

Calibration du chlorophyllomètre et détermination de ses valeurs seuils dans le cas de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*, L.)

* Marouani A., Behi O., Bel Haj Salah H.

Unité Cultures Maraîchères et Florales (UCMF), Institut National Agronomique de Tunisie, 43 Avenue Charles Nicolle, Mahrajène 1082, Tunis, Tunisie.

E-mail correspondant autour: amel_marouani@yahoo.es – Tel.: 00216 25 856 370

Mots clé : Biomasse sèche totale, azote exporté, optimum d'azote, valeur seuil.

Key words: total dry biomass, nitrogen exported, optimum nitrogen, threshold value.

Palabras clave: Biomasa seca total, nitrógeno acumulado, optimo de nitrógeno, valor umbral.

1 RÉSUMÉ

Une bonne estimation du statut azoté de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.), moyennant le chlorophyllomètre, nécessite l'établissement des corrélations indice de réfraction de la chlorophylle-indice de nutrition azotée. Dans ce cadre, un essai a été réalisé au Centre Technique de la Pomme de Terre et de l'Artichaut situé au gouvernorat de Manouba, la Tunisie. L'essai consiste en un dispositif aléatoire complet à un facteur traitement formé de cinq doses d'azote: 0, 50, 150, 200 et 300 kg N/ha, avec quatre répétitions pour chaque dose d'azote. La variété de pomme de terre choisie est Spunta. Les résultats obtenus indiquent l'absence d'un effet dose d'azote sur la biomasse sèche totale et la quantité totale d'azote exporté. Par rapport à la valeur seuil de l'indice de nutrition azotée, 0,8, on remarque que les plantes sont à leur optimum d'azote au cours du stade de croissance végétative en présence d'une dose d'azote égale à 200 kg/ha. La corrélation entre l'indice de réfraction de la chlorophylle et l'indice de la nutrition azotée indique un degré de linéarité élevé avec un coefficient de corrélation égale à 0,6, seulement au cours du stade de croissance végétative. La valeur seuil du chlorophyllomètre définie au cours de ce stade est de l'ordre de 600.

ABSTRACT

A good estimate of the nitrogen status of potato (*Solanum tuberosum* L.), with the chlorophyll meter, requires the establishment of correlations refractive index of chlorophyll-nitrogen nutrition index. In this context, a trial was conducted at the Technical Center of the Potato and Artichoke located in the governorate of Manouba, Tunisia. The trial was a randomized complete treatment factor consisting of five nitrogen rates: 0, 50, 150, 200 and 300 kg N / ha, with four replications for each dose of nitrogen. The variety of potato chosen was Spunta. The results obtained indicated the absence of a dose effect of nitrogen on the total dry biomass and total nitrogen exported. Compared to the threshold value of the nitrogen nutrition index, 0.8, this study noted that the plants are at their optimum nitrogen during the vegetative growth stage in the presence of a dose equal to 200 kg nitrogen/ha. The correlation between the refractive index of chlorophyll and nitrogen nutrition index indicates a high degree of linearity with a correlation coefficient equal to 0.6, only during the vegetative growth stage. The threshold value of chlorophyll defined during this stage is of the order of 600.

RESUMEN

La estimación del estado nitrogenado de la patata (*Solanum tuberosum* L.) mediante el clorofilometro, necesita el establecimiento de correlaciones entre el índice de refracción de la clorofila y el índice de la nutrición nitrogenada. Por eso, un ensayo se ha llevado a cabo en el Centro técnico de la patata y de la alcachofa situado en la región de Manouba, Túnez. Se aplicaron cinco

dosis de nitrógeno (0, 50, 150, 200 y 300 kg N/ha). El ensayo se organizó como factorial completo al azar ($p < 0,05$). La variedad elegida fue Spunta. Los resultados han indicado la ausencia del efecto de la dosis de nitrógeno sobre la biomasa seca total y la cantidad total de nitrógeno. En comparación con el valor umbral del índice de nutrición de nitrógeno, 0,8, en su óptimo de nitrógeno durante la etapa de crecimiento vegetativo, en presencia de la dosis de nitrógeno 200 kg/ha. La correlación índice de refracción de la clorofila-índice de la nutrición nitrogenada indica un alto grado de linealidad con un coeficiente de correlación igual a 0,6 al principio del ciclo vegetativo de la patata. El valor umbral de la clorofila se define en esta etapa es del orden de 600.

2 INTRODUCTION

L'azote est le facteur clé de la production agricole de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) (Roger *et al.*, 1996 ; Schlesinger et Lichter, 2001). Sa disponibilité dans le sol, en doses optimales, détermine le rendement et la qualité de la production de la pomme de terre (N'Dayegamiye *et al.*, 2007). Par contre, tout déficit ou excès peut réduire le rendement (Schvartz *et al.*, 2005) et causer des problèmes environnementaux (Zebarth *et al.*, 2010). Les règles de modulations pour la fertilisation azotée visent à rendre possible la gestion des apports d'azote, afin de réduire les impacts négatifs de l'azote sur l'environnement. Elles se basent sur l'estimation des besoins de la culture (Goffart *et al.*, 2002) et des fournitures en azote minéral qui surviendront en cours de culture par la méthode du bilan prévisionnel (Roques, 1985 ; Cassman *et al.*, 1994). La variation de la fertilité azotée entre les champs et l'imprécision sur l'estimation de la fourniture du sol à cause des conditions thermiques et hydriques instables (Roger-Estrade, 2004) ont abouti à mettre au point des indicateurs permettant d'estimer le statut azoté de la pomme de terre (Goffart *et al.*, 2008) et de déceler l'établissement d'une carence avant même qu'elle ne soit dommageable (Parent, 2008 ; Parent *et al.*, 2008). Parmi ces indicateurs, on cite le chlorophyllomètre (Lasa *et al.*, 2005 ; Goffart, 2006). Il s'agit d'un outil d'aide à la décision dont le mode de diagnostic est non destructif (Goffart *et al.*, 2009). Il permet de mesurer la réflectance du couvert végétal grâce à une sphère d'intégration lumineuse située sur l'appareil (Chang et Robison, 2003). Selon

