciable aux embryons (THALAU *et al.* 2003). Les œufs, ou plutôt les embryons qu'ils contiennent, se réchauffent davantage que les fœtus humains, notamment parce que, chez ces derniers, une partie importante des CEM-HF est absorbée par les couches de tissus de la paroi abdominale, le tissu adipeux et ceux de l'utérus de la mère, ce qui n'est pas le cas pour les œufs (THALAU 2002). Comme la longueur de la plupart des œufs d'oiseaux se situe dans le domaine des demi-longueurs d'onde du rayonnement des téléphones mobiles, des effets de résonance peuvent également se produire dans ce domaine de fréquences, ce qui augmente le taux d'absorption spécifique (THALAU 2002; THALAU *et al.* 2003; ICNIRP 2020). Dans une certaine mesure, il est possible que le corps du couveur protège les œufs contre les CEM-HF, mais cette protection n'existe pas lors des interruptions régulières de couvaision, ni pour les oisillons dès lors qu'ils sont aptes à assurer leur thermorégulation. Par ailleurs, on sait que les nicheurs ont tendance à prolonger les pauses lors de la couvaision par température ambiante élevée, afin d'éviter que les œufs ne surchauffent (DuRANT *et al.* 2013), ce qui serait contre-productif en cas d'exposition aux RNI-HF. Enfin, les sources de chaleur anthropiques, telles que les effets thermiques des RNI-HF, constituent un défi supplémentaire pour les nicheurs, compte tenu de l'augmenta-

tion des températures ambiantes due au changement climatique (GRIFFITH *et al.* 2016).

Le développement embryonnaire est une phase critique pour tous les êtres vivants, et en particulier pour les oiseaux (PETERKA *et al.* 1996; THALAU 2002; CORDELLI *et al.* 2023; BERENIS 2025). C'est notamment pendant la formation des organes, lors de la première dizaine de jours d'incubation, que les oiseaux, comme d'autres animaux, sont les plus exposés aux influences tératogènes (PETERKA *et al.* 1996; THALAU 2002). Au cours de la première semaine de son développement, un œuf est composé à environ 80 % d'eau, l'embryon n'occupant que peu d'espace. À ce stade, en raison de sa composition, l'œuf absorbe plus d'énergie rayonnante qu'à la fin de l'incubation, lorsque l'embryon remplit presque tout l'espace (THALAU *et al.* 2003). Les embryons, et les oisillons incapables de voler, n'ont aucun moyen de se protéger ou d'échapper au rayonnement. Pendant la couaison et l'élevage au nid, les œufs et les oisillons, tout comme les adultes couvant, sont exposés en permanence au rayonnement.

Les effets thermiques ne surviennent qu'à des intensités de champ élevées, c'est-à-dire à proximité immédiate d'émetteurs HF ou d'installations très puissantes. De plus, les oiseaux

et les œufs doivent être exposés au rayonnement pendant un certain temps pour que leur température augmente. THALAU *et al.* (2003) ont montré expérimentalement que l'augmentation de température induite par les CEM-HF chez les embryons de poulet atteint son maximum après 40 à 50 min. Un simple passage à travers un champ électromagnétique HF ne suffit donc certainement pas à provoquer des effets thermiques. Cependant, l'incubation et l'élevage au nid, qui durent 30 jours ou plus selon les espèces, sont largement suffisants pour cela.

Les antennes de téléphonie mobile sont de plus en plus fréquemment installées sur des clochers et autres tours bien situés. Or, ces bâtiments constituent souvent des sites de nidification importants pour des espèces coloniales, telles que le Choucas des tours *Coloeus mone-dula*, le Martinet à ventre blanc *Tachymarptis melba* ou le Martinet noir *Apus apus*. La proximité de ces colonies aux antennes émettrices peut exposer les couvées à des effets thermiques. SAKRAOUI *et al.* (2024) ont constaté, en Algérie, un taux de survie nettement plus faible chez les jeunes Cigognes blanches *Ciconia ciconia* issues de nichées sur des antennes de téléphonie mobile par rapport à celles qui n'étaient



Fig. 3 Les clochers d'églises sont des emplacements très prisés pour les installations de téléphonie mobile, car ils sont souvent situés au centre de zones densément peuplées et les antennes peuvent être montées à l'intérieur, de sorte qu'elles ne sont pas visibles pour la population. Mais si ces clochers sont également des sites de nidification pour les martinets (sur la photo le Martinet à ventre blanc *Tachymarptis melba*) et d'autres oiseaux, le rayonnement des antennes peut les mettre en danger. Fribourg-en-Brisgau, Bade-Wurtemberg.

R. Martin

pas directement exposées. Les effets thermiques des CEM-HF étant scientifiquement incontestés, une protection appropriée des oiseaux est obligatoire en vertu des dispositions légales relatives à l'autorisation d'une installation émettrice, autant que celles relatives au principe de précaution, puisque les oiseaux sont particulièrement vulnérables pendant la période de reproduction.

Effets non thermiques

Les effets des CEM-HF sur les organismes, non causés par une augmentation de température corporelle, sont appelés effets non thermiques. L'influence des CEM-HF sur l'orientation magnétique des oiseaux est incontestée et très bien étudiée. S'il existe au moins des indications solides (MEVISSSEN & SCHÜRMANN 2021) d'une augmentation du stress oxydatif et d'autres processus moléculaires induits par les CEM-HF, il manque de preuves pour d'autres effets non thermiques, tels que l'influence sur la répartition spatiale des oiseaux ou leur succès de reproduction.

Orientation

Entre autres sources, les oiseaux utilisent le champ magnétique terrestre pour s'orienter. Ce sens magnétique repose très probablement sur le mécanisme des paires de radicaux (RPM), qui se déroule dans des protéines spéciales (cryptochromes) de la rétine de l'œil (MOURITSEN 2018). Plusieurs travaux sur des oiseaux en cage ont démontré que le sens magnétique peut être perturbé par des CEM-HF faibles et à large bande, dont l'intensité se situe dans le domaine des valeurs limites fixées par l'ORNI. RITZ *et al.* (2004) ont constaté ce phénomène pour un champ à large bande de 0,1 à 10 MHz et une intensité de champ magnétique de 85 nT, SCHWARZE *et al.* (2016) pour 2 kHz à 9 MHz et 1 nT, et MUHEIM & PHILLIPS (2023) pour 50 kHz à 25 MHz et 17 nT. ENGELS *et al.* (2014) ont pu prouver sans aucun doute une perturbation du sens magnétique, même en présence de CEM-HF (20 kHz-5 MHz, 1 nT) couramment présents en zone urbaine. D'autres études en laboratoire ont également démontré l'influence des CEM-HF générés expérimentalement jusqu'à 85 MHz et 5,6 nT maximum sur le sens magnétique (LEBERECHT *et al.* 2022). Sur la base de considérations théoriques, fondées sur le fonctionnement du mécanisme des paires de radi-

caux, une limite supérieure d'environ 116 MHz est postulée, pour l'influence sur le sens de l'orientation magnétique des oiseaux, par LEBERECHT *et al.* (2023), qui n'ont pu constater aucun effet pour des fréquences comprises entre 140 et 150 MHz et 235-245 MHz. De même, pour les bandes de fréquences des installations de téléphonie mobile (actuellement comprises entre 700 MHz et 3,8 GHz en Suisse), rien n'indique à l'heure actuelle qu'elles influencent la capacité d'orientation des oiseaux.

