

ASSOCIATION DES RETRAITÉS DU GROUPE CEA
Groupe Argumentaire sur les Énergies Nucléaire et Alternatives

LA CONSERVATION DES ALIMENTS PAR IONISATION

RÉSUMÉ

L'ionisation des aliments est une technique de conservation peu connue du public. Son intérêt sanitaire est indéniable mais, alors que l'utilisation des rayonnements est bien acceptée dans des domaines comme la médecine nucléaire, son application à la chaîne alimentaire souffre d'un *a priori* sur son innocuité.

Alors, comment vaincre cette réticence ? Quelques connaissances de base sont nécessaires pour fournir un bon argumentaire.

Certains rayonnements traversent la matière et, sur leur parcours, les atomes peuvent acquérir une charge : c'est l'ionisation. Le principal effet est de conférer une grande réactivité aux structures moléculaires. Le résultat le plus connu est une destruction de micro-organismes et de germes qui, appliquée aux aliments, conduit à leur assainissement.

Il est possible, aussi, d'inhiber la germination des plantes ou la reproduction des insectes. Les aliments gagnent en qualité sanitaire et en durée de conservation. L'efficacité du traitement dépend de la dose reçue.

Aliments irradiés pouvant être commercialisés à ce jour en France :
Herbes aromatiques, épices, fruits secs, flocons et germes de céréales, abats de poulets, cuisses de grenouilles, crevettes, ovalbumine.

Le traitement ionisant consiste à soumettre les aliments à un rayonnement de faible puissance (gamma issu de cobalt 60, rayons X, faisceau d'électrons accélérés).

Il se prête bien aux aliments à l'état solide pour lesquels on ne dispose pratiquement pas d'autres procédés. L'absence de contact avec la source émettrice empêche toute contamination radioactive.

L'énergie des rayonnements utilisés interdit toute réaction nucléaire susceptible de rendre l'aliment radioactif.



Plus de 7000 publications, chiffre loin d'être égalé pour les autres procédés de conservation, rendent compte des expériences effectuées en matière de santé. Celles-ci n'ont jamais révélé d'effets toxiques.

Le traitement ionisant est une activité très encadrée qui est harmonisée sur le plan européen.

Des directives consacrent le bon usage et une commission a constaté qu'elles étaient largement respectées à ce jour.

Un gros effort a porté sur les deux clefs de la confiance du consommateur : le contrôle (détection et analyse des aliments irradiés) et l'étiquetage.

Logo obligatoire aux USA. pour les aliments traités par irradiation



L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), soucieuse des accidents dus à divers contaminants de la chaîne alimentaire, recommande aux organismes internationaux et aux ministères de la santé nationaux d'intégrer dans leurs stratégies l'ionisation des aliments.

Les points de résistance se situent au niveau des circuits de distribution soumis à la pression d'un public non averti et mal informé par des associations contestataires. Ceci n'empêche pas le procédé d'irradiation alimentaire de s'étendre en Europe et hors d'Europe, en particulier aux Etats-Unis, en Australie, et en Nouvelle Zélande.

De plus, un champ de recherche dans les domaines voisins comme les médicaments, les aliments, les produits cosmétiques.

1. LIMINAIRE

L'ionisation par irradiation des denrées alimentaires est un moyen récent qui permet à la fois d'assainir les aliments et d'allonger leur durée de conservation tout en respectant ou en améliorant leurs qualités (nutritionnelles, gustatives...).

Elle s'applique tout particulièrement aux aliments à l'état solide pour lesquels on ne dispose pratiquement pas d'autre procédé. Le public accepte volontiers la médecine nucléaire (l'emploi de matériel stérilisé par rayonnement ou encore la radiographie, les examens cliniques...), mais que répondre lorsqu'il montre quelque réticence dans la consommation d'aliments traités par irradiation ?

Certains rayonnements traversent la matière et, sur leur parcours, arrachent des électrons aux atomes, provoquant leur ionisation. Il en résulte la possibilité de modifier ou de détruire des structures moléculaires. L'application la plus connue est la stérilisation.

1. PROCÉDÉS D'IRRADIATION

Trois procédés (présentés ci-dessous) existent : faisceaux électroniques, rayons gamma et rayons X. Ils ont chacun leurs avantages et inconvénients. Mais tous produisent un rayonnement interagissant avec les nutriments alimentaires en générant des intermédiaires chimiques et biochimiques parfois très réactifs, plus ou moins transitoires et pour certains volatiles.

