

# Des ondes non ionisantes électromagnétiques (ONIE) à toutes les étapes du processus productif dans le secteur de l'agroalimentaire

Par Hervé FLOCH et Patrice GAMAND

Pôle de compétitivité ALPHA – Route des Lasers & Hyperfréquences – ALPHA – RLH

Et Clément DAIGNAN, Nicolas PICARD et Laure SANDOVAL

SANODEV

Le secteur agroalimentaire est en pleine évolution pour prendre en compte la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires, la sortie du glyphosate, le suivi des cultures en temps réel et la numérisation de l'agriculture, tout cela dans un contexte de changement climatique. Afin de répondre aux exigences de protection des cultures, de conservation, de décontamination et de préservation des saveurs, tout en assurant l'innocuité du produit final pour le consommateur et en respectant l'environnement, le recours aux technologies dites physiques se révèle tout à fait pertinent. Les ultraviolets et plus particulièrement les UVC, les micro-ondes (3 - 300 GHz) notamment, ont la capacité de répondre à ces besoins. Nous montrons dans cet article les effets des micro-ondes sur le développement foliaire des plantes, conduisant ainsi à une solution de désherbage. Nous mettons également en évidence le fait que la lumière UV pulsée permet une décontamination des légumes ou des fruits offrant ainsi une solution de conservation efficace, économique et durable. De même, nous montrons que la modernisation des techniques agricoles motivée par un souci d'optimisation des ressources, des coûts et des rendements, s'appuie sur la mise en jeu des technologies de radiocommunications et d'imagerie. Les ondes radiofréquences permettent l'utilisation et le déploiement de capteurs communicants de type IoT et de suivre en temps réel des paramètres de pilotage des cultures. Les techniques d'imagerie sont également une aide précieuse pour l'étude de certains phénomènes comme le stress hydrique des cultures ou les maladies. Est également mis en évidence le fait que les ondes non ionisantes contribuent fortement à la transition écologique soit en appui au désherbage en évitant le recours aux produits phytosanitaires, soit au travers de solutions de décontamination et de désinfection ne recourant pas à l'emploi de produits chimiques. Les défis à venir concernent aussi les aspects formation des acteurs de la filière et surtout l'évolution du modèle économique de celle-ci.

## Introduction

Dans le secteur agroalimentaire, les attentes ont évolué. L'interdiction des produits phytosanitaires est en cours, notamment à travers le plan de réduction des produits phytosanitaires et de sortie du glyphosate. La grande distribution, face à l'avènement d'applications comme Yuka (l'application mobile qui scanne vos produits alimentaires pour en connaître la composition), a décidé de revoir la

formulation de certaines de ses recettes en en excluant certains conservateurs et produits présentant un risque ou un danger sanitaire.

La prise en compte croissante des effets néfastes à court, moyen et long termes de l'utilisation des produits chimiques sur l'environnement, que ce soit directement (sol, air, humain) ou indirectement (pollution des eaux), favorise l'adoption de procédés alternatifs.

Les dynamiques de changement climatique en cours font également apparaître de nouvelles problématiques culturelles, avec notamment la colonisation de certains biotopes par des espèces invasives nouvelles (végétales ou animales).

Afin de répondre aux exigences de protection des cultures, de conservation et de décontamination des produits, de préservation des saveurs, tout en assurant l'innocuité du produit final pour le consommateur et en respectant l'environnement, le recours aux technologies dites physiques se révèle tout à fait pertinent.

Les ultraviolets et plus particulièrement les UVC<sup>(1)</sup>, les micro-ondes notamment, ont la capacité de répondre à ces besoins.

Depuis les phases de culture jusqu'au conditionnement final des produits (bruts ou transformés), une solution efficace, économique et durable existe.

Ces technologies physiques permettent d'améliorer l'extraction pour les composés volatiles.

Pour la conservation des fruits, les UVC s'avèrent adaptés, car ils les traitent en surface sans modifier leurs propriétés organoleptiques. Pour la conservation des céréales, les micro-ondes présentent des avantages très intéressants en ce qui concerne le traitement en masse de ces produits et leur préservation.