Même s'il est clairement prouvé que le sens magnétique des oiseaux peut être perturbé par des CEM-HF très faibles, cela ne signifie pas pour autant que les migrateurs perdent complètement leur capacité d'orientation dans leur habitat naturel, car on ne sait pas exactement dans quelle mesure les CEM-HF susceptibles d'altérer le sens magnétique des oiseaux sont répandus et à quelles distances ils agissent (ENGELS *et al.* 2014). De plus, outre leur sens de l'orientation magnétique, les oiseaux migrateurs disposent d'autres systèmes de navigation (constellations, soleil, polarisation de la lumière du ciel) qu'ils peuvent utiliser en parallèle. Dans une mesure limitée, ils sont même capables de recalibrer leur sens d'orientation perturbé à l'aide de ces autres systèmes (COCHRAN *et al.* 2004; MUHEIM *et al.* 2006), ce qui est essentiel. Ainsi, le sens de l'orientation magnétique peut également être perturbé par des causes naturelles, telles que des anomalies du champ terrestre ou des tempêtes géomagnétiques causées par des éruptions solaires (ALERSTAM 1987; WILTSCHKO & WILTSCHKO 2003; BIANCO *et al.* 2019). Par ailleurs, la boussole magnétique à inclinaison ne peut pas être utilisée lors de la traversée de l'équateur, car les lignes de champ y sont parallèles (WILTSCHKO & WILTSCHKO 1996). Le problème se pose toutefois lorsque, outre le sens de l'orientation magnétique, aucun autre système d'orientation n'est disponible. GULSON-CASTILLO *et al.* (2023) ont observé que la combinaison de tempêtes géomagnétiques et d'un ciel couvert entraînait des difficultés de navigation et une réduction des migrations. TONELLI *et al.* (2023) ont constaté, sur la base des données de captures de 2 millions d'oiseaux en Amérique du Nord sur 60 ans, que les oiseaux égarés, c'est-à-dire ceux observés loin de leur aire de présence habituelle, étaient principalement trouvés lorsque le champ magné-

tique terrestre était perturbé par des tempêtes géomagnétiques.

Stress oxydatif

L'équilibre oxydatif est essentiel au bon fonctionnement d'un organisme. Un excès de molécules réactives de l'oxygène (ROS) dans les cellules provoque un stress, qui peut endommager l'organisme (MEVISSEN & SCHÜRMANN 2021). Les CEM-HF sont soupçonnés depuis longtemps de causer un stress oxydatif, ce que confirment des études récentes sur des animaux et des cellules, même pour les CEM-HF faibles, dans le domaine des valeurs limites d'immissions et d'installations de l'ORNI (SHERRARD *et al.* 2018; MEVISSEN & SCHÜRMANN 2021). Cela a également été observé dans des études sur des oiseaux: YAKYMENKO *et al.* (2018) ont constaté une augmentation de la formation de ROS chez des embryons de caille dans un champ de 1800 MHz, avec une intensité de 1,1 V/m, et BURLAKA *et al.* (2013) à une fréquence de 900 MHz et 0,97 V/m. GUPTA & SRIVASTAVA (2022) ont démontré ce phénomène chez des poulets exposés à des CEM-RF de 2,45 GHz et 21,8 V/m.

Le stress oxydatif accélère la dégradation des télomères, qui protègent les extrémités des chromosomes, et raccourcit ainsi la durée de vie de la cellule. La longueur des télomères influence ainsi directement l'espérance de vie d'un organisme (MONAGHAN 2014). Le stress oxydatif favorise le développement de cancers, mais il est également impliqué dans la neurodégénérescence et la tératogenèse (MEVISSEN & SCHÜRMANN 2021). Cependant, une augmentation temporaire du stress oxydatif ne cause pas forcément de dommages à long terme, car les cellules et les organismes possèdent des mécanismes antioxydants. Ces mécanismes de défense ont néanmoins leurs limites, en particulier lorsque plusieurs facteurs de stress agissent simultanément. De plus, des études montrent que les individus très jeunes et âgés sont moins efficaces pour réagir au stress oxydatif (MEVISSEN & SCHÜRMANN 2021). La protection des nids et des oisillons contre les CEM-HF est donc cruciale en ce qui concerne le stress oxydatif.

Études en laboratoire sur d'autres effets possibles des CEM-HF

Outre les travaux sur l'orientation et le stress oxydatif, toute une série d'études en labora-

toire ont porté sur le succès reproducteur, la mortalité embryonnaire, les malformations, le développement, le comportement et d'autres paramètres physiologiques des oiseaux sous l'influence des CEM-HF. Une revue systématique en est disponible dans KARIPIDIS *et al.* (2023), et des résumés des résultats dans THALAU (2002), HEYNICK & MERRITT (2003), JUUTILAINEN (2005), CUCURACHI *et al.* (2013) et POPHOF *et al.* (2023). Dans l'ensemble, les conclusions sont hétérogènes. De nombreuses études plus anciennes sont entachées de lacunes méthodologiques (THALAU 2002; KARIPIDIS *et al.* 2023): avant 1990, en particulier, ce ne sont probablement pas des effets athermiques, mais plutôt thermiques ou des erreurs dans l'incubation artificielle des œufs qui sont responsables des constats relatés (THALAU 2002). Des études plus récentes et plus rigoureuses ont permis de fournir des preuves, au niveau moléculaire, des effets athermiques des CEM-HF. SHALLOM *et al.* (2002) et DI CARLO *et al.* (2002) ont ainsi découvert que les CEM-HF (915 MHz) influencent la production de la protéine de stress Hsp70 dans les cellules d'embryons de poulet, écartant ainsi largement les effets thermiques (MILD & MATSSON 2010). PAWLAK *et al.* (2018) ont pu démontrer, sous l'effet des CEM-HF (1,80 GHz, 4,23-6,25 V/m), une augmentation de la concentration de corticostérone, une hormone de stress, dans le plasma, ainsi qu'une diminution des graisses et du glycogène dans le foie de poulets fraîchement éclos. Au niveau de l'organisme, PAWLAK *et al.* (2018) n'ont toutefois constaté aucun effet sur le taux d'éclosion ou le nombre de malformations chez les poussins. L'étude de WOELDERS *et al.* (2017) n'a pas non plus fourni de preuves de dommages causés aux embryons de poulets par des CEM-HF à faible dose pour des fréquences de 1,80, 1,88, 2,10 et 5,60 GHz et une intensité de champ électrique de 3 V/m.

Études en plein air

Outre les études sur l'orientation des oiseaux migrateurs, peu de travaux de terrain ont été consacrés à l'influence des CEM-HF sur les oiseaux; de plus, leur qualité est souvent médiocre. Les études les plus fréquentes ont porté sur l'influence négative des CEM-HF sur le succès de reproduction ou la densité de peuplement des nicheurs. BALMORI (2005), BALMORI & HALLBERG (2007) et EVERAERT & BAUWENS (2007)

ont établi des corrélations négatives entre le succès reproducteur des Cigognes blanches ou la densité des Moineaux domestiques *Passer domesticus* et l'intensité des rayonnements de la téléphonie mobile (900 MHz et 1800 MHz), sans pour autant aborder toute une série d'autres facteurs, susceptibles d'influencer ces paramètres. S'il est vrai que les populations de Moineaux domestiques ont fortement diminué dans de nombreuses agglomérations à travers le monde, les causes premières reviennent à la perte de sites de nidification et de nourriture favorable à l'approvisionnement des jeunes, aux polluants environnementaux ou à l'augmentation du nombre de prédateurs naturels tels que les faucons (MOHRING *et al.* 2021). NATH *et al.* (2022), qui ont pris en compte d'autres variables en plus des CEM-HF, n'ont décelé aucun effet de ces derniers sur les populations de Moineaux domestiques. Par ailleurs, en Suisse, celles-ci n'ont pas décliné depuis l'arrivée de la téléphonie mobile, et ont même plutôt tendance à augmenter à l'échelle nationale (STREBEL *et al.* 2024), comme dans les centres urbains (Station ornithologique suisse, données non publiées).

