



Les participants aux journées CRE 2024 (2 et 3 Octobre à l'INSA de Rennes) – Crédit photo : Evlin Yalcin.

Journées Compatibilité RadioÉlectrique (CRE 2024) : Introduction et problématique - Illustration au cas de porteurs terrestres – Synthèse des journées

Olivier Roncière

Expert technique Compatibilité Radio Électrique, DGA

Alain Alcaras

Expert Radio/CEM, Thales SIX

Organisées pour la première fois par le groupe Ouest de la SEE, la DGA et l'INSA de Rennes, ces journées furent l'occasion de très riches échanges autour d'un thème assez peu connu mais d'une importance de plus en plus manifeste. Cet article introductif définit le terme de « compatibilité radioélectrique », en explique les enjeux et les illustre en étudiant le cas des porteurs terrestres. Il conclut par le bilan des journées CRE 2024 et la présentation des autres articles du dossier.

La Compatibilité Radio Électrique (CRE), une branche méconnue de la CEM

La CRE est une branche de la Compatibilité Electro Magnétique (CEM) qui étudie les perturbations entre émet-

teurs et récepteurs radioélectriques (i) au sein d'une même structure, (ii) via les antennes et (iii) sur un large spectre fréquentiel. Ainsi la CRE est un domaine connexe et complémentaire de la « CEM fondamentale » qui, elle, va s'intéresser à l'étude des perturbations radioélectriques dans tous les autres modes de

couplage tels que : la conduction via la masse électrique, le rayonnement sur les boîtiers ou les câbles des dispositifs radioélectriques. D'ailleurs, selon l'héritage historique des différentes entités, la CRE peut aussi être nommée : CEM fonctionnelle, coexistence électromagnétique, compatibilité fonctionnelle

ou *Radio Frequency Interoperability* en anglais.

Il est légitime de s'interroger sur l'existence d'une problématique CRE puisque les normes de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) attribuent des bandes de fréquences différentes pour chaque service radiofréquence. Cette répartition fréquentielle n'est-elle pas un gage de fonctionnement en bonne harmonie ? La plupart du temps, la réponse est oui. Ainsi la radio FM ne vient pas perturber nos téléphones mobiles, la TNT laisse en paix les systèmes WIFI présents dans nos logements et les communications satellites ne gênent pas les services de télécommunications mobiles dédiés aux forces de sécurité (TETRAPOL). Alors, d'où vient cette problématique ?

La problématique CRE apparaît lorsque trois ingrédients sont réunis : 1) des puissances d'émission importantes (quelques dizaines de watts), 2) des récepteurs présentant des sensibilités basses et (3) une proximité entre les aériens (de l'ordre de quelques mètres à quelques dizaines de mètres) induisant un faible découplage entre antennes. Dans ce cas, une partie de la puissance émise par l'émetteur d'un système A va être captée, de manière non volontaire, par le récepteur d'un système B et peut perturber le fonctionnement de l'étage de réception. Pour illustrer la situation, imaginez-vous écouter un piano jouant une nocturne de Chopin, situé à 200 mètres de vous. Vous tendez l'oreille, car le son est faible à cause de la distance qui vous sépare de l'instrument. Mais en vous concentrant, vous entendez l'harmonie et la délicatesse des notes égrainées. Malheureusement, un événement inopiné vient faire irruption dans ce mélodieux contexte. En effet, la personne juste à côté de vous allume son enceinte portable et lance « *God save the Queen* » des Sex Pistols. C'est une musique qui s'écoute fort et il ne s'en prive pas en montant le son à fond, arrivant même à faire saturer les amplis de son enceinte qui génère toutes sortes de sons plus ou moins supportables. L'inopportun va même jusqu'à hurler le refrain « *NO FUTURE, NO FUTURE FOR*

YOUUUUU !!! ». Pour vous, le résultat est immédiat, malgré votre concentration et votre oreille tendue vers la sonate, l'écoute est très perturbée voire inaudible et la vocifération de votre voisin vous oblige même à vous boucher les oreilles afin de ne pas endommager votre audition. Vous venez d'expérimenter votre première problématique de CRE avec : (i) une puissance d'émission importante (votre voisin), (ii) un récepteur sensible (votre oreille) et (iii) un faible découplage (votre voisin étant situé à un mètre de vous, l'amplitude du son n'a pas eu le temps de diminuer).