Au-delà des procédés, la modernisation des techniques agricoles motivée par un souci d'optimisation des ressources, des coûts et des rendements, s'appuie sur la mise en jeu des technologies de radiocommunications et d'imagerie. Les ondes radiofréquences ont fait leur apparition dans l'agriculture au sens large et dans l'agroalimentaire en particulier, avec l'arrivée de capteurs communicants il y a une quinzaine d'années. Les technologies de communications sans fil permettent de transmettre les données enregistrées par les capteurs vers des terminaux mobiles ou fixes. Il est alors possible de connaître en temps réel un certain nombre de paramètres (l'humidité locale, la température locale...) et également de transmettre des images, ce qui permet d'être informé sur l'état des cultures et d'en optimiser le rendement. Parmi les standards de communication, nous pouvons citer le WiFi, les réseaux cellulaires ou les réseaux propriétaires comme SigFox (opérateur télécoms de l'Internet des objets – IoT). L'introduction de systèmes de localisation dans les équipements agricoles, comme le GPS, permet également une optimisation des opérations réalisées sur les cultures pour un compromis optimum entre rendement et coût. Les technologies de l'imagerie sont, quant à elles, des alliées précieuses pour établir un diagnostic sanitaire macroscopique des cultures (imagerie satellitaire), mais également pour réaliser une analyse microscopique pour anticiper l'apparition de maladies chez les plantes.

Dans cet article, nous développerons, dans une première et une seconde partie, l'utilisation des ondes hyperfréquences et de la lumière ultraviolette UVC pour les

cultures et dans le secteur de l'agroalimentaire. Dans une troisième partie, nous décrirons l'intérêt de l'utilisation de l'imagerie dans ces mêmes secteurs. Nous concluons en brossant un tableau des enjeux et défis à relever en matière d'utilisation des ondes non ionisantes par la filière agricole, notamment l'agroalimentaire.

## Utilisation des ondes hyperfréquences

La possibilité de détruire par micro-ondes des graines et plantes parasites, en remplacement de l'épandage d'herbicides, a été explorée dès le début des années 1970<sup>(2)</sup>.

Il s'agissait de détruire, avant ensemencement, les graines et les jeunes pousses de plantes non souhaitées, afin de donner à la plante utile une avance suffisante sur la réapparition des premières par voie éolienne.

Les tissus végétaux sont très sensibles à l'effet thermique des UHF. Ainsi, des feuilles de haricot mexicain *Prosopis glandulosa* Torr soumises à une température de 46°C dans un four classique ne montrent aucune lésion, alors qu'elles subissent une détérioration de 78 % exposées à la même température, obtenue cette fois par micro-ondes en seulement 6 secondes [5].

De même, le pouvoir germinatif de la graine du haricot *Phaseolus vulgaris* n'est pas affecté par un échauffement de 27 à 50°C résultant d'un placement dans un bain d'eau, mais décroît de 62 % si le même échauffement est obtenu par micro-ondes. L'interprétation de ce résultat n'est pas clairement établie, même il s'agit plus vraisemblablement d'effets d'absorption préférentielle en certaines zones de la graine, conduisant à des températures locales bien supérieures à la température moyenne.

Le problème consiste à atteindre la graine ou la racine, à travers une épaisseur variable d'une terre de composition également variable et habitée d'une faune et d'une flore, dont la présence est, elle aussi, souhaitée.

Il faut toutefois souligner que le facteur de dissipation est très largement dépendant de la nature du sol et de son taux d'humidité.

Le flux d'énergie nécessaire pour bloquer la germination a fait l'objet de diverses estimations : il varie de 100 à 1 600 J.cm<sup>-2</sup> et se situe en moyenne à environ 800 J.cm<sup>-2</sup> [6] et [7]. Il a été évalué à seulement à 183 J.cm<sup>-2</sup> sur la base d'essais de terrain réalisés à Freeport (Floride) [8]<sup>(3)</sup>.

(2) F. Davis et R. Menges du service de recherche agricole de l'UDA à Welasco (Texas), J. Wayland de l'Université d'agriculture et mécanique du Texas à College Station, M. Merkle de la société Phytocorp. A College Station et R. Robinson de la First American Farms de Freeport (Floride) [1], [2], [3], [4].

