

**Zeitschrift:** Archives des sciences [1948-1980]  
**Herausgeber:** Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève  
**Band:** 13 (1960)  
**Heft:** 9: Colloque Ampère

**Artikel:** Recherches de resonance electronique paramagnétique sur la photosynthèse des plantes vertes  
**Autor:** Nicolau, Claude  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-738583>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 02.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Recherches de resonance electronique paramagnétique sur la photosynthèse des plantes vertes

par Claude NICOLAU \*

Institut für Medizin und Biologie der Deutschen Akademie der Wissenschaften  
zu Berlin

---

Le processus chimique le plus répandu dans le monde organique est sans doute la photosynthèse. De nombreuses études lui ont été consacrées et depuis les travaux classiques de Wilstaetter et son école et jusqu'à présent un nombre important de données concernant le déroulement du processus de la photosynthèse ont été accumulées. Certaines étapes intermédiaires peuvent se dérouler, pendant les réactions photochimiques dans des milieux condensés. Par exemple, entre l'absorption du photon (ou des photons) et la réaction primaire, un transfert de charge (ou d'énergie) peut avoir lieu. Si ce transfert se répète- on a à faire à une migration de charge ou d'énergie à travers le système.

Cette étape, la manière dont l'énergie est dissipée, transférée pendant la photosynthèse, est encore un des points obscurs de ce processus si complexe.

Commoner, Townsend et Pake [1] avaient trouvé, en utilisant la méthode de Résonance Paramagnétique Electronique (RPE), une certaine concentration de radicaux libres dans différentes feuilles vertes, concentration qui augmentait d'environ six fois lors de l'illumination de ces feuilles.

A la suite d'études ultérieures, sur chloroplastes isolées de différentes plantes, Commoner et ses collaborateurs tirèrent la conclusion que les signaux de REP observés étaient dus à des oxydo-réductions enzymatiques, étapes intermédiaires de la photosynthèse [2].

Sogo, Pon et Calvin [3] en utilisant la méthode de REP ont obtenu des résultats fort intéressants concernant le délai d'apparition des radicaux libres dans des chloroplastes illuminées à des températures allant de  $-140^{\circ}\text{C}$  à  $+25^{\circ}\text{C}$ .

Toutes ces études de REP, bien que pour le moment qualitatives, ont indiqué quelles sont les informations sur la photosynthèse qu'on peut obtenir

\* En congé de l'Institut de Physique atomique, Bucarest, Roumanie.

par cette voie. Nous avons entrepris des mesures de résonance électronique paramagnétique sur des plantes vertes ainsi que sur certaines composantes des chloroplastes, afin d'obtenir des informations sur l'origine du signal REP, sur le mode de transfert de l'énergie pendant le processus et sur la signification des radicaux libres pour la photosynthèse elle-même.

L'objet de cette communication est de rendre compte de ces mesures et de leur interprétation possible.

1. *Les plantes vertes* (Nicolau, Thom et Brucker, [4, 5]), (Brucker et Nicolau, [6]).

On a utilisé des feuilles primaires de *Hordeum vulgare* s. Bartex. Les mesures ont été faites à l'aide d'un spectromètre de résonance paramagnétique en superhétérodyne à  $\lambda = 3,2$  cm, dans une cavité de 2,2 cm formée par deux aimants de  $\varphi = 10$  cm. La cavité rectangulaire, de mode  $H_{012}$ , était munie d'une fenêtre circulaire, de  $\varphi = 0,5$  cm permettant d'irradier *in situ* les feuilletes mesurées.

Une lampe à vapeur de Hg, de 500 W, était fixée en face de la cavité, et en filtrant les radiations de  $\lambda < 3100$  Å on irradiait le matériel se trouvant dans le résonateur.

Une première série de mesures porta sur des feuilles non illuminées. Si les feuilles étaient en contact avec l'air, on obtenait un signal de REP ayant le facteur  $g$  d'environ 2,00, une largeur de raie d'environ 10 gauss et une intensité indiquant la présence de quelques  $5 \cdot 10^{12} - 10^{13}$  spins impairs.

