

**Zeitschrift:** Saussurea : journal de la Société botanique de Genève  
**Herausgeber:** Société botanique de Genève  
**Band:** 16 (1985)

**Artikel:** Étude de la dynamique moléculaire dans les feuilles et les racines de l'épinard par la R.M.N. pulsée  
**Autor:** Lenk, Rudolf / Greppin, Hubert / Chamont, Sophie  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1099032>

### **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:** 16.04.2026

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

# Etude de la dynamique moléculaire dans les feuilles et les racines de l'épinard par la R.M.N. pulsée

RUDOLF LENK  
HUBERT GREPPIN  
&  
SOPHIE CHAMONT

## RÉSUMÉ

LENK, R., H. GREPPIN & S. CHAMONT (1985). Etude de la dynamique moléculaire dans les feuilles et les racines de l'épinard par la R.M.N. pulsée. *Saussurea* 16: 59-66. En français, résumé anglais.

La dynamique moléculaire dans les feuilles et racines d'épinard (*Spinacia oleracea*, var. Nobel) a été étudiée à l'aide de la résonance magnétique nucléaire (R.M.N.) en régime pulsé. Pour caractériser l'état de la plante on a introduit un paramètre nouveau,  $r$ , défini par le rapport des temps de relaxation longitudinale dans les feuilles et les racines. Les plantes ont été cultivées soit à la température constante de 20°C, soit dans un gradient des températures 20°C/10°C. L'évolution du paramètre,  $r$ , dans le temps a été interprétée dans le langage de la "biodynamique".

## ABSTRACT

LENK, R., H. GREPPIN & S. CHAMONT (1985). A study of the molecular dynamics in the leaves and the roots of spinach by the pulse NMR. *Saussurea* 16: 59-66. In French, English abstract.

The molecular dynamics in the leaves and the roots of Spinach (*Spinacia oleracea*, var. Nobel) was studied by the pulsed Nuclear Magnetic Resonance (NMR). In order to characterize the state of the plant, a new parameter,  $r$ , is introduced, which defines the ratio of the spin-lattice relaxation times in leaves and roots. The plants have been cultivated either at the constant temperature (20°C) or in a gradient of temperatures 20°C/10°C. The time-evolution of the parameter,  $r$ , is interpreted in the language of "biodynamics".

## Introduction

Un certain nombre de travaux (CHAMPAGNAT & JACQUES, 1979; MIGINIAC & SOTTA, 1976; MIGINIAC, 1978; CHAMONT & al., 1982) ont montré le rôle des corrélations (allocation des nutriments, des hormones, etc.) entre les divers organes de la plante (racines, tiges, feuilles) lors du développement. On fait appel le plus souvent à des méthodes traumatisantes. L'utilisation d'un traitement thermique, par exemple sur les racines, permet de modifier le fonctionnement de cet organe, sans toucher mécaniquement à leur intégrité et changer ainsi les corrélations avec l'ensemble de la plante. Les modifications de la relation racino-foliaire peuvent jouer un rôle important dans la croissance et la floraison.

Un traitement thermique des racines provoque de nombreux effets: modification de la capacité de produire et d'exporter les hormones et les nutriments (stock), modification de l'absorption et de la circulation de l'eau.

La résonance magnétique nucléaire (R.M.N.) n'a été, jusqu'à présent que peu appliquée à l'étude biophysique des végétaux (BACIC & al., 1978; STOUT & al., 1978; GUSTA & al., 1979; GRANGE & al., 1980). Cette méthode est cependant très efficace parce qu'elle est *non-destructive* et qu'elle donne une information sur la *dynamique moléculaire*, non-accessible par d'autres moyens.

Dans nos études précédentes (LENK & al., 1979, 1981), nous avons travaillé en régime permanent. Actuellement, nous utilisons la R.M.N. en régime pulsé pour déterminer le temps de relaxation spin-réseau,  $T_1$ . Cette procédure est plus précise et donne une information sur le mouvement moléculaire rapide qui contribue à l'énergie interne du système étudié.