De la capacité des systèmes radioélectriques à cohabiter dans un environnement électromagnétique dense

Dans le monde des radiofréquences, la problématique CRE est très similaire au cas précédent et est illustrée sur la figure 1. Considérons une structure représentant un pylône, un véhicule terrestre, naval ou aéronautique, sur laquelle deux systèmes distincts sont présents. Chacun des systèmes communique de façon indépendante avec un pion distant situé à plusieurs kilomètres de la structure. Les bandes de fréquence de ces deux systèmes étant bien séparées, il n'y a donc pas de raison de craindre une perturbation entre ces deux

systèmes. En effet, dans un monde idéal, le spectre fréquentiel de puissance émis par le système est tel que la puissance est uniquement présente dans la bande utile dédiée au système A. En dehors de cette bande de fréquence, la puissance est égale à « 0 ». Le système B qui est en réception sur la même structure reçoit un signal certes faible de son pion distant, mais le démodule sans difficulté. Mais, notre monde physique est imparfait et le spectre réel comporte deux types d'imperfections hors bande : le bruit large bande et les harmoniques du signal utile. Ces rayonnements non désirés sont dus aux défauts des composants constituant les systèmes radiofréquences : modulateurs, filtres, oscillateurs, amplificateurs, etc. Pour limiter le niveau de ces rayonnements non désirés, l'UIT impose des gabarits normatifs qui font force de loi ¹, représenté par le gabarit gris. Ainsi, pour chaque catégorie de service radioélectrique, un niveau de puissance hors bande à ne pas dépasser est spécifié. Ces niveaux ont été calculés pour permettre à de nombreux services de cohabiter sans perturbation. Dans une situation classique, des dizaines de systèmes radioélectriques fonctionnent normalement grâce à cette précaution. Ceci

¹ SM.329 : Unwanted emissions in the spurious domain, <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.329/en>

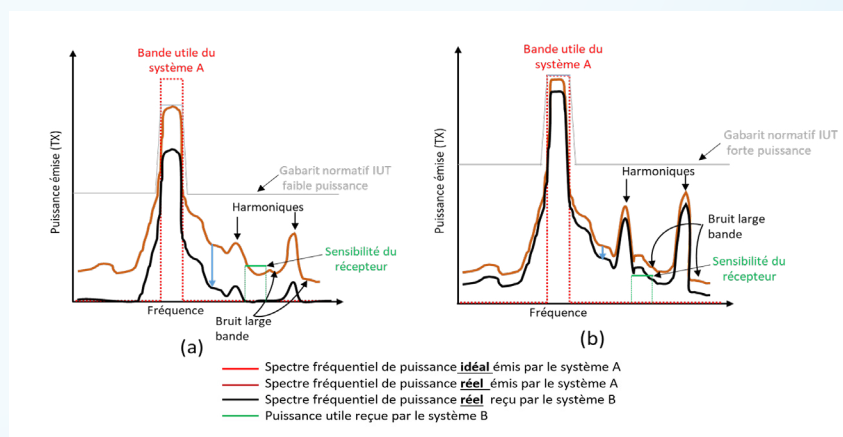


Figure 1 : Comparaison des phénomènes de CRE entre (a) situation classique : niveau d'émission faible et découplage important. La puissance interférente reçue par le récepteur dans sa bande de fonctionnement est très inférieure à sa sensibilité, induisant une absence de risque CRE et (b) situation particulière : fort niveau d'émission, découplage faible et sensibilité basse. La puissance interférente reçue par le récepteur dans sa bande de fonctionnement est de même niveau voire supérieure à sa sensibilité, induisant un risque CRE de type désensibilisation. La puissance interférente reçue par le récepteur (courbe noire) est égale à la puissance en additionnant le spectre émis par l'émetteur (courbe marron) et le découplage antennaire (flèche bleue).