Plus encore que l'irradiation elle-même, ce sont les effets indirects de ces produits chimiques transitoires qui produisent l'effet biocide de ce rayonnement ; pour une dose donnée de rayons (gamma, E ou X) l'effet sera similaire en termes d'inactivation des organismes décomposeurs ; de frein au mûrissement, de blocage de la germination ou de la germination prématurées... Si elles sont utilisées sans dépasser les niveaux d'énergie spécifiés par la réglementation, aucune de ces trois sources de rayonnement n'induit de quantités mesurables de radioactivité supplémentaire dans les aliments traités.

1.1. IRRADIATION PAR FAISCEAUX D'ÉLECTRONS

L'irradiation par faisceau d'électrons utilise des électrons accélérés par un champ électrique à des vitesses proches de celle de la lumière ; générés dans le cas présent par des dispositifs bridés pour ne pas dépasser un niveau d'énergie de 10 MeV. Des réglementations internationales limitent l'énergie du faisceau de façon à assurer qu'aucune radioactivité ne soit induite.

Les électrons ont une section efficace nettement plus importante que les photons, de sorte qu'ils ont une pénétration faible et que les fruits doivent être traités individuellement. Le traitement est par contre rapide (quelques secondes). Les opérateurs sont protégés par des parois en béton.

1.2. IRRADIATION PAR RAYONS GAMMA

Ce rayonnement gamma (d'énergie de 1,17 à 1,33 MeV) est obtenu à l'aide de radio-isotopes, généralement du cobalt 60, et plus rarement par du césium 137, fournissant alors un rayonnement gamma un peu moins intense, de 0,66 MeV.

C'est la technologie la plus efficace en termes de coûts, car le fort pouvoir de pénétration des rayons gamma permet le traitement « à cœur » de palettes entières, ce qui diminue fortement la manutention. Une palette est typiquement exposée au rayonnement pendant plusieurs minutes, selon la dose que l'on veut obtenir.

La radioprotection prend la forme de boucliers en béton. La plupart des installations prévoit que la source radioactive puisse être immergée pour permettre la maintenance, l'eau absorbant tous les rayons. D'autres installations comprennent des boucliers mobiles. Il existe une conception qui maintient le cobalt 60 constamment immergé, et les produits à irradier sont placés sous des cloches hermétiques pour leur traitement.

1.3. IRRADIATION PAR RAYONS X

Les rayons X sont générés par des machines fonctionnant à ou en dessous d'un niveau d'énergie de 5 MeV. Le procédé d'irradiation est similaire à celui généré par rayons gamma ou photonique.

1.4. EFFETS DES DOSES

Les effets positifs sur les aliments irradiés (amélioration de la qualité sanitaire, de la durée de conservation,...) comme négatifs (mauvaises odeurs,...) dépendent de la "dose" reçue, exprimée ici en gray. 1 gray correspond grossièrement à l'apport d'une énergie de 0,24 calorie par kg d'aliment.

On peut ainsi obtenir des effets spécifiques sur les aliments.

Dose kGy	Effets	Aliments concernés
0,04 à 0,1	Inhibition ou retard de la germination	Oignons, ail, pommes de terre, fruits, légumes
0,03 à 0,2	Incapacité des insectes à se reproduire	Grains, fruits séchés, noix, légumes
1 à 3	Destruction totale des insectes	
1 à 6	Destruction partielle ou totale de la charge microbienne et des germes pathogènes	Volaille, viande, poisson, aromates, herbes
15 à 50	Stérilisation partielle ou totale	

Un surdosage produirait des effets organoleptiques négatifs (mauvaises odeurs) sans toxicité mais avec une mévente certaine de l'aliment.

Cependant, une stérilisation complète est à proscrire pour les aliments destinés au grand public car elle irait à terme à l'encontre de l'immunité développée naturellement.

À l'inverse, elle est très importante pour les malades immunodéprimés (grands brûlés, sidéens).

