

« Effet de la fréquence d'irrigation sur la croissance et le rendement de la carotte (*Daucus carota* L., cv. Nantaise) sous fertilisation organique à base de compost : étude répétée sur trois années et deux sites dans la région Amoron'ny Mania, Madagascar ».

Résumé

Face à la raréfaction de l'eau et à la prédominance de l'irrigation par inondation dans les exploitations familiales malgaches, cette étude vise à déterminer une fréquence d'irrigation de la carotte (*Daucus carota* L., variété Nantaise) permettant de réduire les apports en eau tout en maintenant un rendement acceptable. Trois essais successifs (2024–2026) ont été conduits dans la région Amoron'ny Mania, sur deux sites : Ambalamahasoia (sol sableux) puis Tsinjony (sol argilo-limoneux). Le dispositif en blocs complets randomisés, comportant trois blocs, comparait trois régimes d'irrigation recevant 5 L/m² par apport, tous les 2 jours (T1, référence), tous les 3 jours (T2) et tous les 4 jours (T3), sur un sol amendé avec 10 t/ha de compost. Les données ont été analysées sous R par ANOVA pour chaque année, complétée par une analyse combinée, suivies du test de Tukey. Les résultats montrent qu'aucune différence significative n'est détectée entre T1 et T2 pour la masse, la longueur et le diamètre des racines, tandis que T3 entraîne une réduction de 25 à 30 % de ces paramètres. Sur les trois années, le rendement diminue toutefois avec l'espacement des irrigations : T2 atteint 73 % et T3 52 % du rendement obtenu avec T1. Le classement des traitements reste stable entre les années et les sites, sans interaction significative année × traitement, ce qui suggère une stabilité des effets dans les conditions étudiées. Ces résultats suggèrent que l'irrigation tous les quatre jours est peu adaptée aux conditions étudiées, tandis que l'irrigation tous les trois jours pourrait constituer une alternative pour réduire les apports en eau, sous réserve d'une évaluation de l'acceptabilité de la baisse de rendement observée. Des mesures complémentaires portant sur le nombre de racines commercialisables, l'évapotranspiration et la dissociation entre fréquence et volume d'irrigation sont recommandées.

Mots-clés : Carotte, Fréquence d'irrigation, Économie d'eau, Rendement, Hautes Terres de Madagascar

INTRODUCTION

A l'échelle mondiale, l'agriculture absorbe environ 70% de la réserve d'eau douce (FAO, 2015). Cette dépendance devient critique à l'heure où le changement climatique perturbe la disponibilité des ressources. Plusieurs régions du monde sont confrontées à la raréfaction de la ressource en eau entraînant une forte variabilité de la productivité agricole (Wittling, 2024).

Les pays vulnérables, comme Madagascar, sont les plus touchés par la variabilité de la disponibilité des ressources en eau (FAO, 2019). Cependant, la gestion de l'eau au sein des exploitations familiales ne se fait pas d'une façon rationnelle (Randriamifidison et al, 2021). La majorité des paysans pratique des irrigations inondées sans mesurer ni l'efficacité de la pratique ni les impacts des pratiques sur la qualité de la culture.

Produire plus avec moins d'eau n'est donc plus un objectif d'optimisation, mais une condition à la sécurité alimentaire continue (Hamdaoui et Sabrina, 2020). Dans ce contexte, l'irrigation est à la fois le problème et l'un des principaux leviers de solution. Améliorer son efficacité et réduire les volumes consommés sont désormais des enjeux majeurs.

La transition se joue à l'échelle de la parcelle, là où l'eau est réellement apportée à la culture. La démarche repose sur la détermination de la quantité d'eau minimale à apporter sans compromettre la

quantité et la qualité du rendement. C'est dans cette optique que la présente étude a été menée. L'objectif est de déterminer une fréquence d'irrigation permettant de réduire les apports en eau tout en maintenant un rendement acceptable de la carotte. Afin de confirmer la pertinence des résultats, l'étude a été conduite pendant trois années culturales successives (2024-2026) dans deux zones différentes. En 2024, l'expérimentation se déroulait dans le site de recherche du MIP (Minimal Irrigation Project). Fokontany Ambalamahaso, Commune Rurale Mahazina, District d'Ambositra. En 2025, l'essai a été installé dans le site du Fokontany Tsinjony, Commune Rurale Tsarasaotra, District d'Ambositra. En 2026, la troisième réplification se déroulait dans le même site du Fokontany Tsinjony, Commune Rurale Tsarasaotra. Les réplifications ont été réparties suivant différentes zones afin de considérer les différences entre les facteurs climatiques, édaphiques et environnementaux.