●●● est illustré par la figure 1(a). Le spectre réel comporte un bruit large bande et des harmoniques, mais compte tenu d'une puissance d'émission limitée et de l'atténuation de propagation proportionnelle à la séparation spatiale entre l'émetteur et le récepteur, le niveau de signal non désiré perçu par le récepteur dans sa bande de fonctionnement est inférieur au niveau de signal utile. Dans la situation particulière où une forte puissance d'émission de l'émetteur, une sensibilité basse du récepteur et une proximité entre aériens sont conjuguées, le résultat est tout autre (figure 1(b)). En effet, outre le fait qu'une forte puissance d'émission favorisera des niveaux d'harmoniques supérieurs, la faible séparation spatiale limite la décroissance de la puissance. Le niveau de signal non désiré reçu par le récepteur peut alors dépasser celui du signal utile et par conséquent fortement perturber la démodulation du signal utile. Dans ce cas, le récepteur est dit désensibilisé, c'est-à-dire que sa sensibilité² dans ce contexte est moins bonne que sa sensibilité nominale. Fonctionnellement, cela se traduit par une portée maximale amputée, proportionnellement au niveau de signal non désiré. La désensibilisation et la saturation des récepteurs sont les deux conséquences visibles que la CRE étudie et cherche à minimiser.

² La sensibilité d'un système radioélectrique est définie comme le signal de plus faible niveau pouvant être démodulé.

“ L'objectif du traitement de la CRE est de trouver le meilleur compromis possible tendant vers une utilisation simultanée de tous les services radioélectriques nécessaires au bon fonctionnement d'une plateforme.”

La situation particulière décrite précédemment est typique des porteurs militaires. En effet, le nombre de services radioélectriques intégrés ne cesse d'augmenter. Systèmes de radiocommunications, radars, brouilleurs, systèmes de radionavigation équipent désormais ces plateformes, capables de récolter, traiter et diffuser les données terrain de manière collaborative et avec des débits croissants. La conséquence est une densification des systèmes antennaires et donc un terrain favorable à la problématique CRE. La défense n'a pas l'apanage de cette problématique qui s'invite de plus en plus souvent dans le monde civil.

Les enjeux associés à la problématique CRE sont très importants. Par exemple, dans le domaine de l'aéronautique, la CRE est impliquée dans la partie « *safety* » en protégeant les récepteurs participant à la sécurité du vol. Dans le domaine militaire, il n'est pas acceptable que des liaisons de télécommunications soit coupées lorsqu'un autre système radioélectrique se met à émettre. L'objectif du traitement de la CRE est donc de trouver le meilleur compromis possible tendant vers une utilisation simul-

tanée de tous les services radioélectriques nécessaires au bon fonctionnement d'une plateforme.

Risques CRE sur des véhicules terrestres

La figure 2 montre des exemples de véhicules militaires terrestres équipés de plusieurs radios induisant la présence de plusieurs antennes sur ce véhicule.

L'exemple de gauche est un cas type de véhicule non blindé pour lequel les antennes proches sont dans la même zone électromagnétique que les équipements électriques et électroniques du véhicule (et que les occupants du véhicule). L'exemple de droite est un cas plus fréquent dans le domaine militaire d'un véhicule blindé où le nombre d'antennes sur le toit peut atteindre une dizaine de nos jours, voire plus à l'avenir.

Les risques CRE qui en résultent peuvent être classés selon les trois types suivants :

- Risque de perturbation de rayonnement radioélectrique des antennes



Figure 2 : Exemple d'implantation complexe de radios sur un véhicule militaire terrestre.