Matsunaka *et al.* (1997), Haverkort et Mackerron (2000) et Pagola *et al.* (2009), étant donné la présence d'une corrélation positive entre la teneur en chlorophylle de la feuille et son contenu en azote, le chlorophyllomètre est un appareil de mesure de l'indice de réfraction de la chlorophylle appelé aussi indice de verdure de la feuille ou transmittance différentielle de la lumière (Giletto *et al.*, 2010). Afin d'améliorer son efficacité pour gérer le statut azoté de la pomme de terre, on se base sur l'indice de la nutrition azotée (Angus et Moncur, 1985 ; Olesen *et al.*, 2002) qui assure une estimation instantanée du statut azoté de la culture et qui constitue le meilleur indicateur de l'état de nutrition azotée (Lemaire *et al.*, 2008). Son mode de diagnostic est direct et destructif et il est déterminé à partir de la courbe de teneur critique en azote qui décrit l'évolution de la teneur en azote au cours de la croissance de la plante (Lemaire et Gastal, 1997 ; Lemaire et Meynard, 1997 ; Jeuffroy et Bouchard, 1999 ; Chambenoit *et al.*, 2002 ; Xiaoping *et al.*, 2008). Afin d'intégrer le chlorophyllomètre dans le système maraîcher tunisien, la détermination de ses valeurs seuils (Houlès *et al.*, 2007) à partir des corrélations chlorophyllomètre-indice de la nutrition azotée est nécessaire. Pour cette raison, un essai a été installé au Centre technique de la pomme de terre et de l'artichaut Saida qui appartient au gouvernorat de Mannouba. La culture choisie pour mener au bout cette expérimentation est la pomme de terre à cause de son importance socio-économique.

3 MATERIELS ET METHODES

3.1 Caractéristiques climatiques et édaphiques du site expérimental: L'essai a été installé au Centre Technique de la Pomme de Terre et de l'Artichaut, au gouvernorat de Mannouba, qui appartient à la région semi-aride de la Tunisie. La température maximale a fluctué pendant cette période entre (+11,27°C) et (+34°C) avec une moyenne de 20,75°C. Quant aux températures minimales, elles ont varié entre (-1,32°C) et (+17°C)

avec une moyenne de 7,6°C. La quantité de pluie reçue durant le cycle de la culture est de 125,5 mm. Elle est déficitaire par rapport à une moyenne de 224 mm correspondante à la quantité de pluie reçue durant un cycle de la culture. Elle a été concentrée au mois de mars et elle a atteint 80 mm (Fig. 1) (Direction Générale de la Production Agricole, 2008).

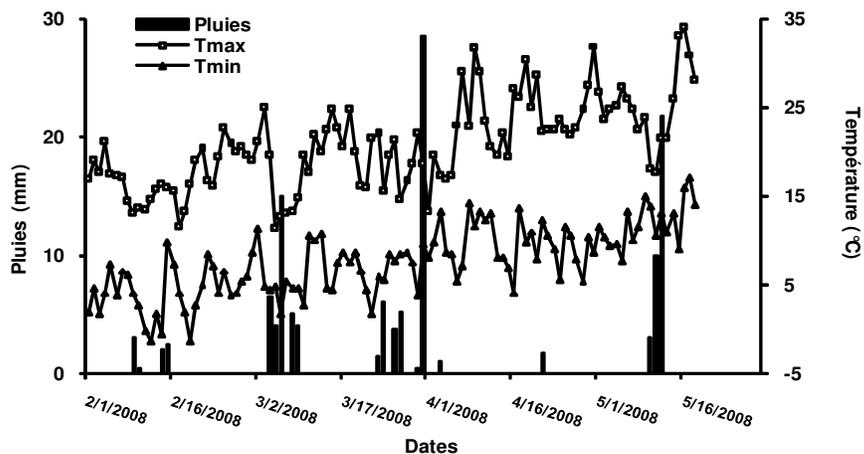


Figure 1. Évolution journalière des températures minimales et maximales et répartition des pluies.

Le sol du site expérimental est de texture limono-argileuse (46% argile, 26% limon). Ses teneurs en calcaire actif et en matière organique sont égales respectivement à 8 et à 2,4% alors que sa teneur en azote total est égale à 1,4%. La capacité d'échange cationique du sol est de 28,1 mol/kg de sol et les teneurs en phosphore assimilable et en potassium échangeable sont égales, respectivement, à 74 et à 880 mg/kg de sol. L'essai a été installé le 08 février 2008, date de plantation de la pomme de terre et s'est prolongé jusqu'au 03 juin 2008, date de la récolte qui a été mécanisée. Il consiste en un dispositif aléatoire complet à un facteur traitement formé de cinq doses d'azote: 0, 50, 150, 200 et 300 kg N/ha, avec quatre répétitions pour chaque dose d'azote. Les apports azotés ont débuté le 17 mars 2008 à 39 jours après plantation. Ils sont réalisés sous forme de nitrate d'ammonium (33,5% d'azote). Ils ont débuté le 17 mars 2008 (39 jours après plantation (jap)), lorsque la culture a atteint le stade

80% de plants levés, et se sont poursuivis jusqu'au 16 mai 2008 à 80 jap, à raison de deux fertirrigations par semaine. Pour subvenir aux besoins nutritifs de la culture, des apports d'acide phosphorique (50% P₂O₅, densité 1,50) et de sulfate de potassium (50% K₂O) ont été effectués.