(3) À titre d'exemple, un applicateur de 1 kW se déplaçant à la vitesse de 1,5 km/h et muni d'un système rayonnant générant un champ constant sur 40 cm dans le sens du déplacement, soumettrait une graine de 1 cm<sup>2</sup> de section, enfouie à 2,5 cm de profondeur, dans un sol organique, à un flux correspondant à 93,2 % de la puissance incidente, soit 932 W pendant une seconde, c'est-à-dire une énergie de 932 J, et, dans un sol minéral, à un flux équivalent à seulement 28,4 % de la puissance incidente, soit une énergie de 284 J.

(1) UV les plus énergétiques, d'une longueur d'onde comprise entre 200 et 280 nm.

La molécule d'eau est composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. La différence d'électronégativité entre ces deux constituants lui confère un caractère dipolaire : ainsi, la molécule d'eau s'oriente suivant la direction d'un champ électrique extérieur. Soumise à un champ électromagnétique, la molécule pivote sans cesse et cette agitation induit une production de chaleur, et donc une élévation de la température.

L'action est analogue pour des molécules plus complexes, comme les lipides ou les composés aromatiques. Au niveau de la plante, et plus particulièrement des parties aériennes qui sont les premières exposées, cette augmentation de la température entraîne la mort de la plante, par hyperthermie. Le phénomène est le même pour le système racinaire qui est néanmoins plus difficile à atteindre du fait de l'écrantage du sol.

La Figure 1 ci-dessous montre l'augmentation de la température d'un plant exposé à un rayonnement micro-ondes. La température qui dépasse les 60°C entraîne la lyse cellulaire et donc la mort du plant.

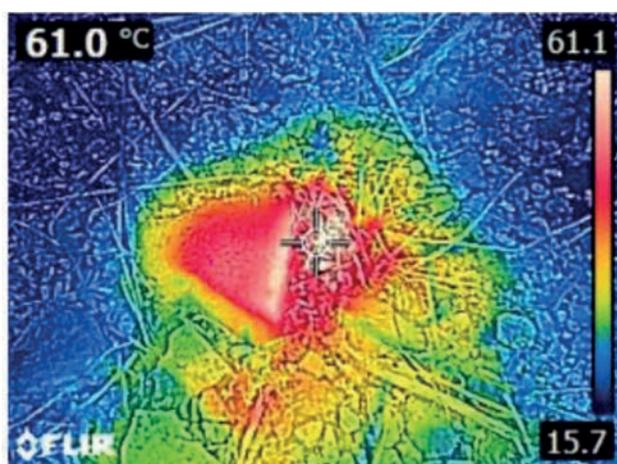


Figure 1 : Observation de l'augmentation de la température d'un plant exposé à un rayonnement micro-ondes – Source : SANODEV.

Les effets du stress électromagnétique induits sur la plante sont ainsi à rapprocher des effets du stress hydrique.



Figure 2 : Exemple de traitement par micro-ondes : AV = le plant avant irradiation ; AP = le plant après irradiation – Source : SANODEV.

En France, à la suite de travaux menés par le CERT-ONERA de Toulouse, des essais sur le terrain débutèrent en octobre 1977 au domaine de Pouyemenjon à Solferino (Landes). Le prototype de désherbage utilisé, mis au point par la société AUHFA, a été monté sur un tracteur dont la prise de force entraînait un alternateur. Les transformateurs et redresseurs de haute tension se trouvaient dans une armoire placée derrière le siège du conducteur ; les magnétrons et leurs dispositifs de refroidissement, ainsi que les isolateurs, étaient installés dans un coffre à l'avant du véhicule. De ce coffre sortaient des guides flexibles alimentant des cornets émetteurs. La puissance installée était de 10 kW et la vitesse de l'ordre de 1,5 km/h. Le désherbage a été efficace pendant un an sur une profondeur de 10 cm.

La Figure 2 ci-après donne un exemple de traitement par micro-ondes : on observe une dégradation de la partie foliaire.

## Utilisation de la lumière ultraviolette

### Une alternative à des méthodes conventionnelles de protection des plantes source de dommages importants

Dans leur environnement naturel, les plantes sont soumises à de nombreux stress. Ils peuvent être abiotiques (vent, gel, grêle...) ou biotiques (virus, champignons, insectes...).