Ayant déjà montré dans le passé (LENK & al., 1981) la dynamique moléculaire de l'eau dans la feuille, suite à la floraison, nous allons présenter ici, ce qui se passe dans la racine, suite à un choc thermique modifiant la corrélation racino-foliaire.

## Matériel et méthodes

Les akènes d'épinard (*Spinacia oleracea*, cv. Nobel) sont stérilisés (eau de Javel) et mis à germer dans les boîtes de Pétri sur le papier humide pendant 96 heures à l'obscurité (température 18°C). Les plantules sont ensuite disposées sur un film de plastic que l'on perce pour glisser les racines (3 cm). On dispose le support dans un système d'aquiculture, en présence d'eau pendant 72 heures. Enfin, on dispose les plantes dans les trous d'une plaque de Sagex que l'on mastique (fixation des plantes). On remet dans le dispositif d'aquiculture avec une solution nutritive (CHAMONT & al., 1982), que l'on change une fois par semaine.

Les conditions de culture sont les suivantes: température, 20°C, éclairement lumineux en lumière blanche: 20W/m<sup>2</sup>, TL 40W Sylvania, l'humidité de l'air est de 80% (HR). La photopériode (jour court) est de 8 heures de lumière et de 16 heures d'obscurité. Les plantes restent à l'état végétatif, un peu plus de trois semaines dans ces conditions. Dès 21 jours de culture, un lot de plantes reçoit un traitement thermique spécial. La température de la solution nutritive est régulée par un circuit thermostaté. Un dispositif d'isolation permet d'avoir

des températures différentes pour les racines et les feuilles (vérification dans les organes par un thermomètre électronique). Nous avons utilisé trois procédures différentes:

- 1) (21 + X) jours à la température constante de 20°C;
- 2) après 21 jours à 20°C, la température de la solution nutritive a été abaissée à 10°C, pendant Y jours (voir fig. 1a);
- 3) la même procédure que 2, mais après 7 jours, la température a été remise à 20°C ("puit de gradient des températures", présentés sur la fig. 1b).

Après la fin des traitements, les feuilles et les racines ont été soigneusement pliées dans les éprouvettes standard R.M.N. (diamètre = 5 mm). Ensuite, le contenu de l'eau dans les feuilles et les racines a été déterminé par pesée du matériel frais et du matériel séché pendant 72 heures dans une étuve à 100°C.

Les peroxydases ont été extraites selon la procédure habituelle (tampon phosphate pH7, 0°C) et mesurées au spectrophotomètre à 470 nm dans le mélange: tampon phosphate pH 6,1, gaïacol 8mM et eau oxygénée 2mM, lecture après 10' de réaction (PENEL, 1976).

Les apex des plantes ont été prélevés et fixés selon la procédure habituelle (formol, alcool, acide acétique, v/v: 5/90/5), puis coupé et coloré à l'hématoxyline ferrique de Regaud (AUDERSET, 1979). Des dessins à la chambre claire permettent d'estimer la largeur et la hauteur du dôme méristématique apical.

Nous avons utilisé les deux premières feuilles au-dessus des cotylédons et les grosses racines. Durant la période expérimentale de mesures (essentiellement entre les 21<sup>me</sup> et 35<sup>me</sup> jours), le poids frais et sec des deux premières feuilles ne varie pas beaucoup (état stationnaire). L'expérience a été répétée deux à quatre fois et porte sur quelques centaines de plantes.

L'appareillage R.M.N. a été décrit dans notre article précédent (LENK & al., 1984). Le temps de relaxation spin-réseau,  $T_1$ , a été mesuré à la fréquence de résonance 25 MHz et à la température ambiante. On a utilisé la séquence des impulsions standard 180°-tau-90° (LENK & al., 1979).