3.2 Conduite de la culture: La parcelle expérimentale est de superficie totale égale à 2928 m². Elle comporte 20 blocs ayant chacun une superficie égale à 146,4 m² (3,2 m * 45,75 m). Chaque parcelle, séparée par deux interlignes, est constituée de 4 lignes de plantation avec une distance égale à 0,8 m entre chaque ligne (Fig. 2). Un système d'irrigation localisé goutte à goutte a été utilisé tout au long de l'expérimentation. Les goutteurs utilisés sont du type intégré et présentent un débit nominal de 4 l/h. La distance entre les goutteurs est de 35 cm, alors que l'écartement entre les lignes d'irrigation est de 80 cm, ce qui donne un débit d'irrigation de 14,2 mm/h. La quantité d'eau

utilisée pour l'irrigation a varié entre 3654 et 3897



Figure 2: Aspect général de la parcelle expérimentale.

3.3 Paramètres de mesure

3.3.1 Biomasse sèche totale (partie aérienne + tubercules + racines): L'arrachage des plantes a débuté le 10/04/2009 (66 jap) et s'est poursuivi jusqu'au 19 mai 2009 (101 jap). Au niveau de chaque répétition, un échantillon de trois plantes sur un mètre linéaire est arraché, puis mis séparément dans un paquet muni d'une vignette de reconnaissance. Le séchage s'effectue à l'étuve à une température égale à 75°C.

3.3.2 Suivi de l'état azoté de la pomme de terre: Les plantes prélevées sont nettoyées et mises à l'étuve à 75 °C. Une fois séchés, les échantillons sont broyés et bien mélangés. Le dosage de l'azote organique du végétal a été réalisé, sur une prise d'essai de 200 mg, selon la méthode kjedahl, par attaque à l'acide sulfurique à l'aide d'un digesteur suivi d'une distillation (Bremner, 1965).

3.3.3 Indice de la nutrition azotée : L'indice de la nutrition azotée (INN) est calculé comme le ratio entre la concentration en azote de la pomme de terre et la concentration qu'aurait permis, pour le même niveau de biomasse, une nutrition azotée de

m³/ha.

référence non limitées pour la croissance (Chambenoit *et al.*, 2002 ; Cru *et al.*, 2006):

$$INN = \%N_{\text{mesurée}} / \%N_{\text{potentielle}} \times 100$$

Avec N_{mesurée}: Teneur en azote mesurée, %N_{potentielle} de référence est égal à: %N_{potentielle} = 5,21 x (MS)^{-0,56} où 5,21 est la concentration optimale en azote pour une biomasse accumulée de 1,3 t/ha, MS est la quantité de matière sèche (en t/ha) et (-0,56), le coefficient de dilution de l'azote dans la biomasse accumulée au cours de la croissance.

3.3.4 Suivi de l'indice de réfraction de la chlorophylle : Le suivi de l'état de nutrition azotée de la culture a été réalisé à l'aide du chlorophyllomètre type Hydro-N-Tester (H.N.T.) (Fig. 3) à raison d'une mesure chaque semaine.



Figure 3. Utilisation du chlorophyllomètre type Hydro-N-tester dans la mesure de l'indice de réfraction de la chlorophylle.

3.4 Étude statistique: Pour étudier l'effet des différentes doses d'azote sur la croissance et le développement des trois variétés de pomme de terre, une analyse de la variance (ANOVA) des moyennes des différentes variables a été effectuée en plus d'une identification avec le test LSD (5%) des groupes homogènes. Le programme statistique utilisé est SAS (version 9,1).

4 RÉSULTATS

4.1 Biomasse sèche totale : La figure 4 illustre la cinétique d'évolution de la biomasse sèche totale (partie aérienne + tubercules + racines) de la variété Spunta selon le nombre de jours après plantation. Elle suit une allure curviligne croissante entre les stades de croissance végétative (62 jap) et de grossissement des tubercules (90 jap), puis elle décroît au stade de maturation des tubercules (101

jap). Les valeurs de biomasses sèches totales les plus élevées sont enregistrées à 90 jap et elles sont comprises entre 5,16 et 6,79 t/ha, selon le traitement azoté appliqué.

L'analyse de la variance n'a pas montré un effet significatif de la dose d'azote apportée au sol. En effet, les valeurs de biomasses sèches totales enregistrées en présence des doses d'azote 50, 150,

200 et 300 kg N/ha sont statistiquement similaires à celles du témoin (Fig. 4).

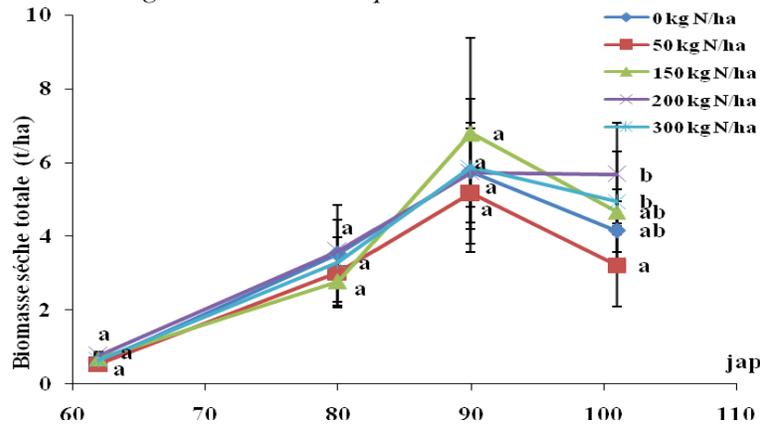


Figure 4. Évolution de la biomasse sèche totale (partie aérienne + tubercules + racines) en fonction du temps.

4.2 **Azote total exporté :** L'exportation de l'azote par les différentes structures de la pomme de terre a présenté une allure croissante le long du cycle de développement de la pomme de terre, pour les différents traitements azotés, comme le démontre la figure 5. A la fin du cycle, les

exportations azotées diminuent pour atteindre des moyennes comprises entre 47,14% et 71,97%. L'analyse statistique a montré que les plantes non fertilisées ainsi que celles soumises à des doses croissantes d'azote minéral présentent des moyennes similaires (Fig. 5).