3. AVANTAGES – INCONVÉNIENTS DE L'IRRADIATION DES ALIMENTS

3.1. AVANTAGES

- Conservation des aliments plus longue, permettant, par exemple, le transport de denrées périssables sur de longues distances ou garder des denrées saisonnières plus longtemps
- Élimination de certains micro-organismes bactéries pathogènes ou non pathogènes, dont les moisissures par stérilisation totale.
- Élimination d'insectes et de leurs œufs.
- Neutralisation du pouvoir germinatif des tubercules, des graines ou des bulbes.
- Stérilisation à température ambiante (donc peu de pertes de qualités nutritionnelles), ou tout en gardant l'aliment dans la chaîne du froid (la variation de température due à un traitement de 10 kGy n'est que de 2,4 °C).

3.2. INCONVÉNIENTS ET QUESTIONS SUR LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

À des doses supérieures à 6 kGy, l'irradiation peut fortement dégrader les vitamines liposolubles (vitamine D notamment). En 2008, Caulfield a montré que l'irradiation gamma oxyde fortement les vitamines liposolubles dans les rations sèches, entraînant un effondrement de la teneur de certains produits en vitamines après irradiation. Il en va de même pour quelques autres nutriments, ce qui diminue les qualités nutritives du produit irradié.

Quand elle concerne des produits gras (viandes notamment), l'irradiation peut avoir un impact négatif sur le goût, l'odeur et la texture des aliments traités (rancissement).

En France, la dose maximale de 10 kGy est autorisée pour le traitement des céréales, de la farine de riz ou des épices, et la dose de 5 kGy ne doit pas être dépassée pour la viande ou le poisson.

Les aliments doivent être irradiés assez longtemps pour que les bactéries et moisissures ciblées soient tuées. Les graines (isolées ou dans les fruits) irradiées à ces doses ne peuvent plus germer, ce qui empêche leur mise en culture par le consommateur (mais empêche aussi le germe d'éventuellement se nécroser et former une pulpe noir).



Il existe une catégorie de mycètes (micro-champignons noirs mélanisés) dits « mycètes radiotrophes » qui sont naturellement résistants aux rayons gamma et qui savent même les utiliser pour doper leur métabolisme. Certaines de ces espèces sont des pathogènes communs, ubiquitaires sur la planète et pathogènes opportunistes pour l'Homme (chez l'immunodéprimé notamment).

4. QU'EN EST-IL DE L'ASPECT SANITAIRE ?

De manière générale, il faut avoir à l'esprit que :

Élimination d'insectes et de leurs œufs.

- les aliments traités ne deviennent pas radioactifs.
- la source de rayonnement n'est jamais en contact avec l'aliment : il ne peut y avoir de contamination radioactive

Et si des atomes radioactifs étaient produits au sein de la matière ?

Impossible, cette réaction nucléaire dépend de l'énergie des rayonnements.

Celle-ci est imposée par règlement pour le choix de la source de rayons gamma, et, limitée par construction, pour les machines (électrons ou rayons X). Les règles sont fixées par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé).

L'éventuelle toxicité des aliments ne pourrait-elle donc provenir que des produits physico-chimiques induits lors du traitement ?

Potentiellement, les cellules biologiques sont au cœur d'un système physico-chimique complexe et souvent instable qui peut générer de lui-même des radicaux libres* (annexe 2) voire, en cas de dérèglement, des molécules cancérogènes.

C'est pourquoi toute une série d'études toxicologiques (essais sur animaux, études radiochimiques) a été effectuée dans le cadre de programmes mondiaux. C'est le seul traitement pour lequel on dispose d'autant d'études (plus de 7 000 articles scientifiques).

Celles-ci n'ont jamais révélé d'effets toxiques. En revanche, elles ont incidemment servi à démontrer l'innocuité de la cuisson par micro-ondes et la très faible toxicité de certains traitements thermiques.

Les mêmes normes sanitaires s'appliquent à tous les aliments quel que soit le traitement utilisé. Les autorisations de commercialisation des aliments ionisés sont délivrées au cas par cas ou par famille de produits.

En France, la consommation d'une trentaine d'aliments ou de familles d'aliments a été autorisée à ce jour (soit avant l'application de la dernière directive européenne). Il s'agit d'herbes aromatiques, de fruits secs, de flocons et germes de céréales, d'abats de poulet, de cuisses de grenouilles, de crevettes, d'ovalbumine. 17 000 tonnes d'aliments ont été commercialisées en 1997 (moins depuis).