### Résultats expérimentaux

La mesure des poids frais et sec des plantes en culture hydroponique à 20°C, montre qu'il y a peu de différence entre les feuilles et les racines; ces dernières contiennent 2 à 3% d'eau en plus. La structure de ces deux organes est très différente: compacte pour les racines, aérée pour la feuille (aérenchyme, stomates). La figure 2 présente les temps de relaxation  $T_1$  des protons de l'eau, dans les feuilles (*F*) et les racines (*R*) d'épinards, en fonction du temps.  $T_1$  diminue au cours du temps, comme nous l'avions déjà observé lors de l'induction florale et le développement qui y fait suite (LENK & al., 1981). Le rapport de  $T_1$ , à 21 jours, sur  $T_1$  à 33 jours est environ 1,6. La floraison est associée à une forte diminution du temps de relaxation et au maintien d'une basse valeur.

L'examen de l'évolution de l'activité peroxydasique foliaire (fig. 3) permet de déterminer le moment où l'induction florale commence (PENEL, 1976), soit à la fin de la période de plus basse activité (le 30<sup>me</sup> jour dans notre expérience).

La dynamique moléculaire de l'eau semble davantage bloquée dans la racine, comme l'atteste la basse valeur du temps de relaxation  $T_1$ , alors même que la

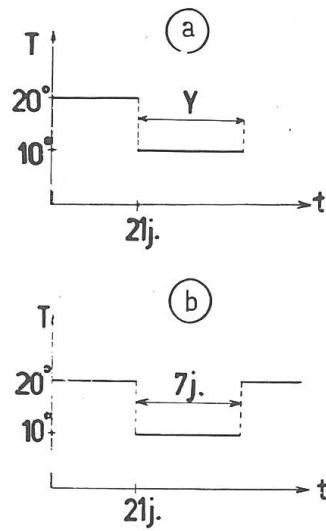


Fig. 1. – Définition des différentes procédures expérimentales (voir texte).

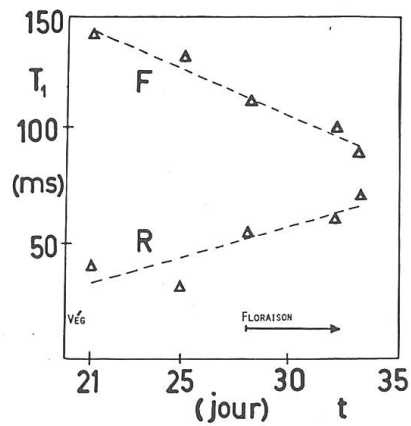


Fig. 2. – Evolution du temps de relaxation  $T_1$  au cours du temps dans les feuilles ( $F$ ) et les racines ( $R$ ) en condition de température constante de 20°C (les points sont les moyennes de 3 à 4 mesures). Vég: état végétatif.

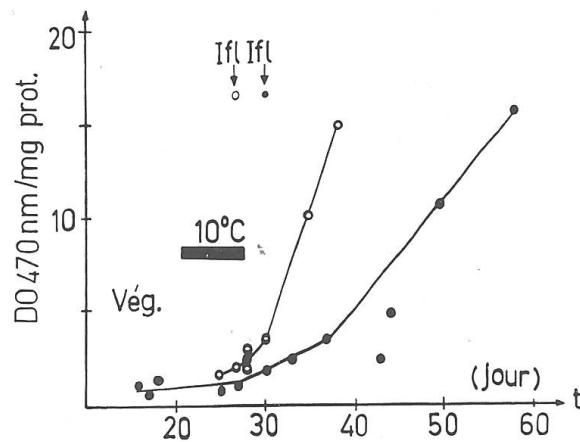


Fig. 3. – Evolution de l'activité peroxydasique foliaire à l'état végétatif et après l'induction florale ( $Ifl$ ) de plantes en jours courts. ● - ● - culture hydroponique à 20°C; ○ - ○ - idem, mais traitement des racines à 10°C pendant 7 jours.

concentration en eau est légèrement plus grande. Elle est progressivement libérée avec la floraison et le développement de la plante. Le rapport de  $T_1$  à 21 jours, sur  $T_1$  à 33 jours est environ 0,4.