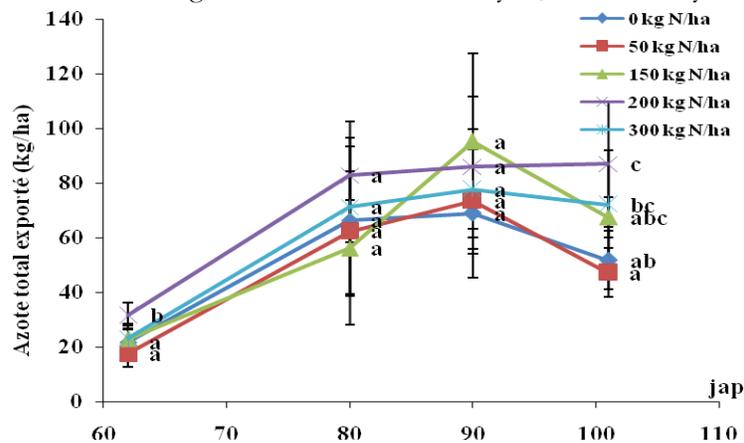


Figure 5. Évolution de l'azote total exporté en fonction du temps.

4.3 **Indice de la nutrition azotée (INN) :** En partant du principe du Chambenoit *et al.* (2002) qui considèrent les valeurs d'I.N.N. comprises entre 0,8 et 1 comme non limitantes, et à partir de l'évolution des I.N.N. enregistrées en présence des doses d'azote 0, 50, 150, 200 et 300 kg N/ha (Fig. 6), on peut conclure que, seulement, les doses d'azote les plus élevées 200 kg N/ha et 300 kg N/ha ont aboutit à l'obtention d'un état de nutrition optimal

et que cet état n'a été observé qu'entre le stade de croissance végétative (62 jap) et le stade d'initiation de la tubérisation (80 jap). Pour $p < 0,05$, l'analyse ANOVA a montré la présence d'un effet dose d'azote à partir de la différence significative signalée entre les doses d'azote 0 kg N/ha et 200 kg N/ha. En effet, la présence de l'azote minéral en une dose élevée a permis à la variété Spunta d'exporter plus d'azote que les plantes non fertilisées (Fig. 6).

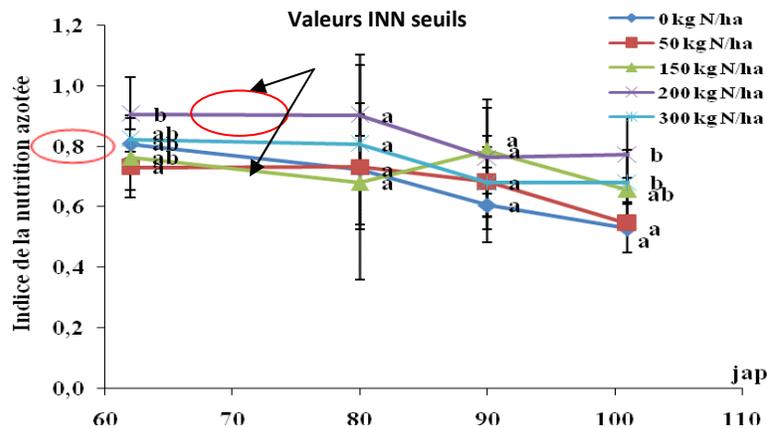


Figure 6 : Évolution de l'indice de la nutrition azotée en fonction du temps.

4.4 Indice de réfraction de la chlorophylle

(IRC) : La cinétique d'évolution de l'IRC en fonction du temps est représentée par la figure 7. Elle montre deux allures:

- une allure croissante de l'indice de réfraction de la chlorophylle entre les stades de croissance végétative (62 jap) et d'initiation de la tubérisation (80 jap) traduisant l'accumulation de l'azote au fur et à mesure de la croissance et du développement des feuilles.

- une allure décroissante relative au flétrissement de la partie aérienne et au développement maximum des tubercules.

L'analyse de la variance a montré la présence d'un effet significatif de la dose d'azote au début du cycle: les IRC ont indiqué que l'apport au sol de 50 ou 200 ou 300 kg N/ha, entre 62 et 73 jap, favorise l'augmentation de la teneur de l'azote au niveau des feuilles (Fig. 7).

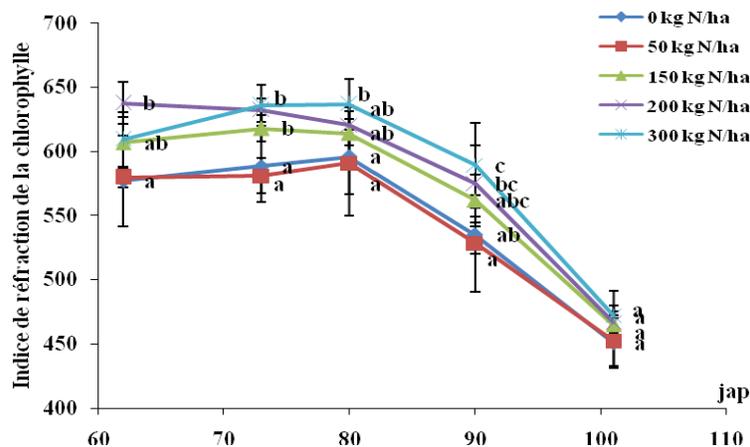


Figure 7 : Évolution de l'indice de réfraction de la chlorophylle en fonction du temps.

4.5 Corrélations indice de réfraction de la chlorophylle-indice de nutrition azotée

: Les corrélations linéaires IRC-INN sont établies par date de prélèvement (Fig. 8). Au début du cycle, au stade de croissance végétative, on remarque que les corrélations IRC-INN sont fortes et que 60% de la

variabilité de l'INN enregistrée à 62 jap est attribuée à la variabilité de la teneur en chlorophylle du feuillage. Aux stades d'initiation de la tubérisation et de grossissement des tubercules, on remarque que les degrés de linéarité IRC-INN sont très faibles (r^2

(80 jap) = 0,27 et r^2 (90 jap) = 0,22, $p < 0,05$) (Fig.