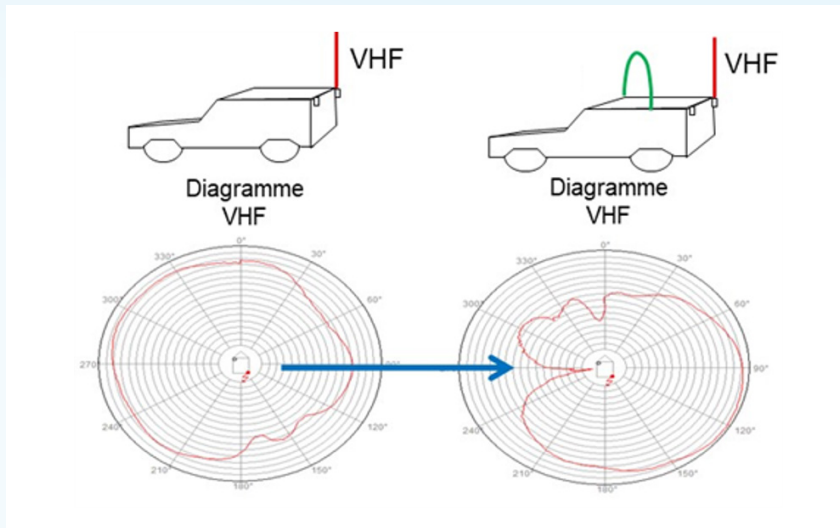


Figure 3 : Exemple de modification de rayonnement d'une antenne VHF par la présence d'une structure métallique proche (véhicule vu de dessus – rayonnement à angle de site nul).

- Risque d'interférences radioélectriques entre systèmes radios
- Risque d'interférences par bruit de structure d'origine radio

Risque de perturbation de rayonnement d'antenne

La figure 3 montre un exemple type de l'effet d'une structure métallique sur le rayonnement d'une antenne VHF installée sur un véhicule.

L'ajout d'une structure métallique (en vert sur la figure) a pour effet de déplacer la direction du plus fort gain VHF. Non seulement le gain maximal change de direction mais en plus, des « trous » de diagramme apparaissent dans la précédente direction de gain maximal, ce qui peut perturber les opérateurs dans leurs habitudes de positionnement optimal du véhicule.

Risque d'interférences radioélectriques entre systèmes radios

Un récepteur dont l'antenne est proche d'une ou deux antennes en émission (antennes « Tx ») est soumis aux risques suivants, face aux champs forts d'émission qui se couplent sur l'antenne de réception (antenne « Rx ») :

- Destruction ou saturation du récepteur ;
- Désensibilisation de réception par le bruit large bande d'émission ;
- Désensibilisation de réception par les fréquences harmoniques de l'émetteur ;
- Désensibilisation de réception par les produits d'intermodulation associés aux émetteurs proches du récepteur, dans le cas où plusieurs radios proches émettent simultanément ;
- Désensibilisation de réception par les phénomènes de transmodulation (ou cross-modulation).

Quantifier ces risques ces risques nécessite la connaissance précise des paramètres suivants :

- Caractéristiques d'émission de l'émetteur source potentielle de brouillage (non intentionnel) dans sa bande de fréquence de fonctionnement et hors de sa bande de fonctionnement ;
- Caractéristiques de susceptibilité et de sensibilité du récepteur victime potentielle de ce brouillage, dans sa bande de fréquence de fonctionnement et hors de sa bande de fonctionnement,
- Découplage entre l'émetteur et le récepteur, via le découplage entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception.

De façon bien moins fréquente, le fonctionnement d'un émetteur peut être perturbé par un autre émetteur proche. En effet, les forts signaux reçus émis par l'émetteur source et se couplant sur l'émetteur victime peuvent être perçus fausement par ce dernier comme un signal réfléchi trop fort. Cela peut engendrer l'arrêt de l'émetteur victime ou sa réduction de puissance.

Risque d'interférences par bruit de structure d'origine radio

Lorsqu'une antenne installée sur le toit du véhicule est en émission, cela induit des courants sur toutes les parties métalliques du véhicule. Sur certains véhicules, les parties métalliques sont isolées mais très proches les unes des autres à quelques endroits, de sorte que des différences de potentiel apparaissent et provoquent des petits claquages (voir figure 4). Ces étincelles très faibles rayonnent des champs électriques de niveau suffisant pour brouiller les antennes du véhicule en ré-