Dans ce cadre, cette étude vise à déterminer une fréquence d'irrigation permettant de réduire les apports en eau tout en maintenant un niveau de rendement acceptable. Plus spécifiquement, elle consiste à (i) comparer le rendement de la carotte soumis à différentes fréquences d'irrigation, et (ii) tester la constance des effets de la fréquence d'irrigation entre les années et les deux zones d'expérimentation. L'étude repose sur les hypothèses selon lesquelles (H1) une irrigation tous les trois jours ne réduirait pas le rendement au-delà d'un seuil de perte considéré comme acceptable, (H2) les effets de la fréquence d'irrigation resteraient cohérents entre les années et les zones d'expérimentation.

MATERIELS ET METHODES

Zones d'études

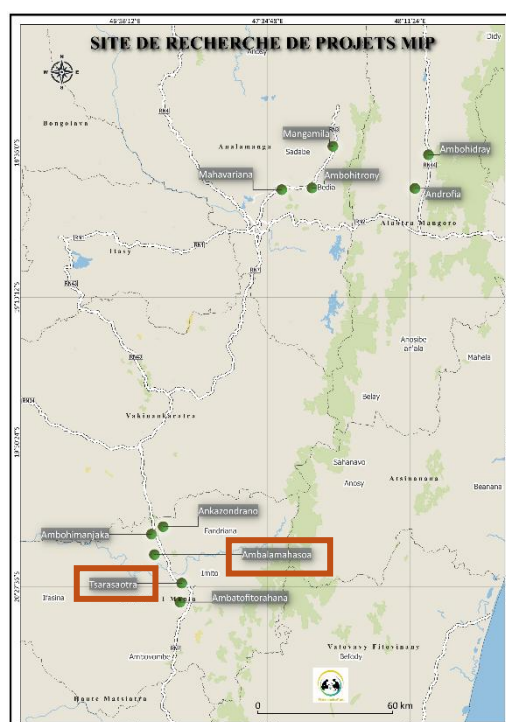


Figure 1 : Carte montrant les différents sites du MIP et les deux sites pour cette expérimentation

Les expérimentations ont été conduites sur deux sites situés dans la région des Hautes Terres de Madagascar, Amoron'ny Mania, qui se caractérise par un climat tropical d'altitude, avec une saison chaude et pluvieuse et une saison fraîche et sèche. Le premier essai s'est déroulé d'août à novembre 2024 sur le site de recherche du MIP (Minimal Irrigation Project), situé à 20,331130° S et 47,105082° E, dans le fokontany Ambalamahasoia, commune rurale de Mahazina, district d'Ambositra, région Amoron'ny Mania. Le deuxième essai a eu lieu de juillet à septembre en 2025 sur un autre site du MIP, dans le fokontany de Tsinjony, commune rurale Tsarasaotra, district d'Ambositra à 20,458680° S et 47,250661° E. Ce même site a accueilli la troisième réplication, menée de mai à août 2026.

Les essais réalisés après la première année constituent des réplifications de la même étude, conduites dans le temps et sur deux sites au total (un en 2024, un autre en 2025 et 2026) afin de confirmer la reproductibilité des résultats.

Conditions pédologiques des sites

Avant la mise en place de l'expérimentation, des échantillons de sol ont été prélevés dans les parcelles expérimentales afin de caractériser les propriétés physico-chimiques initiales du sol. Les échantillons de sol ont été prélevés à l'aide d'une pelle, à une profondeur de 30 cm. Pour chaque zone expérimentale, 5 prélèvements élémentaires ont été effectués puis mélangés afin d'obtenir un échantillon composite représentatif de la parcelle. Les échantillons ont ensuite été préparés avant leur analyse selon les procédures du laboratoire.