8).

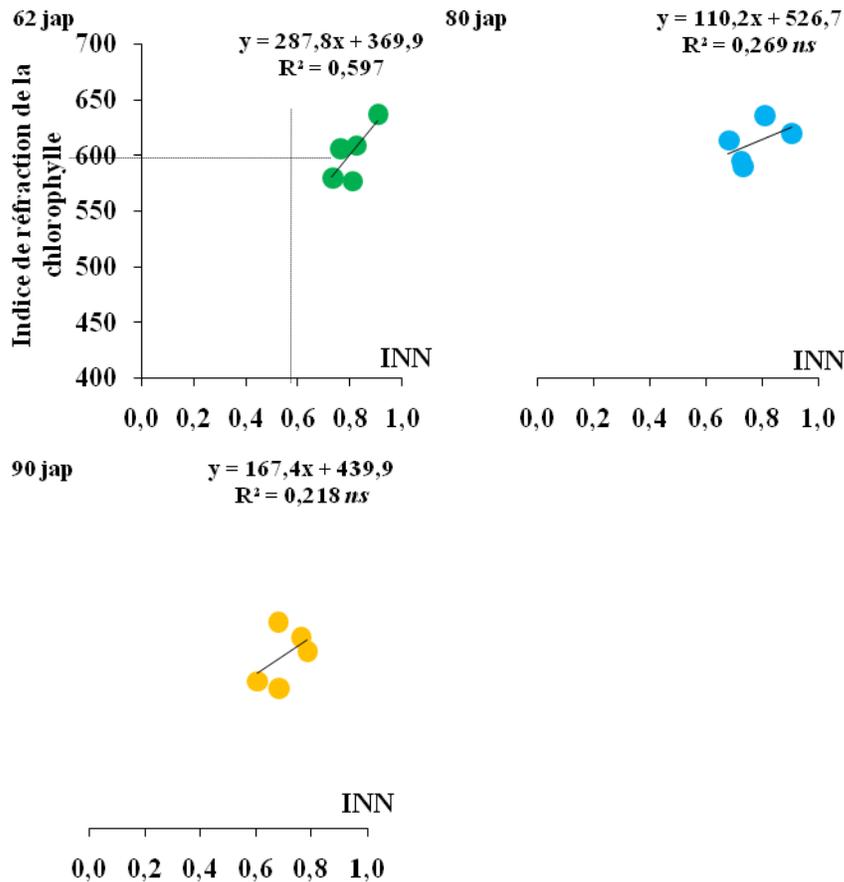


Figure 8 : Degrés de linéarité indice de réfraction de la chlorophylle-indice de nutrition azotée à 62, 80 et à 90 jap. *ns* : modèle linéaire non significatif pour $p < 0,05$.

5 DISCUSSION

5.1 Biomasse sèche totale et azote total exporté : La pomme de terre est une espèce exigeante en azote dont l'apport en doses optimales détermine la maturité de la culture à la récolte ainsi que son rendement (Reust *et al.*, 2006; Keith *et al.*, 2011). Les résultats obtenus au cours de cette expérimentation indiquent que l'azote apporté sous différentes doses n'a pas eu un effet significatif sur la biomasse sèche totale de la pomme de terre. Nos résultats sont en contradiction avec ceux de Mosseddaq et Moughli (1999), Darwich *et al.* (2003) et Najm *et al.* (2010) qui ont montré que l'augmentation de la matière sèche totale de la plante est proportionnelle à la dose d'azote appliquée. Les exportations d'azote enregistrées au cours du cycle de développement de la variété Spunta n'ont pas reflété un effet significatif des

doses d'azote minéral appliquées au sol. Les plantes fertilisées ainsi que celles non fertilisées ont présenté des quantités d'azote exporté statistiquement similaires. Nos résultats sont en contradiction avec ceux de Sharif *et al.* (2009) qui ont montré que la fertilisation azotée favorise l'accumulation de l'azote au niveau de la pomme de terre, spécialement au début du cycle cultural.

5.2 Indice de la nutrition azotée : Les travaux de recherche des indices caractérisant l'état de nutrition azotée de la plante sont nombreux (Porter, 1993; Hunt et Pararajasingham, 1995; Overman *et al.*, 1995; Birch *et al.*, 1997; Gonzalez Dugo, 2006). L'indice de la nutrition azotée a été développé par Angus et Moncur en 1985 pour l'étude de l'effet du déficit de nutrition azotée sur le développement de la surface foliaire. Les résultats obtenus le long de

cette expérimentation indiquent la chute progressive des INN enregistrés en présence des différentes doses d'azote. Selon Gastal et Lemaire (2002), la cause de cette diminution est la dilution de l'azote dans le volume de la plante. En effet, au fur et à mesure que la plante croît, la proportion (en masse) des tissus structuraux et de stockage, pauvres en azote, augmente et en conséquence la teneur en azote total de la plante diminue (Greenwood *et al.*, 1990). L'effet du moment phénologique lors de l'application de l'azote tient une importance majeure dans la détermination de l'état azoté de la plante (Nielsen et Halvorson, 1991; Cantero-Martinez *et al.*, 1995; Giunta *et al.*, 1995; Prasertsak et Fukai, 1997; Pandey *et al.*, 2001; Lauriault *et al.*, 2002; Biloni et Bocchi, 2003). Les résultats obtenus ont indiqué que l'état azoté optimum a été identifié au cours du stade de croissance végétative. Lemaire et Salette (1984) et Olesen *et al.* (2002) ont expliqué l'effet du stade phénologique par le rapport feuilles: tiges élevé et l'indice de sénescence faible caractérisant le début du cycle cultural de la pomme de terre (Justes *et al.*, 1994). Les INN enregistrées entre le stade de croissance végétative et le stade d'initiation de la tubérisation sont supérieures à 0,8. Nos résultats sont en contradiction avec ceux de Lemaire et Gastal (1997) qui ont montré que tout INN avec une valeur inférieure à 1 indique une déficience en azote. Par contre, ils sont en concordance avec ceux de Chambenoit *et al.* (2002) qui ont considéré les valeurs d'I.N.N. comprises entre 0,8 et 1 comme non limitantes.