Ces dernières années, plusieurs études ont aussi établi un lien négatif entre la densité de peuplement des oiseaux et le développement de la téléphonie mobile, par exemple KLER *et al.* (2018) ou BHAT & SINGH (2019). Bien que beaucoup d'entre elles soient universitaires, elles ne répondent pas aux normes minimales requises pour les travaux scientifiques (échantillons trop petits, méthodologie floue ou erronée, analyses statistiques inexistantes ou insuffisantes, contradictions entre les résultats et leur interprétation, etc.). Elles sont pourtant régulièrement citées dans le débat sur les effets négatifs des CEM sur la faune et la flore. Pour évaluer ces études, il faut donc toujours tenir compte non seulement des résultats, mais aussi de leur qualité, dans la mesure où celle-ci peut être évaluée (BODEWEIN *et al.* 2019). Cela vaut bien sûr pour toutes les études, et pas seulement pour celles qui décrivent les effets négatifs des RNI sur les oiseaux.

Les CEM-HF pulsés de courte durée (35-100 μ s), tels que ceux générés principalement par les radars, peuvent être à l'origine de l'« effet auditif des micro-ondes » (ICNIRP 2020; LIN 2022). Ce phénomène,

scientifiquement prouvé, est causé par des ondes thermoélastiques et peut être perçu comme un bourdonnement, un cliquetis ou un craquement. Les ondes thermoélastiques sont des ondes de pression qui peuvent être générées lorsque les tissus sont chauffés localement et brièvement par des CEM-HF (LIN 2022). L'effet a été démontré chez les humains et les animaux (rats et chats). On ignore s'il existe également chez les oiseaux.

Trois études ont examiné l'influence des rayonnements radar sur les oiseaux. BRUDERER *et al.* (1999) n'ont constaté aucun changement de comportement chez les oiseaux volant dans le faisceau lors du suivi à l'aide d'un radar (9 GHz, rayonnement pulsé, intensité du champ électrique d'environ 100 à 400 V/m, durée minimale de séjour de l'oiseau dans le faisceau radar de 60 s), contrairement au vol à travers un faisceau lumineux. REJT *et al.* (2007) ont comparé différents paramètres de reproduction chez les mésanges, avec et sans influence du rayonnement radar (1,2-3 GHz, rayonnement pulsé, intensité du champ électrique d'environ 6-43 V/m). Seule la répartition des espèces d'oiseaux présentait des différences, qui auraient toutefois pu résulter d'autres paramètres non pris en compte. SHERIDAN *et al.* (2015) ont étudié l'influence des radars fixes et mobiles (9,3 GHz, rayonnement pulsé, intensité du champ électrique d'environ 30 à 60 V/m) sur le comportement d'attention et de fuite des Vachers à tête brune *Molothrus ater*, mais les résultats sont toutefois également hétérogènes et difficiles à interpréter.

Malheureusement, il existe très peu d'études de terrain de bonne qualité sur les CEM-HF prenant en compte d'autres facteurs d'influence possibles. Avec les connaissances actuelles, il est donc extrêmement difficile d'évaluer, *in natura*, la pertinence des effets non thermiques observés en laboratoire.

Les effets des CEM-HF sur la faune et la flore dans le domaine supérieur à 6 GHz, qui seront de plus en plus utilisés à l'avenir pour la téléphonie mobile et les systèmes de communication par satellite, n'ont généralement pas fait l'objet de recherches approfondies. Le groupe consultatif de spécialistes en matière de rayonnement non ionisant (BERENIS) de la Confédération souligne également cette lacune et recommande par conséquent « l'applica-

tion systématique du principe de précaution» (MEVISSEN *et al.* 2025). Il n'existe actuellement aucune étude correspondante sur les oiseaux.

Protection des oiseaux contre les RNI

Problèmes liés à la mise en œuvre

Les bases légales pour la protection des personnes, de la faune et de la flore contre les RNI reposent sur la loi sur la protection de l'environnement (LPE) et sont largement identiques pour les trois groupes (*tabl. 1*). Contrairement aux personnes (ORNI), il n'existe toutefois pas d'ordonnance fixant des valeurs limites générales pour la flore et la faune. Au lieu de cela, la LPE prévoit de déterminer, au cas par cas, si les RNI sont nuisibles ou gênants pour les animaux ou les plantes (*tabl. 1*). Cette évaluation est toutefois soumise aux mêmes principes matériels que la fixation des valeurs limites d'immissions dans les ordonnances (TF 1C_338/2007 consid. 4). Si l'on procédait de manière analogue aux bases de calcul de l'ORNI (ICNIRP 1998), et en se fondant sur les travaux scientifiques sur les oiseaux, les valeurs limites seraient nettement inférieures à celles fixées pour l'être humain, car on part du principe que le réchauffement corporel maximal tolérable chez l'être humain est de 1°C (ICNIRP 2020), alors qu'une augmentation de température supérieure à 0,5°C peut déjà causer des dommages chez les embryons d'oiseaux (THALAU *et al.* 2003). De plus, ces derniers sont plus exposés aux rayonnements pour diverses autres raisons (voir *supra*).

Alors que les valeurs limites de l'ORNI doivent être automatiquement vérifiées et respectées lors de chaque mise en service d'une installation fixe, il n'existe pas de mécanisme automatique correspondant pour la flore et la faune, car aucune ordonnance ne fixe des valeurs limites universellement applicables (*tabl. 1*). Dans la pratique, cela a pour conséquence que la protection prévue par la LPE est largement négligée. Ni la fiche de données spécifique au site, qui doit être remise par le maître d'ouvrage d'une installation fixe avec la demande de permis de construire, ni les aides à l'exécution publiées par la Confédération ne mentionnent la protection de la flore et de la faune. Si la protection des oiseaux est abordée au cours d'une procédure d'autorisation, ce

n'est pas de manière systématique, mais généralement en réaction à des oppositions. Les autorités cantonales chargées de la protection de la nature ne sont souvent impliquées dans le processus d'autorisation qu'au cours de la procédure d'opposition.

Dans les procédures d'opposition, il est certes reconnu que, faute de réglementation, il convient de procéder à des évaluations au cas par cas (par exemple TF 1C_338/2007, TF 1C_579/2017), mais celles-ci se limitent généralement à réfuter les arguments des opposants au lieu d'examiner les faits de manière exhaustive. Malheureusement, les arguments avancés ne sont souvent pas scientifiques. De nombreux recours ont été rejetés au motif qu'il n'existait «aucune» (TF 1C_579/2017) ou «*pratiquement aucune*» (TF 1C_338/2007) étude connue sur le sujet. Même des faits scientifiquement incontestés, tels que la vulnérabilité particulière des oiseaux pendant le développement embryonnaire (TF 1C_579/2017) ou la nocivité des effets thermiques, sont remis en question, alors que ces effets thermiques constituent la base des valeurs limites d'immissions de l'ORNI. Ainsi, sur un site internet administré par les autorités fédérales (www.5g-info.ch, consulté le 13 janvier 2026), on trouve l'affirmation suivante : «*Pour l'instant, il n'a pu être prouvé que le rayonnement de téléphonie mobile, à des intensités qui sont présentes dans l'environnement, ait un effet nuisible sur les animaux et les plantes*». Cette affirmation, qui contredit la nocivité avérée des effets thermiques, a déjà été utilisée dans des jugements rendus au niveau cantonal (DTT 110/2022/157, DTT 110/2023/75).

L'adoption d'une ordonnance pour les animaux et les plantes, analogue à l'ORNI, a été rejetée en 1999 par le Conseil fédéral «*faute de bases scientifiques*» (TF 1C_338/2007 consid. 3). Cette justification est difficile à comprendre, car même les valeurs limites pour l'Homme reposent en grande partie sur des études réalisées sur des modèles animaux (THALAU 2002; ICNIRP 2020), puisque la recherche expérimentale sur l'Homme n'est généralement pas possible pour des raisons éthiques (THALAU 2002). En réalité, les bases scientifiques concernant l'influence des rayonnements non ionisants sur les animaux sont sans doute plus solides que pour les êtres humains. Si

Tabl. 1 Malgré des bases légales identiques, les dispositions de la LPE ne sont guère appliquées aux animaux et aux plantes, car il n'existe pas de règles générales pour leur mise en œuvre.