Le signal présentait ce qu'on pourrait appeler un début de structure hyperfine, mais malheureusement la résolution étant très médiocre (grâce à l'eau présente, surtout) ce serait difficile d'essayer d'analyser cette structure. Lorsque les feuilles de *Hordeum vulgare* étaient illuminées, en atmosphère oxygénée on obtenait un signal de REP ayant le facteur  $g \sim 2,00$ , la  $\Delta H_{1/2} \sim 8$  gauss et indiquant la présence de quelques  $10^{14}$  spins impairs.

Les feuilles étaient illuminées pendant 20 — 40 m avant de registrer l'augmentation évidente de l'intensité.

En résumant, on obtient un signal de REP chez les feuilles de *Hordeum vulgare* avant et après l'illumination.

2. Le rôle des radicaux libres dans la photosynthèse (si on peut parler de radicaux au sens chimique) n'est pas clair. Rabinowitch [8] conçoit ces radicaux comme des produits secondaires qui n'ont pas de relation directe avec le déroulement de la photosynthèse.

La hydroxylamine est un inhibiteur très actif de la photosynthèse. Shibata et Yakushiji [9] ont trouvé — dans l'appareil de Warburg — qu'une concentration de  $10^{-4}$  M de  $H_2NOH$  est suffisante afin d'inhiber la photosynthèse de *Chlorella* complètement, tandis que la respiration de la plante n'est pas affectée.

On considère aujourd'hui, généralement, qu'une concentration de  $10^{-6}$  M de  $H_2NOH$  suffit afin d'inhiber la photosynthèse chez la majorité des plantes.

Dans notre laboratoire, Thom et Khalil [7] ont entrepris une série de mesures sur des feuilles primaires de *Hordeum vulgare*, imbibées avec des concentrations de  $H_2NOH$  allant de  $10^{-10}$  M à  $10^{-2}$  M.

Des concentrations de  $10^{-10}$  —  $10^{-6}$  M  $H_2NOH$  n'ont pas d'influence mesurable sur la production d' $O_2$  (dans l'appareil de Warburg).

Le fait que les radicaux observés auparavant ne sont plus présents après l'administration de concentrations si faibles de  $H_2NOH$  [ $10^{-10}$  —  $10^{-6}$  M] indique que la formation de ces radicaux et le processus de la photosynthèse sont des phénomènes indépendants, au moins en première approximation.

3. Nous avons entrepris aussi certaines mesures sur les  $\alpha$  et  $\beta$ -carotènes, substances indispensables à la photosynthèse, mais dont le rôle n'est pas clairement établi.

Avec le  $\beta$ -carotène commercial on obtient un signal REP ayant le facteur  $g$  environ 2,00, la  $\Delta H$   $\frac{1}{2} = 10$  gauss et une intensité d'environ  $10^{15}$  spins impairs.

L' $\alpha$ -carotène donne un signal analogue mais moins intensif. Les deux signaux ne sont pas photosensibles.

Tenant compte de la structure du  $\alpha$  et  $\beta$ -carotène Nicolau et Simon [10] ont effectué le calcul de l'énergie des orbitales occupées les plus hautes et des orbitales libres les plus basses.

Nous trouvons, en appliquant l'équation de Pullmann [11]:

$$E = \alpha \pm k \beta$$

pour  $k$ , les valeurs suivantes:

Substance	+ $k$ *	— $k$ *	! $\Delta k$ ! *
$\alpha$ -carotène	+ 0,293	— 0,060	0,233
$\beta$ -carotène	+ 0,2170	— 0,043	0,1740

\*) En unités  $\beta$

où  $E$  = l'énergie de liaison totale du composé;  $\alpha$  = l'énergie de liaison d'origine coulombienne;  $\beta$  = intégrale d'échange entre deux atomes voisins, sans recouvrement;

En prenant pour  $\beta = 3,1 \text{ eV}$  on obtient pour ces deux substances la différence de l'énergie de l'orbitale occupée la plus haute et celle de l'orbitale libre la plus basse:

$$\Delta E_{\alpha\text{-carotène}} = 0,72 \text{ eV}$$

$$\Delta E_{\beta\text{-carotène}} = 0,54 \text{ eV}$$

Des mesures expérimentales de la semi-conductibilité d'un complexe de « charge-transfer » entre  $\beta$ -carotène et iode, ont donné une « energy gap » de  $0,55 \pm 0,05 \text{ eV}$ . (Huggins et Leblanc, [12]).