5.3 Indice de réfraction de la chlorophylle : Le chlorophyllomètre est un outil de détection d'un stress azoté avant qu'il ne soit détecté à l'œil nu (Schepers *et al.*, 1992). Les mesures réalisées par le chlorophyllomètre ou IRC déterminées au cours de cette expérimentation, reflètent la teneur relative de la feuille en chlorophylle (Richardson *et al.*, 2002). Elles montrent que la concentration relative de la chlorophylle diminue dans la feuille, entre le stade de croissance végétative et le stade de maturation

6 CONCLUSION

La nutrition azotée de la pomme de terre dépend des effets de l'apport de l'azote et de la dose d'azote apportée au cours de son cycle de développement. Afin d'avoir une bonne relation entre ces deux

des tubercules. Nos résultats sont en concordance avec ceux de Lemaire *et al.* (2008) qui ont expliqué ce phénomène par le processus de dilution de l'azote dont la variation en fonction de l'état de développement est liée à la croissance aérienne. Chambenoit *et al.* (2002) ont montré que la teneur moyenne en azote de la pomme de terre tend vers la teneur en azote des tubercules juste après la levée. Par rapport aux différentes doses d'azote appliquées le long du cycle de développement de la variété Spunta, on remarque qu'en présence des doses d'azote 50, 200 et 300 kg N/ha, la teneur de l'azote au niveau de la feuille augmente seulement au début du cycle de développement de la pomme de terre. Nos résultats sont en concordance avec ceux de Schlemmer *et al.* (2005) qui ont suggéré que la disponibilité de l'azote dans le sol favorise l'augmentation du contenu de la feuille en chlorophylle.

5.4 Corrélations HNT-INN : La relation entre l'INN et la teneur en chlorophylle, à un moment donné, est un indicateur de l'état azoté de la culture (Marquard et Tipton, 1987; Shaahan *et al.*, 1999; Cartelat *et al.*, 2005). Vos et Bom (1993) ont montré la forte corrélation entre les IRC et la concentration de l'azote dans la feuille, avec un coefficient de corrélation r^2 égal à 0,95. Les coefficients de corrélation obtenus dans le cas de la variété Spunta indiquent un degré de linéarité élevé entre IRC et INN au début du cycle, au cours du stade de croissance. Par contre, au cours des stades d'initiation de la tubérisation et de maturation des tubercules, on remarque que les coefficients de corrélations IRC-INN sont très faibles. Nos résultats sont en concordance avec ceux de Sainz Rozas et Echeverría (1998), Echeverría et Studert (2001) et Giletto (2002) qui ont montré, respectivement, que le chlorophyllomètre permet de quantifier l'état de nutrition azoté du maïs, du trigo et de la pomme de terre à la fin de leurs cycles culturaux.

facteurs, on a suivi certains paramètres à travers lesquels on a déduit :

- la similarité statistique des résultats liés à la biomasse sèche totale et à la quantité d'azote exporté par les différentes parties de la plante,

- l'emplacement des plantes soumises à une dose d'azote égale à 200 kg/ha à un niveau de nutrition azotée optimale au cours du stade de croissance végétative,
- la disponibilité de l'azote dans le sol favorise l'augmentation du contenu de la feuille en chlorophylle,
- la forte linéarité IRC-INN au début et à la fin du cycle de développement de la variété Spunta,

- la possibilité d'estimer l'état nutritif azoté de la variété Spunta en se référant aux seuils IRC 600 et 470 correspondant, respectivement, aux stades de croissance végétative et de maturation des tubercules.

7 BIBLIOGRAPHIE

- Angus J-F, Mancur M-W: 1985. Models of growth and development of wheat in relation to plant nitrogen. *Australian Journal of Agricultural Research*, 36: 537-544.
- Biloni M, Bocchi S: 2003. Nitrogen application in dry-seeded delayed-flooded rice in Italy. I. Effect on yield and crop parameters. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems* 67: 117-128.
- Birch C-J, Fukai S, Broad I-J: 1997. Estimation of responses of yield and grain protein concentration of malting barley to nitrogen fertilizer using plant nitrogen uptake. *Australian Journal of Agricultural Research* 48: 635-648.
- Bremner J-M: 1965. Total nitrogen methods of soil analysis. In: C.A. Black (ef.). Edition INRA. Part 2. *Agronomy* (9): 1149-1176.
- Cantero-Martinez C, Villar J-M, Romagosa I, Fereres E: 1995. Nitrogen fertilization of barley under semi-arid rainfed conditions. *European Journal of Agronomy* 4(3): 309-316.
- Cartelat A, Cerovic Z-G, Goulas Y, Meyer S, Lelarge C, Prioul J-L, Barbottin A, Jeuffroy M-H, Gate P, Agati G, Moya I: 2005. Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Research*, 91: 35-49
- Cassman K-G, Kropff M-J, Yan Z-D: 1994. A conceptual framework for nitrogen management of irrigated rice in high yield environment. In: Virmani, S.S. (Eds.), *Hybrid Rice Technology: New Developments and Future Prospects*. International Rice Research Institute, Los Bannos, Philippines, p: 81-96.
- Chambenoit C, Laurent F, Machet J-M, Scheurer O : 2002. Fertilisation azotée de la pomme de terre. Edition: INRA Editions. 128p.
- Chang S-X, Robison D-J: 2003. Nondestructive and rapid estimation of hardwood foliar nitrogen status using the SPAD-502 chlorophyll meter. *Forest Ecology and Management* 181: 331-338.
- Cruz P, Jouany C, Theau J-P, Petibon P, Lecloux E, Duru M: 2006. L'utilisation de l'indice de nutrition azotée en prairies naturelles avec présence de légumineuses. *Fourrages* 187: 369-376.
- Darwish T, Atallah T, Hajhasan S, Chranek A: 2003. Management of nitrogen by fertigation of potato in Lebanon. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 67: 1-11.
- Direction Générale de la Production Agricole: 2008. Rapport interne. 52 p.
- Echeverría H-E, Studdert G-A: 2001. Predicción del contenido de proteína en grano de trigo (*Triticum aestivum* L.) mediante el índice de verdor de la hoja bandera. *Ciencia del Suelo* 19: 67-74.
- Gastal F, Lemaire G: 2002. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany* 53(370): 789-799.
- Giunta F, Motzo R, Deidda M: 1995. Effects of drought on leaf area development, biomass production and nitrogen uptake of durum wheat grown in a Mediterranean environment. *Australian Journal of Agricultural Research* 46: 99-111.
- Giletto C-M: 2002. Comparación de métodos para evaluar la nutrición nitrogenada en papa. Tesis presentada como requisito para optar por el grado de Magister Scientiae en el