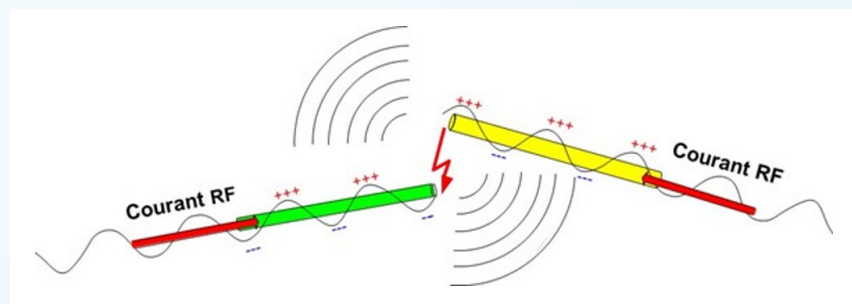


Figure 4 : Représentation schématique d'un claquage entre structures métalliques mis à des potentiels différents.

●●● ception. Ces impulsions d'arc modulent la fréquence du courant de l'émetteur brouilleur, il en découle un bruit centré sur la fréquence brouilleuse et large bande.

Retour d'expérience sur les découplages antennaires

Dans le cadre de la fourniture de radios tactiques terrestres aux armées françaises et étrangères, Thales a développé des compétences et des expériences d'analyse théorique et de validation d'installation des radios sur porteurs, concernant les risques CRE et les autres risques/contraintes électromagnétiques.

Analyse théorique

Le découplage entre antennes ne peut être calculé par l'expression classique du bilan de liaison dite équation des télécommunications. En effet, les conditions de « champ lointain » ne sont pas respectées lorsque les antennes sont très proches et les fréquences assez basses. Dans les conditions de champ proche, il faut considérer les phénomènes de « diaphonie » entre antennes.

Pour des fréquences inférieures à 90 MHz, la figure 5 montre les mesures de découplages entre 2 antennes monopoles VHF et entre 2 antennes dipôles VHF, avec des espacements différents typiques des distances entre antennes sur un toit de véhicule.

Alors que ces types d'antennes VHF ont des gains champ lointain du même ordre, les découplages en champ proche diffèrent significativement. En particulier, on voit que pour les monopoles, le comportement en-dessous de 50 MHz est très différent de celui des dipôles, à cause des couplages de type diaphonie.

Synthèses des valeurs typiques de découplage et des valeurs exigées

Un véhicule militaire terrestre peut comporter des radios HF, VHF et UHF qui fonctionnent en émission et/ou en réception. Lorsque parmi ces radios, certaines peuvent fonctionner en même temps, l'étude des risques CRE nécessite de définir le besoin en découplage antennaire entre les radios potentiellement brouilleuses et les radios potentiellement victimes. Ce besoin en découplage est défini à partir des caractéristiques d'émission du brouilleur et de réception des victimes.

Globalement, les besoins en découplage typiques entre les radios militaires sur le marché pour réduire les risques CRE sont de l'ordre de 50-70 dB. Or, on voit sur la figure 5, qu'en VHF les découplages sur un toit de véhicule sont très souvent inférieurs à 20 dB. Dans cet état, il est clair que le fonctionnement simultané de 2 ou 3 radios n'est pas possible sans dégradation importante de la performance des radios en réception.

C'est pour cette raison que Thales propose des radios qui intègrent des filtres de proximité de 40 à 50 dB d'atténuation, ce qui suffit pour permettre des fonctionnements performants de proximité des radios avec les faibles découplages antennaires.

Recommandation de distance minimale entre antennes

Les intégrateurs de véhicule ont besoin de connaître les distances minimales d'espacement entre antennes afin de prévoir l'implantation des radios, en tenant compte des contraintes CRE mais aussi d'autres contraintes radioélectriques (longueurs/pertes des câbles RF), mécaniques et ergonomiques. Or, le paramètre primaire qui détermine les risques CRE est le découplage antennaire et non pas la distance entre antennes. Le tableau 1 montre l'ordre de grandeur des distances entre antennes qui permettent d'assurer les découplages nécessaires sur les véhicules militaires actuels (expérience basée sur plusieurs dizaines de types de véhicules).