Pour caractériser l'état biophysique de la plante, relatif à la dynamique moléculaire de l'eau dans la racine et la feuille (fonctions: production d'énergie, absorption d'eau et de minéraux, stockage, distribution, etc.), nous avons défini un paramètre,  $r$ , (= "gradient physiologique") donné par le rapport  $(T_1)_F/(T_1)_R$ , où  $(T_1)_F$  = temps de relaxation "spin-réseau" (longitudinal) dans les feuilles;  $(T_1)_R$ , dans les racines.

D'une manière générale, le temps de relaxation spin-réseau des systèmes aqueux des feuilles  $(T_1)_F$  est plus grand que celui des racines pour la même plante; le paramètre,  $r$ , est élevé dans la plante à l'état végétatif, il diminue considérablement avec la floraison (voir fig. 4).

Que se passe-t-il si nous modifions la corrélation inter-organique par un traitement thermique de la racine (10°C), le reste de la plante conservant la température de 20°C? Nous observons une forte augmentation de  $T_1$  dans la feuille et une diminution dans la racine (fig. 5 et 6). La différence de concentration en eau, entre la feuille à 20°C et la racine à 10°C est beaucoup plus marquée qu'à 20°C pour les deux organes (6 à 7% d'eau en moins dans la feuille). D'autre part les deux organes contiennent moins d'eau que leurs équivalents cultivés simultanément à 20°C (5 à 6% en moins pour les feuilles, 2 à 3% en moins pour les racines). Ce traitement semble légèrement accélérer l'induction florale (fig. 3 et 7). Certains auteurs l'ont déjà observé de manière nette sur différentes plantes (CHAMONT & al., 1982). Le froid provoque, dans la racine, une diminution de la respiration et de la production d'énergie, une diminution de l'import-export et de l'absorption d'ions et d'eau (sécheresse).

La floraison de l'épinard est accélérée dans les conditions de déficience hydrique, sous la température normale de 20°C (ROSSIER, 1975).

Si la plante est remise entièrement à 20°C, le système évolue rapidement comme les témoins (fig. 5b, 6b; témoins, fig. 2, 4).

### Conclusion

Récemment, nous avons proposé (LENK, 1979; LENK & al., 1981) une nouvelle interprétation des résultats de la R.M.N. biologique dans un langage de la thermodynamique statistique. Sur ce plan, le système aqueux biologique représente le réservoir le plus significatif du vivant, l'énergie interne et l'entropie sont déterminées par la cinétique des molécules de l'eau. Dans notre travail précédent, nous avons démontré que cette entropie cinétique (l'entropie des fluctuations) est proportionnelle à la "fréquence de corrélation",  $f_c$ :  $S_f \propto f_c$  (LENK, 1979).

Notons que la fréquence de corrélation représente un paramètre *statistique*, caractérisant la dynamique *brownienne* du système. La signification de cette approche est simple: puisque l'entropie détermine le degré d'incertitude (désordre), l'augmentation de la fréquence diminue la transparence du phénomène.

On peut aussi démontrer que le temps de relaxation spin-réseau,  $T_1$  est proportionnel à la fréquence de corrélation,  $f_c$ . Par conséquent, l'entropie est aussi proportionnelle à  $T_1$ :  $S_f \propto T_1$  (LENK, 1979).

Nous pouvons donc remplacer l'échelle de la variable de  $T_1$  par l'échelle de la variable de  $S_f$ . Ceci permet d'interpréter les figures 2 et 5 comme une

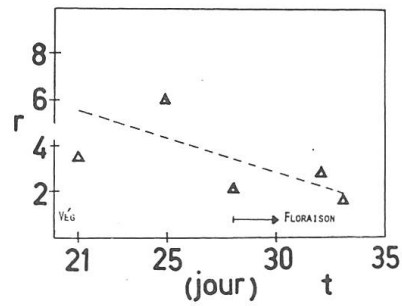


Fig. 4. – Evolution du rapport:  $r = (T_1)_F / (T_1)_R$  au cours du temps en condition de température de culture constante (20°C).