La caractérisation de sols du site Ambalamahasoia en 2024 et du site Tsarasaotra en 2025 a été réalisée à partir d'observations de terrain et d'analyses physico-chimiques dans le laboratoire du FOFIFA, situé à Fiadanana Tsimbazaza. L'analyse pédologique de la troisième réplication à Tsinjony Tsarasaotra en 2026 a été faite dans le laboratoire du MIP situé à Talata Volonondry. Les coordonnées géographiques des sites ont été relevées à l'aide d'un GPS. Le relief, la position topographique, la végétation environnante, les conditions hydrologiques visibles, la structure, la porosité et l'enracinement ont été caractérisés directement sur le terrain selon les principes de description pédologique. La couleur du sol a été déterminée à l'aide du nuancier Munsell Soil Color Chart (Herilanto, 2026).

Les analyses ont porté sur le pH eau, le carbone organique (Corg), la matière organique (MO), l'azote total (N), le rapport C/N, le phosphore disponible (P), les bases échangeables (K^+ et Ca^{2+}) et la capacité d'échange cationique (CEC). Le carbone organique a été déterminé selon la méthode de Walkley-Black, l'azote total selon la méthode de Kjeldahl et le phosphore disponible selon la méthode de Olsen dans le laboratoire de FOFIFA. Le C/N a été calculé à partir des teneurs en carbone

organique et en azote. La matière organique a été calculée à partir du carbone organique avec le coefficient 1,72. Les bases échangeables ont été déterminées par la méthode d'Acétate d'ammonium + SAA et la CEC (Capacité d'Échange Cationique) selon les procédures de saturation à l'ammonium + NaCl.

Paramètres	Site Ambalamahaso	Site Tsarasaotra - 2025	Site Tsarasaotra - 2026
Localisation géographique	Lat:-20.331130°; Long : 47.105082°	Lat : -20.458680° ; Long : 47.250661°	Lat : -20.458680° ; Long : 47.250661°
Relief	Plaine	Colline	Colline
Topographie	bas-versant / pente peu forte	Bas-versant / pente très faible	Bas-versant / pente très faible
Végétation environnante	Dominance de prairie (<i>Arundinella nepalensis</i>)	Dominance de prairie (<i>Arundinella nepalensis</i>), Hanitrin'ny mpatsaka (<i>Ageratum conyzoides</i>)	Dominance de prairie (<i>Arundinella nepalensis</i>)
Hydrologie visible	Ruisseau voisin (rivière)	Zone humide observable	Zone humide observable
Couleur	7,5 YR 4/6 - Strong brown	10 R 5/6 Red	10 R 5/6 Red
MO	Peu riche	Riche	Riche
Texture	Sableuse	Argilo-limoneuse	Argilo-limoneuse
Structure	Particulaire	Polyédrique Sub-anguleuse	Polyédrique Sub-anguleuse
Porosité	Microporosité dominante	Microporosité dominante	Microporosité dominante
Enracinement	Bon	Bon	Bon
pH eau	5,22 FA	5,5 FA	5,27 FA
Corg%	0,841 M	2,99 R	2,02 M
MO %	1,45 M	5,14 R	3,47 M
N %	0,063 P	0,175 R	0,156 R
C/N	13,3 S	17,1 S	12,9
P ppm	9,82 M	18,83	
K+ méq/100g	0,461 R	1,29 TR	
Ca2+ méq/100g	0,81 TP	2,15 M	
CEC méq/100g	8,6 F	6,6 F	

Tableau 1 : Résultats des analyses des sols de chaque site par année (source : HERILANTO, 2026)

- Site AMBALAMAHASOA et TSARASAOTRA (FA : Fortement Acide, TFA : Très Fortement Acide, TP : Très Pauvre, P : Pauvre, M : Moyen, R : Riche, TR : Très Riche, S : Satisfaisant)
(NB : Ces résultats sont issus du laboratoire FOFIFA)
- Site TSARASAOTRA : (FA : Fortement Acide, TR : Très Riche, R : Riche, M)
(Nb : ces résultats sont issus du Kit d'analyse de sol NANBEI Q3 – laboratoire du MIP)
La classification des teneurs en phosphore (P en mg/kg) est basée sur des référentiels agronomiques utilisés pour l'évaluation de la fertilité des sols (FAO, 2006 ; COMIFER, 2013). Ces seuils peuvent varier selon la méthode d'analyse et les conditions pédologiques