Être humain		Animaux et plantes
Loi	Art. 1 LPE : « ¹ La présente loi a pour but de protéger les Hommes, les animaux et les plantes, leurs biocénoses et leurs biotopes contre les atteintes nuisibles ou incommodes, et de conserver durablement les ressources naturelles, en particulier la diversité biologique et la fertilité du sol. ² Les atteintes qui pourraient devenir nuisibles ou incommodes seront réduites à titre préventif et assez tôt. »	
Ordonnance	ORNI : Valeurs limites d'immissions (protection contre les effets reconnus) et valeurs limites de l'installation (protection contre les effets potentiels, « valeurs limites de précaution »)	Pas d'ordonnance, pas de valeurs limites. À la place, examens au cas par cas conformément à l'art. 14, let. a, LPE : « Les valeurs limites d'immissions des pollutions atmosphériques sont fixées de manière à ce que, selon l'état de la science et l'expérience, les immissions inférieures à ces valeurs ne menacent pas les Hommes, les animaux et les plantes, leurs biocénoses et leurs biotopes. »
Prescriptions	Procédures d'autorisation, fiches de données spécifiques au site, recommandations d'exécution, prescriptions en matière de mesure.	Pas de prescriptions d'exécution.
Exécution	Mise en œuvre standardisée pour toutes les installations fixes, contrôle par les autorités communales et cantonales (services des constructions, services spécialisés RNI) et les autorités fédérales.	Pas de procédures automatiques. Uniquement en réponse à des oppositions. Pas d'examens individuels sérieux. Manque de connaissances spécialisées. Compétences floues.

la protection des animaux et des plantes, inscrite dans la LPE, doit vraiment être mise en œuvre, des règles et des valeurs limites universellement valables sont nécessaires (FROIDEVAUX *et al.* 2024; RECUERO VIRTO *et al.* 2024). Même dans le cadre d'une évaluation au cas par cas exigée par la LPE, des valeurs limites doivent être définies, car, sans elles, il est difficile d'évaluer à partir de quel niveau d'exposition aux rayonnements les animaux et les plantes subissent des dommages.

En Suisse, la jurisprudence actuelle relative à l'influence des RNI sur les plantes et les animaux reconnaît leur nocivité uniquement lorsqu'elle est scientifiquement prouvée sans aucun doute possible. En cas de doute quant à une preuve scientifique, la décision est prise en faveur du requérant (TF 1C_579/2017, TF 1C_579/2017, TF 1C_579/2017). Cette pratique est contraire au principe de précaution inscrit dans la LPE, qui exige que les effets susceptibles d'être nocifs ou incommodes soient limités à un stade précoce (art. 1, al. 2, LPE). Une exper-

tise sur l'importance du principe de précaution, commandée par l'OFEV, arrive également à cette conclusion : le principe de précaution « n'exige pas que la nocivité ou l'incommodité soit prouvée scientifiquement ». Pour son application, « de premiers indices scientifiques, une hypothèse plausible sur le risque ou un soupçon fondé » suffisent (THURNHERR 2020).

Recommandations pour la mise en œuvre

Cette synthèse montre clairement qu'il existe des preuves de l'influence des RNI sur les oiseaux, notamment par leurs effets thermiques. Sur la base de ces travaux scientifiques, la Station ornithologique suisse recommande, pour protéger les oiseaux contre les RNI, de respecter au minimum les valeurs limites définies dans l'ORNI. Cela n'est bien sûr pas applicable aux oiseaux volant en liberté, car ceux-ci ne respectent pas de distances minimales par rapport aux sources de RNI. La Station ornithologique

suisse recommande néanmoins que les installations situées à proximité de sites de reproduction existants respectent la valeur limite de précaution de l'ORNI (valeur limite de l'installation), car les embryons d'oiseaux sont particulièrement vulnérables aux RNI et ne peuvent pas s'y soustraire pendant toute la phase de reproduction et de nidification. Ces sites devraient être désignés, par analogie avec l'ORNI, comme des «*lieux à utilisation sensible*», auxquels s'applique le principe de précaution inscrit dans la LPE. Des mesures similaires sont également recommandées dans une étude commandée par le Parlement européen (EUROPEAN PARLIAMENT 2021).

La demande visant à fixer des valeurs limites inférieures à celle d'immissions dans les sites de reproduction des oiseaux a, jusqu'à présent, été rejetée par les tribunaux, au motif qu'il n'était pas admissible d'exiger des valeurs limites plus basses pour les oiseaux que pour les humains (p. ex. TF 1C_579/2017, TF 1C 450_2010, WBE.2020.34). La Station ornithologique suisse conteste cet argument, car les sites de reproduction en question étaient des bâtiments non habités en permanence par des humains et auxquels s'applique donc la valeur limite d'immissions et non la valeur limite de l'installation, plus stricte. Si l'ORNI s'appliquait également aux oiseaux, la valeur limite de l'installation vaudrait pour les bâtiments abritant leurs sites de nidification, car ces derniers sont sans aucun doute des «*lieux à utilisation sensible*». La valeur limite, supposée plus basse pour les oiseaux dans les cas susmentionnés, a donc été fixée uniquement parce que ce sont des oiseaux qui y séjournent en permanence ; si les humains y vivaient eux aussi de cette manière, la valeur limite plus stricte s'appliquerait également à eux.

Afin de mettre en œuvre la protection des plantes et des animaux contre les RNI formulée dans la LPE, la Station ornithologique suisse estime qu'il faudra à l'avenir des règles et des valeurs limites universellement applicables, analogues à celles de l'ORNI pour la protection des personnes. En l'absence de telles règles, la présente synthèse apporte un soutien aux services spécialisés dans les RNI, aux autorités chargées de la construction, aux administrations de la chasse et de la pêche, aux services spécialisés dans la protection de la nature et

à d'autres services. La Station ornithologique souhaite encourager les autorités compétentes à se référer aux connaissances résumées ici lors de l'évaluation des demandes de permis de construire et à tenir compte de manière cohérente de la protection des oiseaux.

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement les personnes suivantes, qui ont lu et commenté de manière critique les versions précédentes du manuscrit : Lukas Berger, Pierre Bize, Reto Burri, Barbara Helm, Gilberto Pasinelli et Therese Plüss. Meike Mevissen et David Schürmann ont apporté, par leurs avis et commentaires, de précieuses suggestions, qui ont permis d'améliorer cet article. Je tiens à les en remercier tout particulièrement.

Résumé **Influence des rayonnements non ionisants (RNI) sur les oiseaux : situation juridique, état des connaissances scientifiques et recommandations pour la protection des oiseaux**

À courte distance, les rayonnements non ionisants (RNI) peuvent réchauffer et endommager les tissus corporels des oiseaux, en particulier des embryons et des oisillons. Cet effet thermique des RNI est scientifiquement incontesté et les oiseaux doivent en être protégés conformément à la législation en vigueur. En raison de la proximité spatiale, l'installation d'équipements radio dans des bâtiments utilisés comme sites de nidification par les oiseaux est particulièrement délicate.

Il est également scientifiquement prouvé que le rayonnement électromagnétique à faible dose dans le domaine jusqu'à environ 100 MHz influence la boussole magnétique des oiseaux. Il n'est pas possible d'évaluer de manière concluante dans quelle mesure la capacité d'orientation des oiseaux migrateurs est globalement affectée par ces sources de perturbation. D'une part, on ne sait pas dans quelle mesure elles sont répandues et à quelle distance elles agissent et, d'autre part, les oiseaux peuvent utiliser d'autres systèmes d'orientation en plus de leur boussole magnétique.

Dans des conditions de laboratoire contrôlées, il a été démontré de manière quasi systématique que les rayonnements à haute fréquence et les champs magnétiques à basse fréquence augmentent le stress oxydatif, même à faible dose. Les preuves de l'influence des champs magnétiques à basse fréquence sur la formation d'hormones et de protéines de stress ou sur le taux de mélatonine des oiseaux sont également sans équivoque. Certains génotypes ont également présen-

té davantage de malformations embryonnaires et une mortalité embryonnaire accrue. Ces effets sont un peu moins évidents pour les rayonnements électromagnétiques à haute fréquence.