Actuellement, la maîtrise de ces stress passe en agriculture conventionnelle par l'utilisation de produits phytopharmaceutiques. Cependant, de nombreuses études comme le contexte actuel montrent que l'utilisation systématique et abusive de certains de ces produits est à l'origine d'effets négatifs sur la santé et sur l'environnement, et s'accompagne de la présence de résidus indésirables dans les fruits et les légumes (Urban *et al.*, 2018).

Les stimulateurs des défenses naturelles, aussi appelés éliciteurs, semblent représenter une méthode de lutte alternative intéressante. Les éliciteurs agissent sur la plante en induisant une résistance *via* la synthèse de molécules de défense. De nombreuses molécules peuvent être ainsi concernées (formes actives d'oxygène, hormones, acide jasmonique, éthylène, acide abscissique) (M. C. Dufour, 2011).

De par leur action, ces molécules élicitrices peuvent jouer un rôle sur :

- la sensibilité spécifique de la plante à un agent pathogène ;
- le renforcement des cellules pour limiter le développement de l'agent pathogène ;
- l'agent pathogène directement ;
- les cellules de la plante.

Naturellement, plusieurs facteurs peuvent influencer la synthèse des molécules de défense (Dat *et al.*, 2000) :

- le stress hydrique : il limite directement la photosynthèse par la fermeture des stomates et favorise, par conséquent, la synthèse de formes actives de l'oxygène dans les chloroplastes ;
- les températures froides ;
- l'exposition aux hautes températures ;
- les métaux lourds ;
- les radiations UV ;
- le stress physique et mécanique que subit la plante ;
- une attaque par des agents pathogènes et ravageurs.

Les défenses des plantes peuvent également être stimulées par des facteurs physiques, comme des blessures ou des expositions aux UVC.

Les méthodes physiques d'élicitation, telles que l'application de rayonnements UV, ont l'avantage de pouvoir être utilisées en plus des méthodes conventionnelles existantes et d'être indépendantes des conditions exogènes.

### Les effets des UV sur les végétaux

Sur Terre, la croissance des plantes est possible grâce à la protection offerte par la couche d'ozone (O<sub>3</sub>), qui joue le rôle d'un écran vis-à-vis des rayonnements UV les plus énergétiques au niveau de la stratosphère : elle absorbe les rayons solaires UVC et une partie des rayonnements UVB.

Une des conséquences de l'application des rayons UV sur les plantes est la génération d'un stress oxydatif (Costa *et al.*, 2002) à la suite de la formation des espèces réactives oxygénées qui peuvent altérer les lipides, les pigments, les protéines et même les acides nucléiques (Dai *et al.*, 1997).

Les rayonnements UV de type A (315 à 400 nm) sont moins néfastes que les rayonnements UVB et UVC sur les plantes (Barta *et al.*, 2004).

Certains articles soulignent l'effet néfaste des rayonnements UV sur la production de la matière fraîche et sur le nombre de feuilles, dû aux dommages occasionnés aux voies photosynthétiques (Krizek *et al.*, 1998), quand d'autres mentionnent la biosynthèse d'anthocyanes, qui absorbent les UV dans le spectre de la photosynthèse et réduisent ainsi la capacité photosynthétique des feuilles, donc leur croissance (Tsormpatsidis *et al.*, 2007).

Un autre effet potentiel serait la production progressive de métabolites secondaires qui entreraient en compétition directe avec la plante pour l'assimilation du carbone qui est nécessaire à sa croissance.

Un travail mené par Mahdavian *et al.* (2008) sur le *Cap-sicum annuum* L., un piment d'ornement, montre l'im-

portance de l'accumulation des flavonoïdes, notamment la quercétine, en réponse aux effets d'une exposition de 27 minutes par jour, durant 14 jours, à des rayonnements d'UVA (320-390 nm), d'UVB (312 nm) et d'UVC (254 nm), correspondant respectivement à des doses de 6,1, 5,8 et 5,7 W.m<sup>2</sup>.