Matériel végétal

La présente étude a porté sur la carotte (*Daucus carota L.*), variété « nantaise », utilisée comme matériel végétal expérimental. Les semences fournies par le Service Officiel de Certification des semences de Madagascar (SOC), provenaient d'un même lot pour chaque année d'expérimentation. Une sélection préalable des graines a été réalisée avant le semis, en privilégiant les semences présentant un aspect homogène et exempt de dommages visibles.

Dispositif expérimental

Trois régimes d'irrigation ont été appliqués pour évaluer l'effet de la fréquence d'apport d'eau sur la culture de carotte. Le traitement T1, correspondait à un apport de 5L/m² par irrigation tous les 2 jours, considéré comme traitement de référence. Le traitement T2 consistait en une irrigation tous les 3 jours

avec le même apport de 5L/m², tandis que le traitement T3 correspondait à une irrigation tous les 4 jours avec la même quantité en utilisant des arrosoirs correspondants à ce volume.

Le dispositif en blocs complets randomisés a été adopté lors de chaque essai et réplication. Chaque dispositif comprend trois blocs correspondant à trois répétitions ainsi un total de neuf parcelles élémentaires (trois blocs x trois traitements). La dimension est de 1,5 m × 2 m par parcelle élémentaire.

L'observation et le suivi ont été effectués deux fois par semaine par un technicien responsable sur chaque site. Dans chaque parcelle élémentaire, 10 pieds ont été retenus pour les relevés.

Conduite culturale

Les pratiques culturales ont été standardisées pour l'ensemble des parcelles expérimentales. Le sol a été préparé par le labour et hersage à une profondeur de 20 cm. Pour les trois traitements, un compost d'origine végétale, issu des biomasses locales et des déchets collectés auprès des paysans, a été incorporé au sol à une dose de 10 t/ha (soit 1 kg/m²), exprimée en masse fraîche, 7 jours avant le semis. Le semis a été réalisé à une profondeur de 2 cm, avec une densité d'environ 1,5 g à 2 g de semences par ligne et un espacement de 20 cm entre les lignes. Enfin, le démariage, réalisé entre 10 et 15 jours après le semis (JAS), visait à maintenir un espacement de 5 à 7 cm entre les plants sur la ligne. Le désherbage manuel intervenait toutes les deux semaines.

Paramètres mesurés

Paramètres	Méthode de mesure	Stade / Période	Fréquence
Hauteur des plants (cm)	Du collet à l'apex de la feuille la plus haute	Dès levée jusqu'à la récolte	Hebdomadaire
Masse des feuilles	L'ensemble des feuilles	À la récolte	Une fois
Longueur de la racine (cm)	Du collet à l'apex de la racine principale	À la récolte	Une fois
Diamètre de la racine (cm)	Circonférence mesurée à mi-longueur, puis convertie en diamètre ($d = C/\pi$)	À la récolte	Une fois
Masse fraîche de la racine (g)	Pesée immédiate après récolte et nettoyage	À la récolte	Une fois
Rendement (kg/3m ²)	Masse totale des racines	À la récolte	Une fois

	commercialisables par parcelle		
--	--------------------------------	--	--

Tableau 2 : Paramètres mesurés lors de chaque essai

Variables et traitements statistiques

Les données brutes des trois années d'essai (A1 : 2024, A2 : 2025 et A3 : 2026) ont été regroupées et analysées avec le logiciel R (version 4.5.3) via RStudio (version 2026.01.2+418). Les mesures individuelles des 10 pieds ont été moyennées par parcelle, de sorte que l'unité statistique est la parcelle élémentaire ($n = 3$ parcelles par traitement et par année). Des statistiques descriptives (moyenne, erreur standard) ont été calculées sur ces moyennes de parcelle pour chaque paramètre. La normalité des résidus (test de Shapiro-Wilk) et l'homogénéité des variances ont été vérifiées avant l'analyse de la variance (ANOVA).