Il est difficile d'évaluer si et dans quelle mesure ces effets non thermiques des RNI observés en laboratoire affectent également les oiseaux dans des conditions de vie naturelles. D'une part, les organismes peuvent compenser dans une certaine mesure les effets négatifs des RNI, tels que le stress oxydatif, grâce à des mécanismes de défense, cette capacité étant toutefois limitée chez les individus plus jeunes, plus âgés ou autrement affaiblis. D'autre part, les dommages comme les malformations embryonnaires ont souvent des causes multifactorielles, par exemple une combinaison de prédisposition génétique et de facteurs environnementaux, l'exposition aux RNI pouvant être l'un des nombreux facteurs. Des recherches sont nécessaires pour combler ces lacunes de connaissances.

Nous ne disposons actuellement pas de preuves scientifiques suffisantes concernant d'autres effets non thermiques des RNI, comme les comportements d'évitement ou l'influence sur la densité de peuplement. Même dans les cas isolés de mortalité massive d'oiseaux, aucun indice de l'influence des RNI n'a pu être trouvé jusqu'à présent.

La flore et la faune, et donc aussi les oiseaux, doivent être protégés contre les effets négatifs des RNI en vertu de la législation environnementale en vigueur. Cependant, l'absence de dispositions d'application pour la flore et la faune limite fortement la mise en œuvre de leur protection. Pour une mise en œuvre systématique de la protection des oiseaux contre les RNI inscrite dans la loi, il est donc indispensable de définir des règles et des valeurs limites universellement reconnues. La Station ornithologique suisse recommande d'appliquer les dispositions de l'ORNI également aux oiseaux et de tenir compte du principe de précaution, en particulier pour les sites de reproduction.

Summary Influence of non-ionising radiation (NIR) on birds: legal situation, state of scientific knowledge and recommendations for bird protection

At close range, non-ionising radiation (NIR) can heat and damage the body tissue of birds, especially embryos and nestlings. This thermal effect of NIR is scientifically undisputed and birds must be protected from it in accordance with current legislation. Due to the spatial proximity, the installation of transmitters in buildings used by birds as nesting sites is particularly sensitive. It has also been scientifically proven that the magnet-

ic compass of birds is influenced by low-dose electromagnetic radiation in the range up to about 100 MHz. It is not possible to conclusively assess the extent to which the orientation ability of migratory birds is impaired by such sources of disturbance. On the one hand, it is not known how widespread such sources of interference are and how far they have an effect, and on the other hand, birds can use other orientation systems in addition to the magnetic compass.

Under controlled laboratory conditions, it could be demonstrated almost consistently that both high-frequency radiation and low-frequency magnetic fields increase oxidative stress even in the low-dose range. The evidence on the influence of low-frequency magnetic fields on the formation of stress hormones and proteins or the melatonin balance of birds is also clear. Certain genotypes also had more embryonic malformations and increased embryonic mortality. For high-frequency electromagnetic radiation, these effects are somewhat less clear.

It is difficult to assess whether and to what extent these non-thermal effects of NIR found in the laboratory also affect birds under natural living conditions. On the one hand, organisms can compensate for negative effects of NIR, such as oxidative stress, to a certain extent, but this ability is limited in younger, older or otherwise weakened individuals. On the other hand, damage such as embryonic malformations often have multifactorial causes, such as a combination of genetic predisposition and environmental factors, with the impact of NIR being one of many. There are considerable gaps in knowledge that should be closed through research.

There is currently insufficient scientific evidence for other non-thermal effects of NIR, such as avoidance behaviour or influencing population densities. Even in individual cases of mass bird deaths, no evidence of the effect of NIR has been found so far.

Flora and fauna, including birds, must be protected from the negative effects of NIR in accordance with current environmental legislation. However, since no corresponding implementing regulations have been issued for flora and fauna, their protection is only carried out in an extremely incomplete way. For the systematic implementation of the legally enshrined protection of birds from NIR, the formulation of generally applicable rules and limit values is therefore indispensable. The Ornithological Institute recommends that the provisions of the NISV also be applied to birds and that the precautionary principle be taken into account, especially for breeding sites.

Bibliographie

- ALERSTAM, T. (1987): Bird Migration Across a Strong Magnetic Anomaly. *J. Exp. Biol.* 130: 63-86.
- BALMORI, A. (2005): Possible Effects of Electromagnetic Fields from Phone Masts on a Population of White Stork (*Ciconia ciconia*). *Electromagnetic Biol. Med.* 24: 109-119.
- BALMORI, A. & O. HALLBERG (2007): The urban decline of the house sparrow (*Passer domesticus*): a possible link with electromagnetic radiation. *Electromagnetic Biol. Med.* 26: 141-151.
- BEASON, R. C., R. WILTSCHKO & W. WILTSCHKO (1997): Pigeon Homing: Effects of Magnetic Pulses on Initial Orientation. *The Auk* 114: 405-415.
- BERENIS (2025): Beurteilung der von der WHO in Auftrag gegebenen systematischen Übersichtsarbeiten zu den gesundheitlichen Auswirkungen von HF-EMF. Newsletter-Sonderausgabe Dezember 2025. <https://www.bafu.admin.ch/dam/de/sd-web/eJ9UQK3V4VeM/Newsletter%20BERENIS%20Sonderausgabe%20-%20Dezember%202025.pdf>, consulté le 12 janvier 2026.
- BERMAN, E., L. CHACON, D. HOUSE, B. A. KOCH, W. E. KOCH, J. LEAL, S. LØVTRUP, E. MANTIPLY, A. H. MARTIN & G. I. MARTUCCI (1990): Development of chicken embryos in a pulsed magnetic field. *Bioelectromagnetics* 11: 169-187.
- BHAT, T. & R. SINGH (2019): Effect of mobile tower radiation on avian fauna: a case study of Lolab Valley, Kupwara Jammu and Kashmir. *JETIR* 6: 570-576.
- BIANCO, G., M. ILIEVA & S. ÅKESSON (2019): Magnetic storms disrupt nocturnal migratory activity in songbirds. *Biol. Lett.* 15: 20180918.
- BODEWEIN, L., K. SCHMIEDCHEN, D. DECHENT, D. STUNDER, D. GRAEFRAETH, L. WINTER, T. KRAUS & S. DRIESSEN (2019): Systematic review on the biological effects of electric, magnetic and electromagnetic fields in the intermediate frequency range (300 Hz to 1 MHz). *Environ. Res.* 171: 247-259.
- BRENT, R. L. (1999): Reproductive and teratologic effects of low-frequency electromagnetic fields: A review of in vivo and in vitro studies using animal models. *Teratology* 59: 261-286.
- BROWN, A. F. A. (1988): *Kunstbrut: Handbuch für Züchter*. Schaper, Alfeld.
- BRUDERER, B., D. PETER & T. STEURI (1999): Behaviour of migrating birds exposed to X-band radar and a bright light beam. *J. Exp. Biol.* 202: 1015-1022.
- BURLAKA, A., O. TSYBULIN, E. SIDORIK, S. LUKIN, V. POLISHUK, S. TSEHMISTRENKO & I. YAKYMENKO (2013): Overproduction of free radical species in embryonal cells exposed to low intensity radiofrequency radiation. *Exp. Oncol.* 35: 219-225.
- CHE, Y., H. SUN, Y. CUI, D. ZHOU & Y. MA (2007): Effects of exposure to 50 Hz magnetic field of 1 mT on the performance of detour learning task by chicks. *Brain Res. Bull.* 74: 178-182.
- COCHRAN, W. W., H. MOURITSEN & M. WIKELSKI (2004): Migrating songbirds recalibrate their magnetic compass daily from twilight cues. *Science* 304: 405-408.
- CORDELLI, E., L. ARDOINO, B. BENASSI, C. CONSALES, P. ELEUTERI, C. MARINO, M. SCIORTINO, P. VILLANI, M. H. BRINKWORTH, G. CHEN, J. P. MCNAMEE, A. W. WOOD, L. BELACKOVA, J. VERBECK & F. PACCHIEROTTI (2023): Effects of Radiofrequency Electromagnetic Field (RF-EMF) exposure on pregnancy and birth outcomes: A systematic review of experimental studies on non-human mammals. *Environ. Int.* 180: 108178.
- COSTANTINI, D., S. CASAGRANDE & G. DELL'OMO (2007): MF magnitude does not affect body condition, pro-oxidants and anti-oxidants in Eurasian kestrel (*Falco tinnunculus*) nestlings. *Environ. Res.* 104: 361-366.
- CUCURACHI, S., W. L. M. TAMIS, M. G. VIVIER, W. J. G. M. PEUNENBURG, J. F. B. BOLTE & G. R. DE SNOO (2013): A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF). *Environ. Int.* 51: 116-140.
- DELL'OMO, G., D. COSTANTINI, V. LUCINI, G. ANTONUCCI, R. NONNO & A. POLICETTI (2009): Magnetic fields produced by power lines do not affect growth, serum melatonin, leukocytes and fledging success in wild kestrels. *Comp. Biochem. Physiol. C: Toxicol. Pharmacol.* 150: 372-376.
- DI CARLO, A., N. WHITE, F. GUO, P. GARRETT & T. LITOVITZ (2002): Chronic electromagnetic field exposure decreases HSP70 levels and lowers cytoprotection. *J. Cell. Biochem.* 84: 447-454.
- DI CARLO, A. L. & T. A. LITOVITZ (1999): Is genetics the unrecognized confounding factor in bioelectromagnetics? Flock-dependence of field-induced anoxia protection in chick embryos. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 48: 209-215.
- DOHERTY, P. F. & T. C. GRUBB (1998): Reproductive Success of Cavity-Nesting Birds Breeding under High-Voltage Powerlines. *Am. Midl. Nat.* 140: 122-128.
- DRIESSEN, S., L. BODEWEIN, D. DECHENT, D. GRAEFRAETH, K. SCHMIEDCHEN, D. STUNDER, T. KRAUS & A.-K. PETRI (2020): Biological and health-related effects of weak static magnetic fields (≤ 1 mT) in humans and vertebrates: A systematic review. *PLoS one* 15: e0230038.