Le traitement par ionisation est autorisé dans les pays les plus avancés technologiquement.

C'est en Europe que la politique d'harmonisation des règles est la plus soutenue. Une directive consacrant le bon usage a été adoptée par le Parlement Européen et une commission a constaté que les dispositions de cette directive sont largement respectées à ce jour.

Au plan international, l'innocuité des aliments irradiés a été reconnue par l'OMS en 1980, pour des doses inférieures à 10 kGy puis en 1997, quelle que soit la dose.

L'OMS, soucieuse des accidents dus à divers contaminants de la chaîne alimentaire, recommande aux organismes internationaux et aux ministères de la santé nationaux d'intégrer dans leurs stratégies l'ionisation des aliments.

Trois objectifs sont visés :

- prévenir la propagation transnationale de micro-organismes pathogènes par les aliments destinés à l'homme ou aux animaux
- lutter contre les maladies d'origine alimentaire
- disposer d'aliments sains et nutritifs

5. L'IRRADIATION DES ALIMENTS DANS LE MONDE

Actuellement, sept pays de l'Union européenne autorisent l'irradiation d'aliments : la Belgique, la République tchèque, la France, l'Italie, les Pays-Bas, la Pologne et le Royaume-Uni. Les autres pays de l'Union européenne n'importent pas d'aliments irradiés.

Plus d'une soixantaine de pays ont dans le monde autorisé l'irradiation alimentaire, mais pas toujours aux mêmes conditions ni pour les mêmes aliments.

En 2010, il y avait 23 usines d'irradiation approuvées pour traiter des aliments dans l'Union européenne (UE), et 10 ailleurs dans le monde, habilitées à irradier des aliments destinés à la mise sur le marché de l'UE. Partout c'est le rayonnement gamma (Co-60) qui était le plus utilisé (27 des 33 installations sur 33, six étant des installations E-beam).

En France, toutes les installations d'irradiation alimentaire sont exploitées par la Société IONISOS. Elles sont implantées à Sablé sur Sarthe (près du Mans), à Pouzauges (près de Nantes), Dagneux (près de Lyon), à Marseille, à Orsay (région parisienne), à Chaumesnil (près de Troyes), à Berric (Morbihan).

6. QUEL AVENIR ?

Les opposants, outre les griefs liés aux présumés effets conduisant à une mauvaise alimentation ou à des pseudo-affections sanitaires, avancent des critiques de nature politique.

La puissance de ce traitement masquerait de mauvaises pratiques et amoindrirait la veille sur la conservation des aliments, ou encore, la production se ferait dans les pays industrialisés au détriment des pays en voie de développement.

Devant la pression exercée sur un public non averti, les circuits de distribution tendent à bloquer le développement du procédé pour ne pas « nuire à leur image de marque ».

Dans le même temps, l'IGGF (International Consultative Group on Food irradiation) qui regroupe des industriels du traitement aussi bien que des représentants d'administrations, soutient la valeur ajoutée que procure l'ionisation des aliments et cherche à la souligner par un étiquetage approprié.

Le recours à l'ionisation peut s'imposer de lui-même à la suite d'un événement sanitaire et économique marquant. Ainsi aux Etats-Unis en 1997, l'interdiction, de fait, de traiter par ionisation les viandes de bœuf, d'agneau ou de porc, fraîches ou congelées, qui étaient dues à certaines associations de consommateurs, a été levée à la suite d'un accident arrivé en août. La société Hudson Foods avait été obligée de retirer de marché 11000 tonnes de hamburgers congelés, soupçonnés d'être contaminés par la bactérie Escherichia Coli.

En fait, **le principe de précaution** est détourné de sa vocation initiale : il instaure un statu quo et empêche la recherche du meilleur produit.

Un groupe de travail de l'Académie de Médecine a constaté, au détriment de l'ionisation, un retour à l'utilisation de la fumigation par l'oxyde de méthylène, pourtant interdit en Europe car il est faiblement cancérigène.

C'est ainsi que l'on joue contre l'intérêt des consommateurs.

Un accident analogue, mais heureusement de faible ampleur, s'est d'ailleurs produit dans le sud-ouest de la France fin 2005 ; ses conséquences économiques auraient été moindres voire nulles si un traitement ionisant «barrière» avait été appliqué.