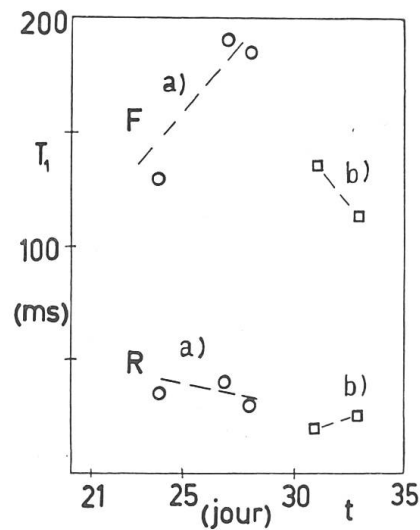


Fig. 5. – Evolution du temps de relaxation,  $T_1$ , dans les feuilles ( $F$ ) et les racines ( $R$ ); a, pendant un traitement thermique racinaire de 10°C (-○-○-); b, après le retour en condition normale de température de 20°C (-□-□-).

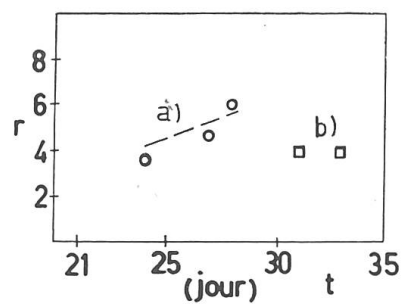


Fig. 6. – Evolution du rapport:  $r = (T_1)_F / (T_1)_R$ ; a, pendant (-○-○-); b, après un traitement thermique de 10°C (-□-□-), appliqué aux racines.

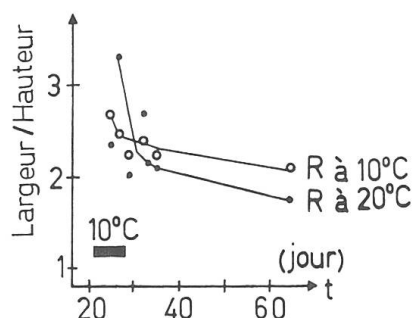


Fig. 7. – Evolution du méristème apical (indice largeur/hauteur) en jours courts prolongés (-●-●- culture hydroponique à 20°C; -○-○- idem, mais traitement des racines à 10°C pendant 7 jours.

évolution de l'entropie dans le temps. La figure 2 révèle que l'entropie  $S_f$  diminue en fonction du temps dans les feuilles et augmente dans les racines. En revanche, le traitement thermique de 10°C a provoqué l'effet inverse: l'entropie augmente dans les feuilles et diminue dans les racines au cours du temps (fig. 5).

Les figures 4 et 6 montrent l'évolution dans le temps du paramètre  $r$ , qui détermine en fait le rapport des entropies dans les feuilles et dans les racines. Pour le cas de la température constante de 20°C (fig. 4), la variable  $r$  a une tendance décroissante, alors que pour le traitement thermique de 10°C (fig. 6) elle est croissante. Elle décroît ensuite quand on supprime la contrainte thermique.

Compte tenu de ces résultats, notre travail constitue une contribution supplémentaire au problème de l'évolution de l'entropie dans les systèmes vivants. Originellement, la décroissance de l'entropie en biologie a été interprétée par Prigogine dans l'optique de la thermodynamique des systèmes ouverts. Notre interprétation de ce phénomène concerne plutôt l'état moléculaire du vivant: la croissance et la différenciation biologique conduisent à l'augmentation de l'ordre et au blocage de la dynamique moléculaire. Nos résultats apportent encore une autre information: l'évolution de l'entropie dans l'épinard n'est pas homogène, elle est l'inverse dans les racines par rapport aux feuilles. La variation de l'entropie dans les feuilles peut être partiellement compensée par la variation dans les racines.