- DURANT, S. E., W. A. HOPKINS, G. R. HEPP & J. R. WALTERS (2013): Ecological, evolutionary, and conservation implications of incubation temperature-dependent phenotypes in birds. *Biol. Rev. Camb. Philos. Soc.* 88: 499-509.
- DURFEE, W. K., P. R. PLANTE & S. MUTHUKRISHNAN (1975): *Extremely low frequency electric and magnetic fields in domestic birds. Part I. The influence of ELF, magnetic and electric fields upon hatchability and early development of chicks.* Tech. Rep. 1975.
- ENGELS, S., N.-L. SCHNEIDER, N. LEFELDT, C. M. HEIN, M. ZAPKA, A. MICHALIK, D. ELBERS, A. KITTEL, P. J. HORE & H. MOURITSEN (2014): Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird. *Nature* 509: 353-356.
- EUROPEAN PARLIAMENT (2021): *Environmental impacts of 5G: A literature review of effects of radio-frequency electromagnetic field exposure of non-human vertebrates, invertebrates and plants.* European Parliamentary Research Service.
- EVERAERT, J. & D. BAUWENS (2007): A possible effect of electromagnetic radiation from mobile phone base stations on the number of breeding house sparrows (*Passer domesticus*). *Electromagnetic Biol. Med.* 26: 63-72.
- FARRELL, J. M., T. L. LITOVITZ, M. PENAFIEL, C. J. MONTROSE, P. DOINOV, M. BARBER, K. M. BROWN & T. A. LITOVITZ (1997): The effect of pulsed and sinusoidal magnetic fields on the morphology of developing chick embryos. *Bioelectromagnetics* 18: 431-438.
- FERNIE, K. J., N. J. LEONARD & D. M. BIRD (2000): Behavior of free-ranging and captive American kestrels under electromagnetic fields. *J. Toxicol. Environ. Health A* 59: 597-603.
- FERNIE, K. J. & S. J. REYNOLDS (2005): The effects of electromagnetic fields from power lines on avian reproductive biology and physiology: a review. *J. Toxicol. Environ. Health Part B* 8: 127-140.
- FROIDEVAUX, J. S. P., L. RECUERO VIRTO, M. CZERWIŃSKI, A. THIELENS & K. J. PARK (2024): Addressing Wildlife Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields: Time for Action. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 11: 3-4.
- GILMER, D. S. & J. M. WIEHE (1977): Nesting by ferruginous hawks and other raptors on high voltage powerline towers. *Prairie Nat.* 9: 1-10.
- GRIFFITH, S. C., M. C. MAINWARING, E. SORATO & C. BECKMANN (2016): High atmospheric temperatures and 'ambient incubation' drive embryonic development and lead to earlier hatching in a passerine bird. *R. Soc. Open Sci.* 3: 150371.
- GULSON-CASTILLO, E. R., B. M. VAN DOREN, M. X. BUI, K. G. HORTON, J. LI, M. B. MOLDWIN, K. SHEDDEN, D. T. WELLING & B. M. WINGER (2023): Space weather disrupts nocturnal bird migration. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 120: e2306317120.
- GUPTA, V. & R. SRIVASTAVA (2022): 2.45 GHz microwave radiation induced oxidative stress: Role of inflammatory cytokines in regulating male fertility through estrogen receptor alpha in *Gallus gallus domesticus*. *Biochem. Biophys. Res. Comm.* 629: 61-70.
- HAMANN, H. J., K. H. SCHMIDT & W. WILTSCHKO (1998): Mögliche Wirkungen elektrischer und magnetischer Felder auf die Brutbiologie von Vögeln am Beispiel einer Population von höhlenbrütenden Singvögeln an einer Stromtrasse. *Vogel und Umwelt* 9: 215-246.
- HANOWSKI, J. M., G. G. NIEMI & J. G. BLAKE (1996): Response of Breeding and Migrating Birds to Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields. *Ecol. Appl.* 6: 910-919.
- HELM, B. & M. LIEVOGEL (2024): Avian migration clocks in a changing world. *J. Comp. Physiol., A*, 210: 691-716.
- HEYNICK, L. N. & J. H. MERRITT (2003): Radiofrequency fields and teratogenesis. *Bioelectromagnetics Suppl.* 6: S174-86.
- HOLLAND, R. A. & B. HELM (2013): A strong magnetic pulse affects the precision of departure direction of naturally migrating adult but not juvenile birds. *J. R. Soc. Interface* 10: 20121047.
- ICNIRP (1998): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys.* 74: 494-522.
- ICNIRP (2010): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics* 99: 818-836.
- ICNIRP (2020): Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics* 118: 483-524.
- JUUTILAINEN, J. (2005): Developmental effects of electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics Suppl.* 7: S107-15.
- JUUTILAINEN, J., M. HERRALA, J. LUUKKONEN, J. NAARALA & P. J. HORE (2018): Magnetocarcinogenesis: is there a mechanism for carcinogenic effects of weak magnetic fields? *Proc. Biol. Sci.* 285. doi: 10.1098/rspb.2018.0590.
- JUUTILAINEN, J. & K. SAALI (1986): Development of chick embryos in 1 Hz to 100 kHz magnetic fields. *Radiat. Environ. Biophys.* 25: 135-140.