Chaque paramètre a d'abord été analysé par année, par une ANOVA en blocs complets randomisés (effets du bloc et du traitement). Le rendement a ensuite fait l'objet d'une ANOVA combinée sur les années A2 et A3, puis sur les trois années, avec les effets de l'année, du bloc emboîté dans l'année, du traitement et de l'interaction année $\times$ traitement. Cette interaction permet de juger de la stabilité de l'effet des traitements entre les essais. Comme l'essai A1 a été conduit sur un site différent de A2 et A3, l'effet de l'année et celui du site sont confondus pour A1 ; seule la comparaison de A2 et A3 isole l'effet de l'année sur un même site. Pour l'analyse des trois années, le rendement a été transformé en logarithme, car les variances du rendement brut n'étaient pas homogènes (test de Bartlett sur données transformées : $p = 0,652$). Les moyennes ont été comparées par le test de Tukey (HSD) au seuil de 5 %.

RESULTATS

I- Analyse de l'effet des traitements et de leur reproductibilité de 2024 à 2026

1. Masse des racines

Traitement	A1	A2	A3
T1	140,3 a	28,7 a	35,6 a
T2	139,8 a	29,0 a	35,7 a
T3	98,8 b	21,4 b	25,0 b
Erreur standard	3,74	0,37	0,28
p (traitement)	0,002	0,0002	0,00002

Tableau 3 : tableau montrant les résultats des masses des racines (g) par année selon les traitements

A1 : Année 1 – 2024 – site Ambalamahasoa

A2 : Année 2 – 2025 – site Tsarasaotra

A3 : Année 3 – 2026 – site Tsarasaotra

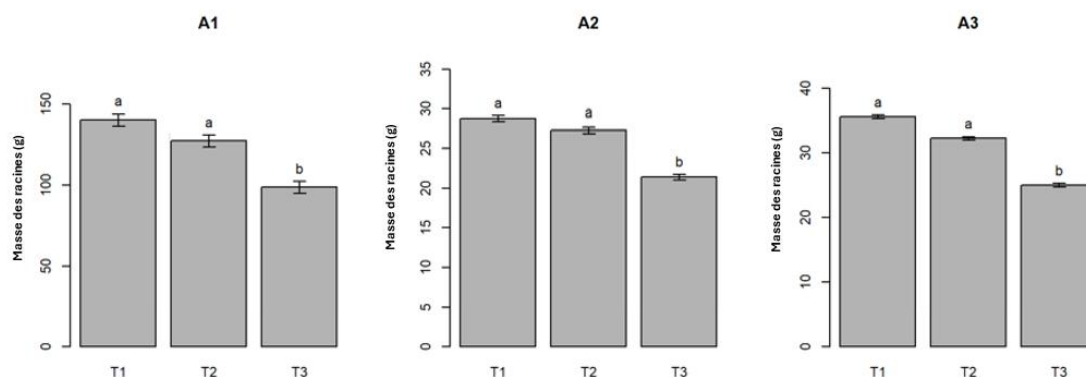


Figure 2 : figure montrant la masse des racines par année

A1 : Année 1 – 2024 – site Ambalamahasoa

A2 : Année 2 – 2025 – site Tsarasaotra

A3 : Année 3 – 2026 – site Tsarasaotra

Interprétation

Dans les trois essais, T1 et T2 ne diffèrent pas significativement, alors que T3 réduit la masse de racines de 25 à 30 % par rapport à T1. Cet effet est reproductible, avec de faibles barres d'erreur, surtout en A2 et A3.

Les valeurs absolues sont plus élevées en A1 (site de plaine) qu'en A2 et A3 (même site en altitude, à Tsarasaotra), en raison des différences de conditions climatiques et de sol entre les sites et les saisons. L'ordre des traitements reste pourtant identique, ce qui indique un effet stable.