- programa de Postgrado en Producción Vegetal. Fac. Ciencias Agrarias. UNMP. 74 p.
- Giletto C-M, Diaz C, Rattin J-E, Echeverria H-E, Caldiz D-O. 2010. Green index to estimate crop nitrogen status in potato processing varieties. *Chilean Journal of Agricultural Research* 70(1): 142-149.
- Goffart J-P, Olivier M, Destain J-P, Frankinet M : 2002. Stratégie de la fertilisation azotée de la pomme de terre de consommation. Edition : Centre de Recherche Agronomique de Gembloux. Centre d'étude de pomme de terre. 118p.
- Goffart J-P: 2006. Outils de mesure du statut en azote de la culture: HNT et GPN. In : Demeulemeester K, Goeminne M, De Temmerman L, Goffart J-P, Lebrun P, Somerhausen E. Synthèse des résultats de la recherche appliquée et des activités de vulgarisation : Résultats des essais et suivis réalisés en Belgique en 2005. Journal d'information mensuel. Centre Pilote Pomme de Terre, Partie 3: 9-13.
- Goffart, J-P, Olivier M., Frankinet M : 2008. Potato crop nitrogen status assessment to improve N fertilization management and efficiency: past-present-future. *Potato research* 51: 355-383)
- Goffart J-P, Vereecke P, Vandemeulebroeck K, Blondiau L-M, Khalidi M, Do Santos G : 2009. Bilan fertilisation azotée et utilisation du chlorophyllomètre en pomme de terre en région Wallonne. In : Demeulemeester K, Goeminne M, Demeyere A, Goffart J-P, Lebrun P. Synthèse des résultats de la recherche appliquée et des activités de vulgarisation : Résultats des essais et suivis réalisés en Belgique en 2009. Journal d'information mensuel. Centre Pilote Pomme de Terre, Partie 3: 7-13.
- Gonzalez Dugo M-V : 2006. Effet du déficit hydrique sur l'état de nutrition azotée chez les graminées fourragères. Thèse de doctorat, L'Université de Poitiers 179 p.
- Geenwood D-J, Lemaire G, Gosse G, Cruz P, Draycott A, Neeteson J-J: 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Ann. Bot.* 66: 425-436;
- Haverkort A-J, Mackerron D-K-L: 2000. Management of nitrogen and water in potato production. Wageningen Pers, Wageningen, The Netherlands. 353 p.
- Houlès V, Guérif M, Mary B-V: 2007. Elaboration of a nitrogen nutrition indicator for winter wheat based on leaf area index and chlorophyll content for mating nitrogen recommendations. *Eur. J. Agron.* 27: 1-11.
- Hunt L-A, Pararajasingham S: 1995. CROPSIM – WHEAT: A model describing the growth and development of wheat. *Canadian Journal of Plant Science* 75(3): 619-632.
- Jeuffroy M-H, Bouchard C: 1999. Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number. *Crop Sci.* 39: 1385-1393.
- Justes, E, Mary B, Meynard J-M, Machet J-M, Thelier-Huché L: 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Ann. Bot.* 74: 397-407.
- Keith A, Kelling R, Wolkowski M, Ruark D: 2011. Potato Response to Nitrogen Form and Nitrification-Inhibitors. *Am. J. Pot Res.* 11 p.
- Lasa B, Irañeta I, Segura A, Lafarga A, Arregui L-M, Baroja E, Maeztu I, Quemada M: 2005. Optimización de la fertilización nitrogenada mediante el Uso de medidores de clorofilas. Navarra Agraria. España, 35 p.
- Lauriault L-M, Kirksey R-E, Donart G-B: 2002. Irrigation and nitrogen effects on tall wheatgrass yield in the southern high plains. *Agronomy Journal* 94: 792-797.
- Lemaire G, Salette J: 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Etude de l'effet du milieu. *Agronomie* 4: 423-430.
- Lemaire G, Gastal F: 1997. Nitrogen uptake and distribution in plant canopies. In: Lemaire, G. (Eds), *Diagnosis on the Nitrogen Status in Crops*. Springer-Verlag, Heidelberg, p: 3-43.
- Lemaire G, Meynard J-M: 1997. Use of the Nutrition Nitrogen Index for analysis of agronomical data. In: Lemaire, G. (Eds), *Diagnosis on the Nitrogen Status in Crops*. Heidelberg, Springer-Verlag, p: 45-55. -