Il est intéressant de relever qu'à l'état végétatif (21 jours) il y a dominance de la racine sur les feuilles (gradients hormonaux) et inversion de cette dominance au moment de l'induction florale. La diminution d'entropie se fait donc dans le système dominant.

#### REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement MM. Rossier et Delessert pour la culture des plantes et M<sup>lle</sup> Magnin pour la préparation des échantillons microscopiques.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUDERSET, G. (1979). *Etude du méristème caulinaire de l'épinard (Spinacia oleracea, var. Nobel) avant et après l'induction florale*. Thèse n° 1688, Université de Genève.
- BACIC, G. B., B. BOZOVIC & S. RATKOVIC (1978). Proton magnetic relaxation in plant cells and tissues. *Studia Biophysica* 70: 31-43.

- CHAMONT, S., B. SOTTA & E. MIGINIAC (1982). Influence de traitements thermiques appliqués au niveau des racines sur la croissance, la floraison et l'équilibre hydrique de *Chenopodium polyspermum* L. *Physiol. Vég. (Paris)* 20(1): 1-10.
- CHAMPAGNAT, P. & R. JACQUES (1979). *La physiologie de la floraison*. Ed. du CNRS, Paris.
- GRANGE, A., A. DUPANLOUP, P. DESCOUTS & G. BÉNÉ (1980). Evolution du temps de relaxation spin-réseau des protons de l'eau biologique au cours de la maturation des graines de Haricot. *C. R. Acad. Sci. Paris* 291: 307-309.
- GUSTA, L. V., D. E. FOWLER & D. G. STOUT (1979). A NMR study of water in cold-acclimating cereals. *Plant Physiol.* 63: 627-634.
- KAREGE, F. (1981). *L'activité peroxydasique: indicateur de floraison et d'inter-relations organiques chez Spinacia oleracea*. Thèse n° 1688, Université de Genève.
- LENK, R. (1979). Time-evolution of the entropy of fluctuations in some biological systems as investigated by NMR. *Phys. Letters* 62: 399-401.
- LENK, R., M. BONZON, P. DESCOUTS & H. GREPPIN (1979). La résonance magnétique nucléaire: une approche nouvelle en biologie végétale. *Saussurea* 10: 11-48.
- LENK, R., M. BONZON & H. GREPPIN (1981). Irreversible thermodynamics and biological evolution in spinach leaves, as studied by NMR. *Z. Pflanzenphysiologie* 101: 107-118.
- LENK, R., A. DUPANLOUP, P. DESCOUTS & H. GREPPIN (1984). Réalisation d'un spectromètre R.M.N. pour l'étude des végétaux. *Saussurea* 15: 25-31.
- MIGINIAC, E. (1978). Some aspects of regulation of flowering: role of correlative factors in photoperiodic plants. *Bot. Mag. (Tokyo)* 1: 159-173.
- MIGINIAC, E. & B. SOTTA (1976). Hommage au professeur Pierre Chovard. In: R. JACQUES (éd.), *Etudes de biologie végétale*: 407-417. Paris.
- PENEL, C. (1976). *Activité peroxydasique et développement chez Spinacia oleracea*. Thèse n° 1667. Université de Genève.
- ROSSIER, A. (1975). *Action de quelques facteurs du milieu sur la croissance et le développement de Spinacia oleracea L., var. Nobel*. Travail de diplôme (D.E.S.). Faculté des sciences et techniques, Besançon.
- STOUT, D. G., P. L. STEPONKUS & R. M. COTTS (1978). NMR relaxation times and plasmalemma water exchange in ivy bark. *Plant. Physiol.* 62: 636-641.