Ces valeurs montrent clairement qu'il n'y a pas de relation simple entre les valeurs de découplages et les distances entre antennes, même pour des antennes identiques, d'un véhicule à l'autre (Cf. les exemples de véhicules représentés en figure 2 ou en figure 6).

Il est donc compliqué de fournir à priori des recommandations fiables de

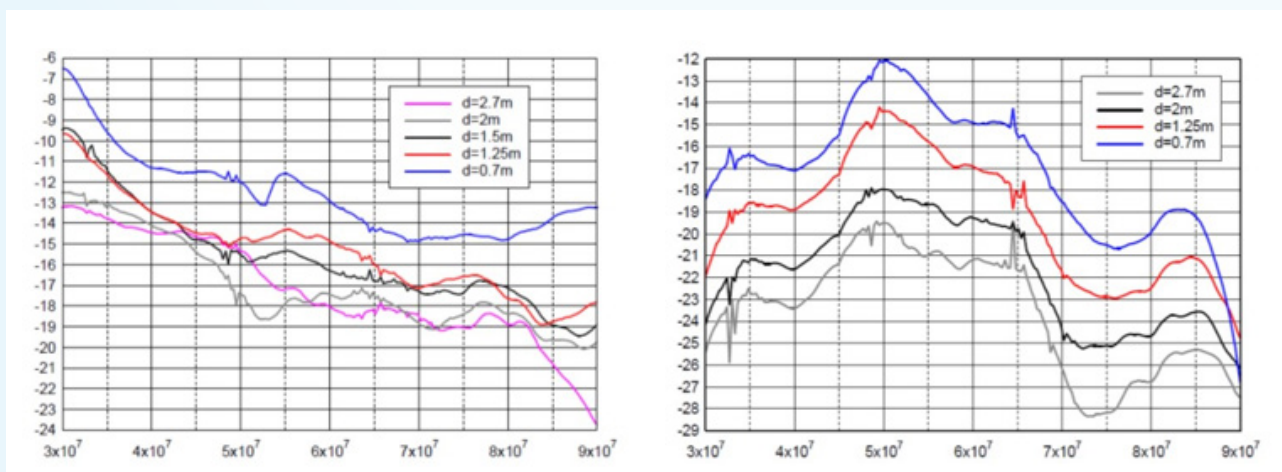


Figure 5 : Exemple de mesure de découplage entre 2 antennes monopoles (à gauche) et entre deux dipôles (à droites). La fréquence en Hz est en abscisse de ces courbes.

Fréquence des radios proches	Découplage minimal nécessaire	Distances minimales entre antennes pour assurer le découplage
HF-VHF	20 dB	1 m - 1,4 m
VHF-VHF	12 dB	1 m - 1,5 m
VHF-UHF	30 dB	1 m - 2 m
UHF-UHF	20 dB	1,5 m – 2,5 m

Tableau 1 : Relation typique entre le découplage antennaire et les distances entre antennes pour des postes radio disposant de filtres de proximité.

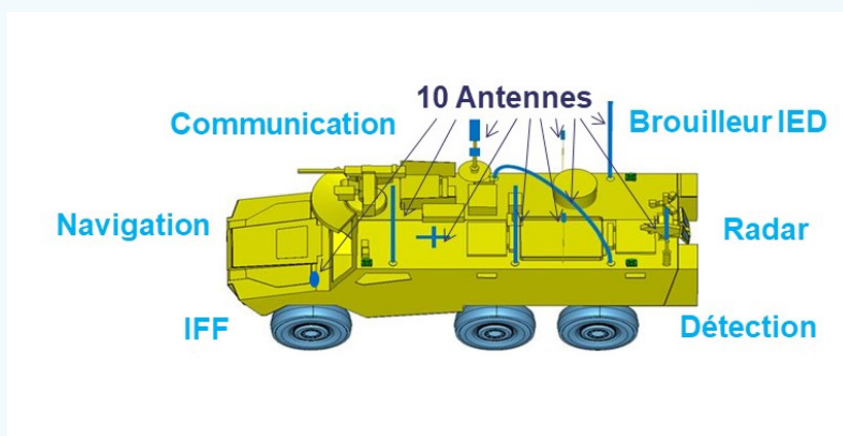


Figure 6 : Exemple de véhicule à forte complexité radioélectrique pour l'étude CRE.