Le fait que le  $\beta$ -carotène a une « energy-gap » si basse nous permet de croire au rôle de conducteur d'énergie que ce dernier pourrait assumer pendant le processus de la photosynthèse.

C'est possible que le signal de résonance paramagnétique, obtenu des carotènes, soit produit par des trous dans les orbitales  $\pi$  du composé.

Ainsi on pourrait envisager le carotène comme un semi-conducteur avec des bandes de conduction formées par les O. M. délocalisées, et avec des impuretés — constituées de protons — ayant le rôle de pièges.

En essayant de tirer une conclusion des mesures faites, on saurait dire:

A. Le fait qu'un signal REP est obtenu dans l'obscurité en présence de l'oxygène, porte à croire qu'il s'agit de radicaux produits pendant le processus d'oxydation enzymatique du cytochrome *c*.

Selon Duysenz et Ames [13] une des premières étapes de la photosynthèse est l'oxydation du cytochrome *c* et la réduction du TPN.

B. Le signal obtenu après l'illumination pourrait être attribué au transfert d'énergie, une sorte de migration d'exciton, à travers la partie hydrophobe des chloroplastes [8]. La voie de migration serait peut-être le  $\beta$ -carotène.

Cette hypothèse est quand même sujet à maintes objections. Le fait que même à  $-140^\circ \text{ C}$ , Calvin et ses collaborateurs (loc. cit.) ont observé un signal chez les chloroplastes illuminées, lui prête néanmoins une certaine probabilité.

C. Les mesures faites sur les feuilles vertes imbibées de  $\text{H}_2\text{NOH}$  et dont l'activité photosynthétique n'était pas inhibé de manière mesurable, nous font croire que le mécanisme de migration d'énergie doit revêtir

aussi d'autres aspects que celui mesurable par la REP. Il s'avère que le point de vue de Rabinowitch sur le rôle secondaire des radicaux libres dans la photosynthèse est appuyé par ces expériences.

- D. Enfin la petite « energy-gap » du  $\beta$ -carotène et sa capacité de former des complexes du type « charge-transfer » appuient l'hypothèse du rôle de conducteur d'énergie que ce dernier pourrait assumer pendant le processus de la photosynthèse.

#### BIBLIOGRAPHIE

1. COMMONER, B., J. TOWNSEND and G. PAKE, *Nature*, 174, 689 (1954).
  2. ———, B. B. LIPPINCOTT, J. PASSONEAU, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 44, 1099, 1958.
  3. SOGO, P. B., N. S. PON, M. CALVIN, *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.*, 43, 387 (1957).
  4. NICOLAU, Cl., H. G. THOM, W. BRUCKER, *Tagung für Physiol. Chem.*, Berlin, sept. 1959.
  5. ———, H. G. THOM, W. BRUCKER, *Flora* (sous presse).
  6. BRUCKER, W., Cl. NICOLAU, *Naturwiss.*, 47, 89 (1960).
  7. KHALIL, M. H. S., H. G. THOM, *Flora*, 149, 323, 1960.
  8. RABINOWITCH, E., *Plant Physiol.*, 34, 213 (1959).
  9. Cité selon RABINOWITCH, E., *Photosynthesis and Related Processes*, N.Y., 1945.
  10. NICOLAU, Cl., Z. SIMON, *J. Mol. Biol.* (in press).
  11. PULLMANN, B., A. PULLMANN, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 44, 1197 (1958).
  12. HUGGINS, Ch. and O. H. LEBLANC, *Nature*, 186, 552 (1960).
  13. DUYSSENS, L. N. M. and J. AMESZ, *Plant Physiol.*, 34, 210 (1959).
-