### Les UVC émis à faible dose semblent stimuler les défenses des végétaux

Les UV émis à des doses hormonales (doses hormiques) activent les mécanismes de défense naturelle des plantes (UVC ; Urban *et al.*, 2018), notamment chez la vigne (Xi *et al.*, 2014). En effet, soumises à une exposition soudaine et intense aux radiations UV, les plantes réagissent en synthétisant des ROS (Reactive Oxygen Species ou espèces réactives d'oxygène), qui sont des acteurs vérifiés des mécanismes de défense des plantes vis-à-vis des maladies et des ravageurs. La synthèse de ces molécules implique les voies métaboliques de défense, comme la synthèse de métabolites secondaires (Lamb et Dixon, 1997).

Les radiations UVB (280-315 nm) ont été identifiées comme permettant d'augmenter la résistance des feuilles des plantes aux attaques des agents pathogènes. Mais une période de rayonnement de plusieurs jours, ce qui représente un temps relativement long, est nécessaire pour que leur action soit efficace (Demkura et Ballaré, 2012).

Du fait de leur faible longueur d'onde, les rayons UV de type C (200-280 nm) sont plus énergétiques que les UVB. Ils sont arrêtés au niveau de la couche d'ozone par un mécanisme réactionnel de photolyse des molécules d'oxygène. Ils permettent de stimuler le métabolisme secondaire, notamment la synthèse de composés phénoliques tels que les flavonoïdes, les phytoalexines, les stilbènes ou le resvératrol. Des études ont montré l'accumulation de phytoalexines dans la peau d'éléments végétaux ayant fait l'objet d'un traitement UVC.

Plusieurs études réalisées par des précurseurs ont en particulier mis en évidence l'effet des UV sur la stimulation des défenses des plantes, des fruits et des légumes. Charles et ses co-auteurs ont montré, en 2008, qu'une exposition aux UV de type C stimulait la défense des tomates, après leur récolte, contre la pourriture causée par le *Botrytis cinerea*, un champignon microscopique. Par ailleurs, Demkura et Ballaré ont, en 2012, mis en évidence une voie de défense des plantes du genre *Arabidopsis* contre ce même champignon, quand celles-ci sont exposées à des rayons UV de type B (280 à 315 nm).

De nouvelles études ont montré que coupler UVC et UVB permettrait d'élargir les mécanismes de défense induits. Ces deux types d'UV pourraient en effet stimuler des voies de synthèses différentes et ainsi permettre une stimulation plus large et plus efficace de la plante vis-à-vis de ses agresseurs.

### Les UVC à haute dose détruisent les organismes

Les rayons UVC sont des rayonnements électromagnétiques de très haute énergie, dont le spectre de longueur d'onde s'étend de 200 à 280 nm. Les rayonnements avec une longueur d'onde de 254 nm sont utilisés pour leurs

propriétés germicides, en particulier bactéricides (Bank *et al.*, 1990). Ils agissent par dénaturation de l'ADN des micro-organismes.

Les résultats d'études montrent une diminution significative des teneurs en chlorophylle « a », en chlorophylle « b » et en chlorophylle totale de plantes soumises à des rayonnements UV – mais seulement sous l'effet des rayonnements UVB et UVC –, par comparaison avec celles des plantes témoins. Cette inhibition est plus marquée pour les plantes exposées aux rayonnements UVC.

Des effets similaires sont notés pour les caroténoïdes, avec des diminutions de 11 et de 20 % observées chez les plantes exposées respectivement aux UVB et aux UVC. Par ailleurs, les caroténoïdes jouent un rôle protecteur des plantes contre les rayonnements UVB (Rau *et al.*, 1991) et les rayonnements UVC (Campos *et al.*, 1991).

La réduction des pigments chlorophylliens a un effet négatif sur l'efficacité de la photosynthèse et, de fait, sur l'accumulation de la biomasse laquelle sert ainsi d'indicateur de la sensibilité aux rayonnements UVB (Smith *et al.*, 2000).