Il en est de même pour les produits « bio » commercialisés en Allemagne en juin 2011, qui ont contaminé 3 500 personnes en Europe, provoqué des troubles rénaux graves à plus de 830 consommateurs, et tué plus de 38 personnes¹, sans compter la ruine d'exploitations agricoles espagnoles injustement accusées !

Ceci ne doit pas masquer le problème de fond : **Comment gagner la confiance du consommateur ?**

Les contrôles techniques sont à la base de toute action vis-à-vis du consommateur :

- contrôle de qualité garantissant la bonne application du traitement ionisant et le respect des normes
- contrôle des fraudes portant en particulier sur l'étiquetage. Il s'agit de détecter l'absence d'étiquetage d'un produit ionisé ou l'étiquetage d'un produit non ionisé

Ceci suppose d'avoir à disposition des protocoles rigoureux de détection et d'analyse des produits d'ionisation * (annexe 2). Or, les produits de radiolyse ne sont pas spécifiques. Ils peuvent être rencontrés à l'identique dans des aliments traités différemment (par exemple thermiquement) voire se former naturellement (souvent par auto-oxydation). Les opposants à l'ionisation des aliments oublient de signaler cet aspect.

Pour pallier l'absence de spécificité des produits de radiolyse, un gros effort de recherche sur la mise au point de protocoles de détection, a été entrepris tant au niveau national qu'au niveau européen et dans le cadre des instances mondiales.

¹http://www.inra.fr/layout/set/print/la_sciences_et_vous/apprendre_experimenter/epidemie_escherichia_coli_en_Alle_magne

Les méthodes de détection de routine se doivent d'être rapides et de reposer sur des techniques facilement accessibles aux industriels et aux laboratoires de contrôle alimentaire.

Les plus utilisées sont du domaine de la microbiologie : par exemple, la coloration des ADN ou la comparaison entre le nombre total de micro-organismes viables attendus et celui des micro-organismes vivants après traitement. Ces méthodes permettent de conclure si l'aliment a été soumis à un traitement : mais lequel ? S'agit-il d'une irradiation, d'un fumage ou d'un traitement thermique ?

Aboutir à une véritable preuve, nécessite des méthodes plus élaborées et adaptées aux produits recherchés. Il n'y a pas de méthode générale. Pour exemple :

- s'agissant des lipides** (annexe 2), seules les coupures radio induites dans les longues chaînes moléculaires se situent en des points précis. L'analyse des brins identifie l'aliment irradié
- certaines coupures entraînent la formation de fragments possédant des propriétés magnétiques intrinsèques*** (annexe 2) mises à profit pour obtenir des signaux spécifiques, cette méthode est appliquée aux os de viande, arêtes de poissons, akènes de fraises, paprika et fruits séchés
- par chauffage rapide, les ions et les électrons formés au cours de l'ionisation peuvent se recombinaison avec une émission de lumière caractéristique. Ce procédé est particulièrement bien adapté aux cas des épices, des fruits des légumes déshydratés

Les protocoles de détection et d'analyse possèdent une bonne fiabilité : dans des essais de comparaison entre laboratoires sur 1 356 échantillons analysés, seuls 74 résultats (soit 2,3 %) avaient été sujets à caution (erreurs ou impossibilités de réponse) avant mise au point des protocoles définitifs.

Depuis ces essais, les protocoles ont été améliorés, divisant par plus de deux ces «erreurs».

7. AUTRES DOMAINES D'APPLICATION

La stérilisation des médicaments sous rayonnement est une alternative intéressante aux méthodes classiques, qui, comme le traitement thermique, peuvent entraîner une destruction du principe actif. C'est un secteur en pleine expansion qui, à l'exemple de la médecine nucléaire, ne devrait pas susciter autant de réaction psychologique que pour les aliments.

Dans un domaine quasiment vierge, la confidentialité des connaissances n'invite pas à une ouverture de la recherche.

Les règles de bonne pratique et de contrôle vis-à-vis des aliments seront reconduites et devront en plus s'inscrire dans celles de la pharmacopée. Les mêmes méthodes physico-chimiques de détection seront reprises moyennant une légère adaptation. Entre les pôles d'attraction que sont les aliments et les médicaments, toute une palette d'applications est offerte : cosmétiques, alicaments ..., ouvrant autant de domaines de recherche.