2. Diamètre des racines

Traitement	A1	A2	A3
T1	4,11 ^a ± 0,52	ND	2,17 ^a ± 0,12
T2	4,15 ^a ± 0,52	ND	2,18 ^a ± 0,11
T3	3,00 ^b ± 0,42	ND	1,57 ^b ± 0,03
p-value	6,38 × 10 ^{-5*}	ND	2,11 × 10 ^{-4*}

Tableau 4 : tableau montrant les résultats sur le diamètre des racines (cm) par année ; diamètre calculé à partir de la circonférence mesurée ($d = C/\pi$) ; valeurs exprimées en moyenne ± erreur standard ; * : effet significatif du traitement ($p < 0,05$)

A1 : Année 1 – 2024 -site Ambalamahasoa

A2 : Année 2 – 2025 – site Tsarasaotra

A3 : Année 3 – 2026 – site Tsarasaotra

Interprétation

- En A2 (2025), le diamètre n'a pas été mesuré
- En A1 et A3, la fréquence d'irrigation a eu un effet significatif sur le diamètre des racines. Dans les deux années, T1 et T2 appartiennent au même groupe statistique et ne diffèrent donc pas significativement. En revanche, T3 appartient au groupe b et présente un diamètre inférieur à T1 et T2.

3. Longueur des racines

Traitement	A1	A2	A3
------------	----	----	----

T1	ND	10,55 ^a ± 0,70	9,47 ^a ± 0,24
T2	ND	10,47 ^a ± 0,62	9,58 ^a ± 0,26
T3	ND	7,50 ^b ± 0,67	6,86 ^b ± 0,25
p-value	ND	4,83 × 10 ^{-6*}	7,34 × 10 ^{-6*}

Tableau 5 : tableau montrant les résultats sur les longueurs des racines (cm) par année ; valeurs exprimées en moyenne ± erreur standard ; * : effet significatif du traitement ($p < 0,05$)

A1 : Année 1 – 2024 – site Ambalamahasoa

A2 : Année 2 – 2025 – site Tsarasaotra

A3 : Année 3 – 2026 – site Tsarasaotra

ND : non disponible

Interprétation

- En A1 (2024), la longueur des racines n'a pas été mesurée (ND).
- En A2 et A3 (2025 et 2026), T1 et T2 présentent des longueurs de racines statistiquement similaires, tandis que T3 présente une longueur significativement plus faible.

4. Hauteur des plants

Traitement	A1	A2	A3
T1	ND	27,61 ^a ± 2,48	13,62 ^a ± 14,82
T2	ND	27,70 ^a ± 2,39	13,48 ^a ± 14,58
T3	ND	19,01 ^b ± 1,68	9,17 ^a ± 9,95
p-value	ND	1,48 × 10 ⁻⁴	0,194 (ns)

Tableau 6 : tableau montrant les résultats sur les hauteurs des plants (cm) par année ; valeurs exprimées en moyenne ± erreur standard

Interprétation

- En A1 (2024), la hauteur des plants n'a pas été mesurée (ND).
- En A2 (2025), l'effet du traitement est significatif ($p = 1,48 \times 10^{-4}$). Le test de Tukey montre que T1 et T2 ne diffèrent pas significativement, tandis que T3 présente une hauteur plus faible (31 % de moins que T1).
- En A3 (2026), l'effet du traitement n'est pas significatif ($p = 0,194$). Les moyennes suivent la même tendance qu'en A2 (T3 à 33 % plus faible que T1).

Conclusion : la hauteur des plants n'est donc pas un indicateur stable de l'effet des traitements. La réduction de croissance observée sous T3 en A2 n'est pas retrouvée de façon significative en A3, alors que T1 et T2 restent équivalents dans les deux années.