## Utilisation des techniques d'imagerie

Les systèmes à base de caméras optiques et hyper-spectrales sont munis de capteurs de lumière (dans la gamme des fréquences visibles, infrarouge, térahertz – 100 GHz à 30 THz), qui transforment l'intensité lumineuse en courant/tension électriques restitués sous forme de pixels. Les images sont alors traitées et analysées en utilisant des algorithmes sophistiqués pour déterminer, par exemple, le stress hydrique des cultures, certaines maladies comme la flavescence dorée dans les vignobles, les rendements de cultures ou le jaunissement de parcelles. La Figure 3 ci-dessous montre une cartographie de parcelles réalisée par imagerie représentant les effets de jaunissement des cultures.

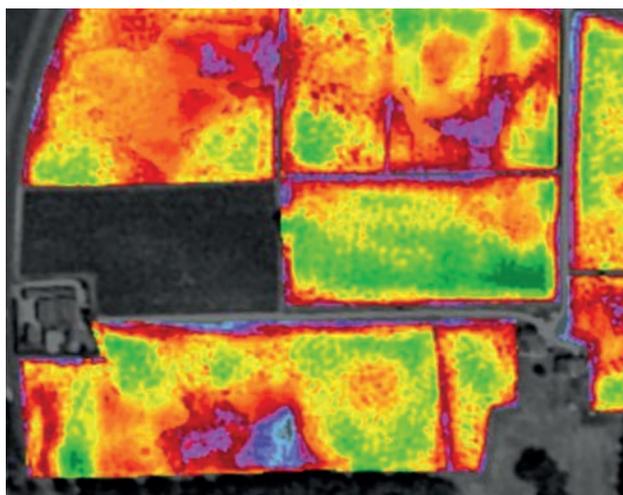


Figure 3 : Exemple typique d'une cartographie réalisée à partir de relevés opérés par caméras pour étudier le jaunissement des cultures – Source : SANODEV.

Ces caméras sont embarquées sur des drones ou des robots, ce qui permet de réaliser une cartographie aérienne des parcelles. Une localisation par GPS permet ensuite de déterminer avec précision les zones objet de la recherche.

La technologie lidar (télé-détection par laser) est également utilisée dans le domaine de l'agriculture. Un lidar est un système optoélectronique composé d'un émetteur laser, d'un récepteur comprenant un collecteur de lumière (dispositif optique) et d'un photodétecteur qui transforme la lumière en signal électrique, ainsi que d'une chaîne électronique de traitement du signal qui extrait l'information recherchée. Des relevés de l'état des forêts et des végétations, ou informant sur le niveau de rendement de certaines cultures, comme montré dans la Figure 4 ci-dessous, sont obtenus grâce à cette technologie.

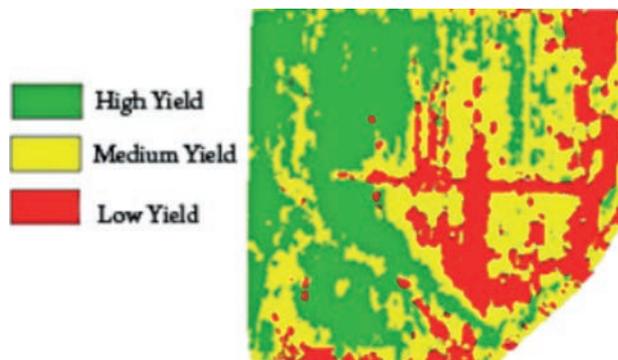


Figure 4 : Cartographie de rendement sur une parcelle obtenue par technique lidar – Source : SANODEV.

Ainsi, il existe plusieurs techniques faisant appel à la technologie d'imagerie. Dans tous les cas, elles nécessitent de faire appel à des algorithmes de traitement des données pour mettre en évidence les facteurs que l'on souhaite suivre.

## Conclusion : les défis à relever

Les technologies joueront certainement un rôle important dans l'agriculture de demain, et plus particulièrement dans l'industrie agroalimentaire. La maîtrise des ondes hyperfréquences ou des rayonnements UV permet de proposer des solutions pour, par exemple, se passer des produits chimiques ou des conservateurs qui peuvent s'avérer être des perturbateurs endocriniens. Pour ce faire, l'agriculture numérique, dite de précision, nécessite le déploiement à grande échelle des technologies de radiocommunications et d'imagerie. Outre ces défis techniques, il est nécessaire pour pouvoir utiliser ces outils de former les agriculteurs et d'éduquer les consommateurs sur les potentialités et les précautions d'usage de telles ondes. Il est également important de rechercher des solutions à faible consommation d'énergie, à rayonnement dirigé et protégé, et sans impact sur l'environnement.