- Lemaire G, Jeuffroy MH, Gastal F: 2008. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. *Europ. J. Agronomy* 28: 614-624.
- Marquard R-D, Tipton J-L: 1987. Relationship between extractable chlorophyll and in situ method to estimate leaf greenness. *HortScience* 22 p 1327.
- Matsunaka T, Watanabe Y, Miyawaki T, Ichikawa N: 1997. Prediction of grain protein content in winter wheat through leaf color measurements using a chlorophyll meter. *Soil Sci Plant Nutr.* 43: 127-134.
- Mosseddaq F, Moughli L: 1999. Fertilisation azotée des céréales: Cas des blés en Bour et en irrigué. Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA, N°62. 4 p.
- Najm A-A, Haj Seyed Hadi M-R, Fazeli F, Taghi Darzi M, Shamorady R: 2010. Effect of utilization of organic and inorganic nitrogen source on the potato shoots dry matter, leaf area index and plant height, during middle stage of growth? *International Journal of Agricultural and Biological Sciences* 1: 26-29.
- N'Dayegamiye A, Giroux M, Gasser M-O: 2007. La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la matière organique: facteur climatique et régions agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote. Colloque sur l'azote. CRAAQ-OAQ. 11p.
- Nielsen D-C, Halvorson A-D: 1991. Nitrogen fertility influence on water stress and yield of winter wheat. *Agronomy Journal* 83: 1065-1070.
- Olesen J-E, Berntsen J, Hansen E-M, Petersen B-M, Petersen J: 2002. Crop nitrogen demand and canopy area expansion in winter wheat during vegetative growth. *European Journal of Agronomy* 16: 279-294.
- Overman A-R, Robinson D, Wilkinson S-R: 1995. Coupling of dry matter and nitrogen accumulation in ray grass. *Fertilizer Research* 40: 105-108.
- Pagola, M., Ortiz R., Irigoyen I, Bustince H, Barrenchea E, Aparicio-Tejo P, Lamsfus C, Laso, B: 2009 new method to assess barley nitrogen nutrition status base on image color analysis : Comparison with SPAD-502. *Computers and Electronics in Agriculture* 65: 213-218.
- Pandey R-K, Maranville J-W, Chetina M-M : 2001. Tropical wheat response to irrigation and nitrogen in a Sahelian environment. II. Biomass accumulation, nitrogen uptake and water extraction. *European Journal of Agronomy* 15: 107-118.
- Parent LE : 2008. Nouveau concept de gestion de l'azote. Colloque sur la pomme de terre : La pomme de terre : Nourrir son monde. CRAAQ. Québec.
- Parent L-E, Samson N, Fortin J-G : 2008. Nouveau concept de gestion de l'azote. Colloque sur la pomme de terre. La pomme de terre : Nourrir son monde. CRAAQ. Québec.
- Porter J-R: 1993. AFRCWHEAT2: A model of the growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen. *European Journal of Agronomy* 2(2): 69-82.
- Pratersak A, Fukai S: 1997. Nitrogen availability and water stress interaction on rice growth and yield. *Field Crops Research* 52: 249-260.
- Reust W, Hebeisen T, Ballmer T: 2006. Fumure azotée et nouvelles variétés de pommes de terre cultivées en Suisse. *Revue suisse Agric.* 38(6): 309-313.
- Richardson A-D, Duigan S-P, Berlyn G-P: 2002. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content. *New Phytol.* 153:185-194.
- Roger P, Dommergues Y, Balandreau J, Dreyfus B, Sougoufara B: 1996. La fixation biologique de l'azote: Quelles potentialités pour le développement? Conférence-débat de l'ORSTOM. La Fayette - Paris X^e. 34 p.
- Roger-Estrade J : 2002. Gestion des états physiques et chimiques du sol. In : Gestion des peuplements végétaux et des ressources du milieu. INA-PG
- Roques F : 1985. Validité de la méthode du bilan : essai d'optimisation de la fertilisation azotée dans le sud de la France. p : 1-11.
- Schvartz C, Muller J-C, Decroux J: 2005. Guide de la fertilisation raisonnée: Grandes cultures et prairies. Editions France Agricole.



- Sainz Rozas H, Echeverría H-E: 1998. Uso del medidor de clorofila para el monitoreo de la nutrición nitrogenada del cultivo de maíz. *Rev. Fac. Agronomía La Plata* 103: 37-44.
- Schepers J-S, Francis D, Vigil M, Shanahan J-F, Below J-F-E: 1992. Comparison of corn leaf nitrogen and chlorophyll meter readings. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23: 2173–2187
- Shaahan M-M, El-Sayed A-A, Abou, E-A-A: 1999. Predict nitrogen magnesium and iron nutritional status in some perennial crops using a portable chlorophyll meter. *Scientia Horticulturae* 82: 934-348.
- Sharifi M, Zebarth B-J, Hajabbasi M-A, Kalbasi M: 2009. Dry matter and nitrogen accumulation and root morphological characteristics of two clonal selections of ‘Russet Norkotah’ Potato as affected by nitrogen fertilization. *Journal of Plant Nutrition* 28: 2243–2253.
- Schlemmer M-R, Francis D-D, Shanahan J-F, Schepers J-S: 2005. Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content. *Agron. J.* 97: 106–112.
- Schlesinger WH, Lichter J: 2001. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂. *Nature* 411(6836): 466-469.
- Vos J, Bom M: 1993. Hand-held chlorophyll meter: A promising tool to assess the nitrogen status of potato foliage. *Potato Res.* 36: 301–308.
- Xiaoping X, Yizhuo S, Wenqi, G, Zhiguo, Z: 2008. Accumulation characteristics of biomass and nitrogen and critical nitrogen concentration dilution model of cotton reproductive organ. *Acta Ecologica Sinica.* 28(12): 6204-6211.
- Zebarth B, Karemangingo C, Scott P, Savoie D, Moreau G: 2010. Gestion de l'azote pour la pomme de terre: Recommandations générales. Fiche technique produite par l'équipe de prise en charge du programme d'atténuation des gaz à effet de serre (GES). Programme d'atténuation des gaz à effet de serre pour l'agriculture canadienne. 4 p.