- Le risque que les équipements soient perturbés par les champs forts émis par les antennes en émission (figure 7 à gauche).

- Le risque que les antennes en réception soient perturbées par les émissions « parasites CEM » des équipements (figure 7 à droite).

Les nombreux retours d'expérience montrent que la conformité des équipements aux normes CEM ne garantit pas la protection contre ces risques au vu des proximités avec les antennes. De façon synthétique, on peut préciser pour les véhicules militaires terrestres que :

- Les équipements conformes aux normes CEM militaires :

- peuvent supporter les champs forts des émissions 50 W en VHF et UHF ;

- peuvent être perturbés par les champs forts des émissions 125 W en HF.

distance entre antennes en phase de conception d'intégration radio. Il est préférable de réaliser des études théoriques en conception/ingénierie afin de garantir ces recommandations. Les modèles numériques actuels, utilisés par Thales, des véhicules et des antennes permettent de calculer assez finement les meilleurs emplacements d'antennes possibles.

Néanmoins, une fois les questions relatives à la CRE résolues, il subsiste des risques importants d'interférence des radios en mode réception et de gêne provoquée en mode émission, risques qui sont classés dans le domaine de CEM fondamentale.

Deux risques CEM principaux existent :

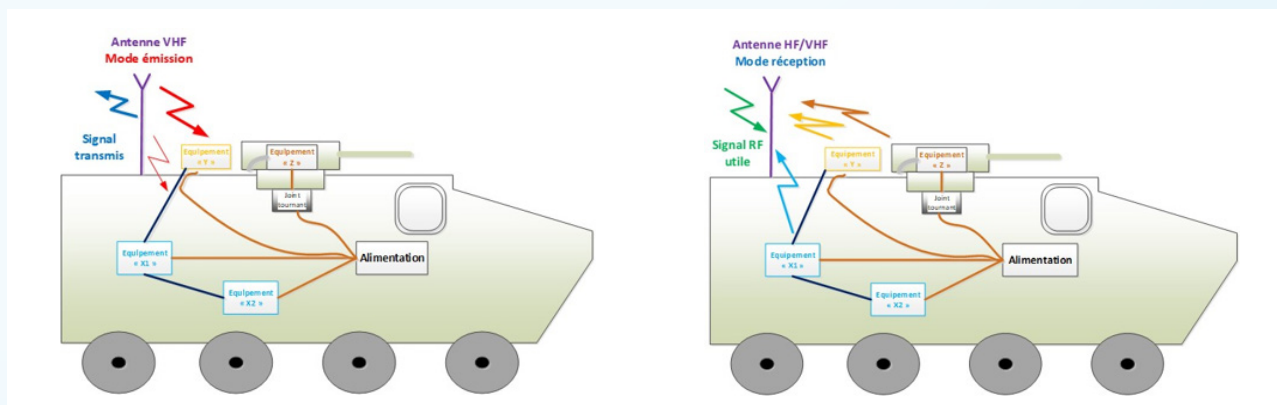


Figure 7 : Risques de susceptibilité du véhicule par les antennes en émission et de perturbation des antennes en réception par les émissions CEM parasites du véhicule.

- Les réceptions radio HF, VHF et UHF peuvent être perturbées par les émissions parasites CEM des équipements, même si ces équipements sont conformes aux normes CEM militaires.

Il est donc fortement recommandé de tester les équipements avant de les intégrer dans le véhicule, avec des niveaux « sévérés » en essais de susceptibilité champ fort et en mesure d'émission parasite.

Les journées d'études CRE 2024 et présentation du dossier

Les premières journées d'études CRE 2024 ont été mises sur pied pour créer une communauté technique autour de la CRE. Pour cette première édition, l'ambition était que chaque acteur de la chaîne prenne conscience des enjeux et des besoins, pour bénéficier, *in fine*, d'une approche globale. Ainsi, vingt et une présentations orales ont permis de réaliser un état des lieux du domaine, de présenter les innovations récentes, mais aussi d'évoquer les points durs pour des applications civiles et militaires. Soixante-quinze personnes ont assisté à ces journées : acteurs étatiques, ingénieurs issus de grands groupes industriels mais aussi de PME voire de startups ainsi que quelques enseignants-chercheurs.