- KARIPIDIS, K., C. BRZOZEK, R. MATE, C. R. BHATT, S. LOUGHRAN & A. W. WOOD (2023): What evidence exists on the impact of anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields on animals and plants in the environment: a systematic map. *Environ. Evidence* 12: 9.
- KARKI, N., S. VERGISH & B. D. ZOLTOWSKI (2021): Cryptochromes: Photochemical and structural insight into magnetoreception. *Protein Sci.* 30: 1521-1534.
- KLER, T. K., M. KUMAR & N. VASHISHAT (2018): Effects of electromagnetic radiations on diversity and breeding biology of birds living near power lines and mobile towers at Ludhiana, Punjab. *JEB* 39: 247-252.
- KRUEGER, W. F., A. J. GIAROLA, J. W. BRADLEY & A. SHREKENHAMER (1975): Effects of electromagnetic fields on fecundity in the chicken. *Ann. NY Acad. Sci.* 247: 391-400.
- LANDLER, L. & D. A. KEAYS (2018): Cryptochrome: The magnetosensor with a sinister side? *PLoS Biol.* 16: e3000018.
- LEBERECHT, B., D. KOBYLKOVA, T. KARWINKEL, S. DÖGE, L. BURNUS, S. Y. WONG, S. APTE, K. HAASE, I. MUSIELAK, R. CHETVERIKOVA, G. DAUTAJ, M. BASSETTO, M. WINKLHOFFER, P. J. HORE & H. MOURITSEN (2022): Broadband 75-85 MHz radiofrequency fields disrupt magnetic compass orientation in night-migratory songbirds consistent with a flavin-based radical pair magnetoreceptor. *J. Comp. Physiol. A* 208: 97-106.
- LEBERECHT, B., S. Y. WONG, B. SATISH, S. DÖGE, J. HINDMAN, L. VENKATRAMAN, S. APTE, K. HAASE, I. MUSIELAK, G. DAUTAJ, I. A. SOLOV'YOV, M. WINKLHOFFER, H. MOURITSEN & P. J. HORE (2023): Upper bound for broadband radiofrequency field disruption of magnetic compass orientation in night-migratory songbirds. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 120: e2301153120.
- LIN, J. C. (2022): The Microwave Auditory Effect. *IEEE J. Electromagn. RF Microw. Med. Biol.* 6: 16-28.
- LINTZEN, T., G. BOESE, M. MÜLLER, J. EICHMEIER & G. RUHENSTROTH-BAUER (1989): The stability of the circadian rhythm of green finches (*Carduelis chloris*) under the influence of a weak electrical field. *J. Biol. Rhythms* 4: 371-376.
- LI, M. (2019): Effect of 50 Hz magnetic field on chicken embryo development and course of hatching. *Sci. Tech. Innov.* 5: 44-49.
- MEIJSSEN, M., J. FRÖHLICH & D. SCHÜRMANN (2025): *Elektromagnetische Felder im Frequenzbereich 5.8-200 GHz – Biologische Effekte und Konsequenzen für die Gesundheit*. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), mai 2025.
- MEIJSSEN, M. & D. SCHÜRMANN (2021): *Gibt es Hinweise auf vermehrten oxidativen Stress durch elektromagnetische Felder? Eine Zusammenfassung neuerer relevanter Tier- und Zellstudien in Bezug auf gesundheitliche Auswirkungen*. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), mai 2021.
- MILD, K. H. & M.-O. MATTSOON (2010): ELF noise fields: a review. *Electromagnetic Biol. Med.* 29: 72-97.
- MOHRING, B., P.-Y. HENRY, F. JIGUET, F. MALHER & F. ANGELIER (2021): Investigating temporal and spatial correlates of the sharp decline of an urban exploiter bird in a large European city. *Urban Ecosyst.* 24: 501-513.
- MONAGHAN, P. (2014): Organismal stress, telomeres and life histories. *J. Exp. Biol.* 217: 57-66.
- MOURITSEN, H. (2018): Long-distance navigation and magnetoreception in migratory animals. *Nature* 558: 50-59.
- MUHEIM, R., F. R. MOORE & J. B. PHILLIPS (2006): Calibration of magnetic and celestial compass cues in migratory birds – a review of cue-conflict experiments. *J. Exp. Biol.* 209: 2-17.
- MUHEIM, R. & J. B. PHILLIPS (2023): Effects of low-level RF fields reveal complex pattern of magnetic input to the avian magnetic compass. *Sci. Rep.* 13: 19970.
- NATH, A., H. SINGHA & B. P. LAHKAR (2022): Correlation does not imply causation: decline of house sparrow overshadowed by electromagnetic radiation. *Urban Ecosyst.* 25: 1279-1295.
- NIEMI, G. J. & J. M. HANOWSKI (1984): Effects of a Transmission Line on Bird Populations in the Red Lake Peatland, Northern Minnesota. *The Auk* 101: 487-498.
- NISHIMURA, I., S. IMAI & T. NEGISHI (2009): Lack of chick embryotoxicity after 20 kHz, 1.1 mT magnetic field exposure. *Bioelectromagnetics* 30: 573-582.
- NISHIMURA, I., K. TANAKA & T. NEGISHI (2013): Intermediate frequency magnetic field and chick embryotoxicity. *Congenital Anomalies* 53: 115-121.
- PACKMOR, F., D. KISHKINEV, F. BITTERMANN, B. KOFLER, C. MACHOWETZ, T. ZECHMEISTER, L. C. ZAWADZKI, T. GUILFORD & R. A. HOLLAND (2021): A magnet attached to the forehead disrupts magnetic compass orientation in a migratory songbird. *J. Exp. Biol.* 224. jeb.243337. doi: 10.1242/jeb.243337.
- PAWLAK, K., Z. NIECKARZ, A. SECHMAN, D. WOJTYSIK, B. BOJARSKI & B. TOMBARKIEWICZ (2018): Effect of a 1800 MHz electromagnetic field emitted during embryogenesis on chick development and hatchability. *Anat. Histol. Embryol.* 47: 222-230.
- PAWLAK, K., A. SECHMAN, Z. NIECKARZ & D. WOJTYSIK (2013): Effect of weak electromagnetic field on cardiac work, concentration of thyroid hormones and blood aminotransferase level in the chick embryo. *Acta Vet. Hung.* 61: 383-392.