Les ondes non ionisantes permettront ainsi de contribuer à une transition écologique, soit en appui au désherbage en évitant le recours aux produits phytosanitaires ou encore au travers de solutions de décontamination et de désinfection ne recourant pas à l'emploi de produits chimiques. Toutefois, le coût de l'utilisation des ondes non ionisantes et des technologies associées reste un enjeu important au regard du modèle économique de la filière agricole, surtout dans l'agroalimentaire.

## Le pôle de compétitivité ALPHA – Route des Lasers & Hyperfréquences®

ALPHA – RLH est un pôle de compétitivité *Deep Tech* de classe internationale basé en Nouvelle-Aquitaine rassemblant quelque 300 adhérents. Parmi ses membres, le pôle compte plus de 220 entreprises *high tech* et une cinquantaine d'organismes et d'établissements de recherche, de formation et/ou de transfert de technologies autour de sept domaines d'activité stratégiques (DAS) : trois DAS socles technologiques – « Photonique – Laser » et « Électronique – Hyperfréquences » et un nouveau DAS (en émergence) structuré autour des « Matériaux » pour la photonique et l'électronique – et quatre DAS orientés marché : « Communication – Sécurité » ; « Santé – Dispositifs médicaux – Autonomie » ; « Aéronautique – Spatial – Défense » et « Énergie – Bâtiment intelligent ». Enfin, le pôle s'appuie également sur un domaine d'activité transverse : « IoT – Industrie du futur ».

Pour autant ces domaines applicatifs ne sont évidemment pas les seuls concernés par les technologies « électronique et photonique » associées au numérique, au caractère très diffusant et constituant le cœur de l'expertise du pôle. Les transports, l'agroalimentaire, la cosmétique, le textile et l'économie circulaire, pour ne citer qu'eux, sont des secteurs qui regorgent de nombre de défis à relever, auxquels les membres du pôle savent répondre en proposant des solutions technologiques innovantes. L'entreprise SANODEV basée à Limoges est le parfait exemple de ces pépites utilisant les ondes non ionisantes électromagnétiques et acoustiques (ONIEA) au bénéfice notamment du secteur agroalimentaire <sup>(4)</sup>.

(4) Pour en savoir plus sur le pôle ALPHA – RLH : <https://www.alpha-rlh.com/fre>

## Références

[1] DAVIS F., WAYLAND J. & MERKLE M. (1971), "Ultra-high-frequency electromagnetic fields for weed control: phytotoxicity and selectivity", *Science* 173, pp. 535-537.

[2] DAVIS F., WAYLAND J., ROBINSON C. & MERKLE M. (1973), "Phytotoxicity of UHF electromagnetic fields", *Nature* 241, pp. 291-292.

[3] WHATLEY T., WAYLAND J., DAVIS F. & MERKLE M. (1973), "Effects of soil moisture on phytotoxicity of microwave fields", *Proceedings of the Weeds Science Society Symposium* 26, p. 389.

[4] MENGES R. & WAYLAND J. (1974), "UHF electromagnetic energy for weed control in vegetables", *Weed sci.* 22, n°6, pp. 584-690.

[5] WAYLAND J., DAVIS F., YOUNG L. & MERKLE M. (1972), "Effects of UHF fields on plants and seeds of mesquite and beans", *J. Microw. Power* 7, n°4, pp. 385-388.

[6] OLSEN R. (1975), "A theoretical investigation of microwave irradiation of seeds in soil", *J. Microw. Power* 10, n°3, pp. 281-296.

[7] MENGES R. & WAYLAND J. (1974), "UHF electromagnetic energy for weed control in vegetables", *Weed Sci.* 22, n°6, pp. 584-590.

[8] WAYLAND J., MERKLE M., DAVIS F., MENGES R. & ROBINSON R. (1975), "Control of weeds with electromagnetic fields", *Weed Res.* 15, pp. 1-5.