La suite de ce dossier apporte un focus particulier sur quatre interventions marquantes de ces journées abordant divers aspects : enjeux, méthodologie d'études, modélisation et simulation électromagnétique, retour d'expérience, caractérisation et solutions futures.

Tout d'abord, l'article d'**Evlin Yalcin** et de **Robin Croisier** (Thales SIX) illustre la complexité de la CRE dans le domaine militaire et propose une approche adaptative favorisant la coexistence des systèmes radioélectriques. A l'inverse, les caractéristiques des récepteurs radioélectriques sont envisagées comme un angle d'attaque pour une utilisation offensive de la CRE. Enfin, une étude complète de

CRE est illustrée à travers l'exemple d'un drone civil.

Puis, la contribution d'**Alexandre Piche** (Airbus Opérations) présente les enjeux de la CRE dans le contexte aéronautique et spatial. Sont également détaillées des méthodologies innovantes de simulation électromagnétique réduisant les marges d'incertitude tant en CRE que sur les calculs de rayonnement des aériens sur porteur aéronautique.

L'article de **Benoît Le Lepvrier**, **Erwan Rochefort** et **Eddy Jehamy** (Naval Group et de Dassault Systèmes) propose une solution de réduction des couplages entre aériens dans un contexte naval. La solution, utilisant des métasurfaces électromagnétiques, réduit la puissance transmise d'un interférent vers un récepteur victime. Les méthodes numériques utilisées pour concevoir et intégrer ces structures sur porteur sont également détaillées.

Enfin, la mesure n'est pas en reste avec la contribution de **Laurent Lézé** et **Sébastien Palud** (TDF) mettant en lumière un concept novateur de caractérisation du rayonnement de systèmes antennaires en champ proche à partir des gammes de fréquence VHF. Basé sur le principe d'équivalence de Huygens, ce banc de mesures fournit également une modélisation du système antenne sous test, utilisable dans les simulateurs électromagnétiques afin de prédire les performances antennaires intégrées. ■

Les auteurs

Olivier Roncière est expert technique référent dans le domaine de la Compatibilité Radio Electrique pour la DGA. Ingénieur diplômé de l'INSA de Rennes (2003) et docteur en traitement du signal et télécommunications de l'Université de Rennes 1 (2007), il est spécialisé dans l'étude des problématiques de Compatibilité Radio Electrique et des systèmes antennaires. Il est également co-auteur de 10 publications dans des revues internationales ou de communications dans des conférences internationales et nationales.



Alain Alcaras est expert CEM/Radio à Thales. Son expertise couvre tous les risques et domaines électromagnétiques appliqués principalement aux porteurs terrestres (véhicule et fantassin), particulièrement dans le cadre d'intégration des radios. De formation électronique et hyperfréquence (Université de Limoges), il conçoit des outils d'ingénierie CEM et Radio et a été responsable du développement des compétences d'ingénierie et validation de laboratoire CEM système. Spécialiste des couplages électromagnétiques, il participe à des groupes de travaux à Thales (EWG EMC) et à l'extérieur (SEE, groupes normatifs). Auteur d'une centaine de publications dans ces domaines, il est sollicité comme reviewer IEEE dans les domaines d'expertise Radio/CEM.



Les articles

Coexistence électromagnétique des drones De la maîtrise à la domination du spectre	p.91
Nouveaux enjeux dans la compatibilité radiofréquences des systèmes sur les plateformes aérospatiales	p.97
Science des matériaux : Conception et modélisation numérique des métasurfaces appliquées au domaine naval	p.101
Caractérisation d'aériens en champ proche dans bande VHF-UHF (30-400 MHz). Une nouvelle approche pour repousser les limites actuelles des modélisations électromagnétiques	p.107