- PETERKA, M., R. PETERKOVÁ & Z. LIKOVSKÝ (1996): Teratogenic and lethal effects of long-term hyperthermia and hypothermia in the chick embryo. *Reprod. Toxicol.* 10: 327-332.
- PETRI, A.-K., K. SCHMIEDCHEN, D. STUNDER, D. DECHENT, T. KRAUS, W. H. BAILEY & S. DRIESSEN (2017): Biological effects of exposure to static electric fields in humans and vertebrates: a systematic review. *Environ. Health* 16: 41. <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0248-y>
- POPHOF, B., B. HENSCHENMACHER, D. R. KATTNIG, J. KUHN, A. VIAN & G. ZIEGELBERGER (2023): Biological Effects of Radiofrequency Electromagnetic Fields above 100 MHz on Fauna and Flora: Workshop Report. *Health Phys.* 124: 31-38.
- POURLIS, A. F. (2009): Reproductive and developmental effects of EMF in vertebrate animal models. *Pathophysiol.* 16: 179-189.
- RAJENDRA, P., H. N. SUJATHA, D. DEVENDRANATH, B. GUNASEKARAN, R. B. SASHIDHAR, C. SUBRAMA NYAM & CHANNAKESHAVA (2004): Biological effects of power frequency magnetic fields: Neurochemical and toxicological changes in developing chick embryos. *Biomagnetic Res. Technol.* 2: 1.
- RECUERO VIRTO, L., A. THIELENS, M. CZERWIŃSKI & J. FROIDEVAUX (2024): The exposure of nonhuman living organisms to mobile communication emissions: A survey to establish European stakeholders' policy option preferences. *Risk Analysis* 44: 2554-2568.
- REJT, L., T. MAZGAJSKI, R. KUBACKI, J. KIELISZEK, E. SOBICZEWSKA & S. SZMIGIELSKI (2007): Influence of radar radiation on breeding biology of tits (*Parus sp.*). *Electromagn. Biol. Med.* 26: 235-238.
- RITZ, T., P. THALAU, J. B. PHILLIPS, R. WILTSCHKO & W. WILTSCHKO (2004): Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass. *Nature* 429: 177-180.
- RODA, O., I. GARZÓN, V. CARRIEL, M. ALAMINOS & I. SÁNCHEZ-MONTESINOS (2011): Biological effects of low-frequency pulsed magnetic fields on the embryonic central nervous system development. A histological and histochemical study. *Histol. Histopathol.* 26: 873-881.
- SAKRAOUI, D., N. ZIANE, R. GHALEM, M. BOUKHEROUFA & W. HABBACHI (2024): Is there an effect of electromagnetic waves from base stations on the breeding success of *Ciconia ciconia ciconia* in Algeria? *Biosyst. Divers.* 31: 493-499.
- SCHNEIDER, T., H. P. THALAU & P. SEMM (1994a): Effects of light or different earth-strength magnetic fields on the nocturnal melatonin concentration in a migratory bird. *Neurosci. Lett.* 168: 73-75.
- SCHNEIDER, T., H. P. THALAU, P. SEMM & W. WILTSCHKO (1994b): Melatonin is crucial for the migratory orientation of Pied Flycatchers (*Ficedula hypoleuca Pallas*). *J. Exp. Biol.* 194: 255-262.
- SCHWARZE, S., N.-L. SCHNEIDER, T. REICHL, D. DREYER, N. LEFELDT, S. ENGELS, N. BAKER, P. J. HORE & H. MOURITSEN (2016): Weak Broadband Electromagnetic Fields are More Disruptive to Magnetic Compass Orientation in a Night-Migratory Songbird (*Erithacus rubecula*) than Strong Narrow-Band Fields. *Front. Behav. Neurosci.* 10: 55.
- SEMM, P. (1992): Pineal Function in Mammals and Birds is Altered by Earth-Strength Magnetic Fields. In: MOORE-EDE, M. C., S. S. CAMPBELL & R. J. REITER (eds): *Electromagnetic Fields and Circadian Rhythmicity*. Birkhäuser Boston, Boston, MA: 53-62.
- SHAFEEY, T. M., S. AL-MUFAREJ & H. A. AL-BATSHAN (2006): Effect of electric field during incubation of eggs on the immune responses of hatched chickens. *Electromagnetic Biol. Med.* 25: 163-175.
- SHALLOM, J. M., A. L. DI CARLO, D. KO, L. M. PENAFIEL, A. NAKAI & T. A. LITOVITZ (2002): Microwave exposure induces Hsp70 and confers protection against hypoxia in chick embryos. *J. Cell. Biochem.* 86: 490-496.
- SHERIDAN, E., J. RANDELET, T. L. DeVULT, T. W. SEAMANS, B. F. BLACKWELL & E. FERNÁNDEZ-JURICIC (2015): The effects of radar on avian behavior: Implications for wildlife management at airports. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 171: 241-252.
- SHERARD, R. M., N. MORELLINI, N. JOURDAN, M. EL-ESAWI, L.-D. ARTHAUT, C. NIESSNER, F. ROUYER, A. KLARSFELD, M. DOULAZMI, J. WITCZAK, A. D'HARLINGUE, J. MARIANI, I. MCLURE, C. F. MARTINO & M. AHMAD (2018): Low-intensity electromagnetic fields induce human cryptochrome to modulate intracellular reactive oxygen species. *PLoS Biol.* 16: e2006229.
- STREBEL, N., S. ANTONIAZZA, N. AUCHLI, S. BIRNER, R. BÜHLER, T. SATTLER, B. VOLET, S. WECHSLER & M. MOOSMANN (2024): *État de l'avifaune en Suisse*. Station ornithologique suisse, Sempach.
- SUN, H., Y. CHE, X. LIU, D. ZHOU, Y. MIAO & Y. MA (2010): Effects of prenatal exposure to a 50-Hz magnetic field on one-trial passive avoidance learning in 1-day-old chicks. *Bioelectromagnetics* 31: 150-155.
- THALAU, H. P. (2002): Embryonalentwicklung unter dem Einfluss hoch- und niederfrequenter Felder. Eine Bestandsaufnahme teratologischer Studien. *Edition Wissenschaft* 17: 3-77.
- THALAU, H. P., J. RACZEK, B. MARX, V. HOMBACH & J. COOPER (2003): Temperature Changes in Chicken Embryos Exposed to a Continuous-Wave 1.25 GHz Radiofrequency Electromagnetic Field. *Radiat. Res.* 159: 685-692.

- THURNHERR, D. (2020): *Vorsorgeprinzip – Verpflichtungen und Grenzen für die Verwaltung und weitere staatliche Akteure*. Gutachten im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Basel.
- TOMÁS, G., E. BARBA, S. MERINO & J. MARTÍNEZ (2012): Clutch size and egg volume in great tits (*Parus major*) increase under low intensity electromagnetic fields: a long-term field study. *Environ. Res.* 118: 40-46.
- TONELLI, B. A., C. YOUNGFLESH & M. W. TINGLEY (2023): Geomagnetic disturbance associated with increased vagrancy in migratory landbirds. *Sci. Rep.* 13: 414.
- VEICSTEINAS, A., M. BELLER, A. CINQUETTI, S. PAROLINI, G. BARBATO & M. M. TOSATTI (1996): Development of chicken embryos exposed to an intermittent horizontal sinusoidal 50 Hz magnetic field. *Bioelectromagnetics* 17: 411-424.
- WEBB, D. R. (1987): Thermal Tolerance of Avian Embryos: A Review. *The Condor* 89: 874.
- WHO (2006): *Static Fields*. Vol. 232. World Health Organization, Geneva.
- WILTSCHKO, W. (1968): Über den Einfluß statischer Magnetfelder auf die Zugorientierung der Rotkehlchen (*Erithacus rubecula*). *Z. Tierpsychol.* 25: 537-558.
- WILTSCHKO, W., R. FREIRE, U. MUNRO, T. RITZ, L. ROGERS, P. THALAU & R. WILTSCHKO (2007): The magnetic compass of domestic chickens, *Gallus gallus*. *J. Exp. Biol.* 210: 2300-2310.
- WILTSCHKO, W., U. MUNRO, R. WILTSCHKO & J. L. KIRSCHVINK (2002): Magnetite-based magnetoreception in birds: the effect of a biasing field and a pulse on migratory behavior. *J. Exp. Biol.* 205: 3031-3037.
- WILTSCHKO, W. & R. WILTSCHKO (1996): Magnetic orientation in birds. *J. Exp. Biol.* 199: 29-38.
- WILTSCHKO, R. & W. WILTSCHKO (2003): Orientation behavior of homing pigeons at the Gernsheim anomaly. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 54: 562-572.
- WOELDERS, H., A. DE WIT, A. LOURENS, N. STOCKHOFF, B. ENGEL, I. HULSEGGE, D. SCHOKKER, P. VAN HEIJNINGEN, S. VOSSEN, D. BEKERS & P. ZWAMBORN (2017): Study of potential health effects of electromagnetic fields of telephony and Wi-Fi, using chicken embryo development as animal model. *Bioelectromagnetics* 38: 186-203.
- YAKYMENKO, I., A. BURLAKA, I. TSYBULIN, I. BRIEIEVA, L. BUCHYNSKA, I. TSEHMISTRENKO & F. CHEKHUN (2018): Oxidative and mutagenic effects of low intensity GSM 1800 MHz microwave radiation. *Exp. Oncol.* 40: 282-287.
- ZADEH-HAGHIGHI, H. & C. SIMON (2022): Magnetic field effects in biology from the perspective of the radical pair mechanism. *J. R. Soc. Interface* 19: 20220325.

Erich Bächler, Station ornithologique suisse, Seerose 1, CH-6204 Sempach
erich.baechler@vogelwarte.ch