8. BILAN

La technique de conservation des aliments par ionisation s'applique particulièrement bien aux aliments à l'état solide. Sur le plan scientifique, la recherche fondamentale sur l'irradiation agroalimentaire n'est plus à faire mais restent seulement des études de recherche et développement pour adapter le procédé notamment aux pays du tiers monde.

L'innocuité des aliments irradiés dans les règles définies a été largement démontrée.

Des protocoles fiables de la détection et de l'analyse des produits et une application stricte des directives garantissent la sécurité sanitaire des aliments irradiés.

Les points de résistance se situent au niveau des circuits de distribution soumis à la pression d'un public non averti et mal informé par des associations contestataires.

Cette technique se développe dans le monde, en particulier aux Etats-Unis. La Nouvelle Zélande et l'Australie qui viennent de donner une première autorisation effective de radio-dé bactérisation des herbes, épices et plantes à infusion ainsi que des mangues d'importation constituent deux exemples récents.

L'annexe 1 détaille quelques autres méthodes de conservation.

9. SOURCES

- [1] Directive 1999/2/CE du Parlement Européen et du Conseil du 22/2/99, J. Off. Comm. Eur., 13/3/99.
[2] Avis de l'AFSSA concernant le projet de décret relatif à l'ionisation des denrées destinées à l'alimentation humaine ou animale et transposant dans le droit national les directives 1999/2/CE et 1993/3/CE, sur <http://www.afssa.fr>, 16/3/2001.
[3] <http://culturesciences.chimie.ens.fr/dossiers-chimie-societe-article-IonisationAliments.html>
[4] Planète info. Irradiation des aliments. <http://www.notre-planete.info>
[5] Wikipédia

Annexe 1 : les autres techniques de conservation

Il s'agit de techniques souvent anciennes et largement connues. Elles permettent aussi à la fois d'assainir les aliments et d'allonger leur durée de conservation tout en respectant ou en améliorant leurs qualités (nutritionnelles, gustatives ...).

Elles font appel principalement aux procédés suivants qui sont souvent complémentaires :

contrôle de qualité garantissant la bonne application du traitement ionisant et le respect des normes

- ajout d'additifs (y compris le sel et le sucre ou encore les antioxydants comme les nitrites)
- traitements à chaud (30 à 70°C pour le lait pasteurisé, 140-150°C suivi d'un refroidissement sous vide pour le lait UHT)
- à froid et sous vide (congelés et sur-congelés)

Annexe 2 : les méthodes d'identification et de dosage

L'irradiation provoque, dans un lipide, des coupures des longues chaînes moléculaires. Il en résulte des chaînes plus courtes et des radicaux libres *.

Ce phénomène peut aussi être spontané et d'autres traitements (auto-oxydation, chauffage) conduisent aux mêmes résultats. Mais, les coupures radio induites se situent à des points précis alors que dans les autres cas, les coupures sont aléatoires.

Le protocole consiste à comparer, par chromatographie en phase gazeuse **, la composition en lipides du produit à celle de ses produits de radiolyse (produits radio-induits). Si les proportions sont quasiment identiques, le produit a été ionisé, sinon, il ne l'a pas été.

Les radicaux induits dans les parties solides et sèches des aliments sont stables. Leur examen par RPE *** (résonance paramagnétique électronique) peut dans certains cas bien précis faire apparaître un signal spécifique de résonance.

À ce jour, trois protocoles normalisés concernent respectivement les os de viande et arêtes de poisson, les écailles de pistache, akènes de fraises, paprika et enfin, les fruits secs.

* Parmi les produits d'ionisation, les radicaux libres sont les plus actifs. Un radical libre est une espèce chimique contenant un électron non apparié (électron libre). Cette particularité confère au radical une grande réactivité. Par exemple, celle-ci peut être une des causes d'un rejet de greffe.

** La chromatographie est une méthode d'analyse des constituants d'un mélange fondée sur leur adsorption sélective par des solides pulvérulents ou sur leur vitesse de diffusion gazeuse dans des barrières.

*** La RPE est une méthode de spectroscopie qui permet la détection directe des radicaux libres. L'électron libre* leur confère une propriété magnétique intrinsèque. Un champ magnétique extérieur intense, en un site d'une molécule permet d'identifier, grâce aux interactions magnétiques qu'il subit, le fragment moléculaire auquel l'électron libre est rattaché.