5. Masse fraîche des feuilles

Traitement	A1	A2	A3
T1	19,00 ^a ± 9,18	15,53 ^a ± 4,07	ND
T2	18,92 ^a ± 9,26	15,55 ^a ± 5,85	ND
T3	13,64 ^b ± 6,24	11,03 ^b ± 2,97	ND
p-value	0,000616	1,08 × 10 ⁻⁵	ND

Tableau 7 : tableau montrant les résultats sur la masse fraîche des feuilles par année ; valeurs exprimées en moyenne ± erreur standard

A1 : Année 1 – 2024 – site Ambalamahasoa

A2 : Année 2 – 2025 – site Tsarasaotra

A3 : Année 3 – 2026 – site Tsarasaotra

Interprétation

- En A3, ce paramètre n'a pas été mesuré (ND).
- En A1 et A2, le traitement a eu un effet significatif sur la masse des feuilles en 2024 ($p = 0,0006$) et en 2025 ($p = 1,08 \times 10^{-5}$). T1 et T2 ne diffèrent pas (groupe a), alors que T3 (groupe b) présente une masse inférieure d'environ 28 % en A1 et 29 % en A2 par rapport à T1.

6. Rendements

a) Analyse combinée des deux années de réplication à Tsarasaotra

Source de variation	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F	p-value
Année	1	3,117	3,117	19,98 ^a	0,011
Traitement	2	10,702	5,351	18,40	0,001
Année × Traitement	2	0,986	0,493	1,70	0,243 ns
Erreur résiduelle	8	2,326	0,291		

Tableau 8 : résultats pour les deux réplications successives sur le même site Tsarasaotra (Tsinjony) ; ^a : F de l'année testé contre le carré moyen du bloc emboîté dans l'année (4 ddl)

Interprétation

L'analyse combinée des années A2 et A3 révèle un effet significatif du traitement sur le rendement ($F_{2,8} = 18,40$; $p = 0,001$) et de l'année ($F_{1,4} = 19,98$; $p = 0,011$), sans interaction Année × Traitement significative ($F_{2,8} = 1,70$; $p = 0,243$), ce qui indique que l'effet des traitements est resté stable d'une année à l'autre.

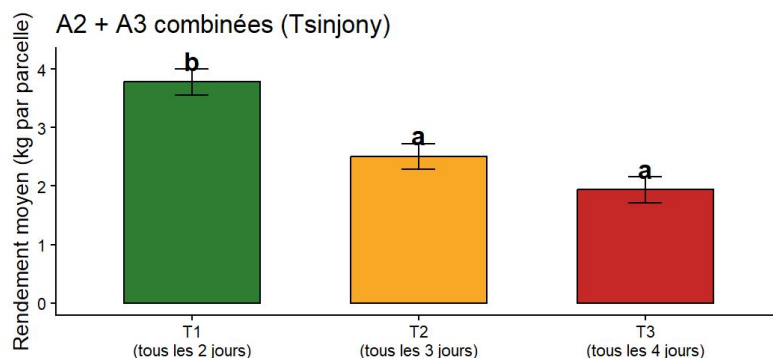


Figure 3 : Rendement moyen de la carotte selon la fréquence d'irrigation, années A2 et A3 combinées

b) Analyse des trois années

Source de variation	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F	p-value
Année	2	13,319	6,659	257,8 ^a	< 0,001
Traitement	2	1,893	0,946	25,18	< 0,001
Année × Traitement	4	0,201	0,050	1,34	0,311 ns

Erreur résiduelle	12	0,451	0,038		
-------------------	----	-------	-------	--	--

Tableau 9 : ANOVA du rendement (échelle logarithmique), trois années combinées ; ^a : F de l'année testé contre le carré moyen du bloc emboîté dans l'année (6 ddl)

L'analyse combinée des trois années, réalisée après transformation logarithmique du rendement (homogénéité des variances vérifiée : test de Bartlett, $p = 0,652$), montre un effet significatif du traitement ($F_{2,12} = 25,18$; $p < 0,001$) et de l'année ($p < 0,001$), sans interaction Année $\times$ Traitement significative ($F_{4,12} = 1,34$; $p = 0,311$). Le classement des traitements est donc resté stable entre les trois essais, conduits sur deux sites et pendant trois années. L'absence d'interaction significative ne permet toutefois pas de distinguer l'effet de l'année de celui du site pour A1.

Remarque : L'échelle logarithmique a été choisie parce que les variances n'étaient pas homogènes entre les années sur le rendement brut. L'ANOVA suppose que la variabilité résiduelle est la même dans tous les groupes.

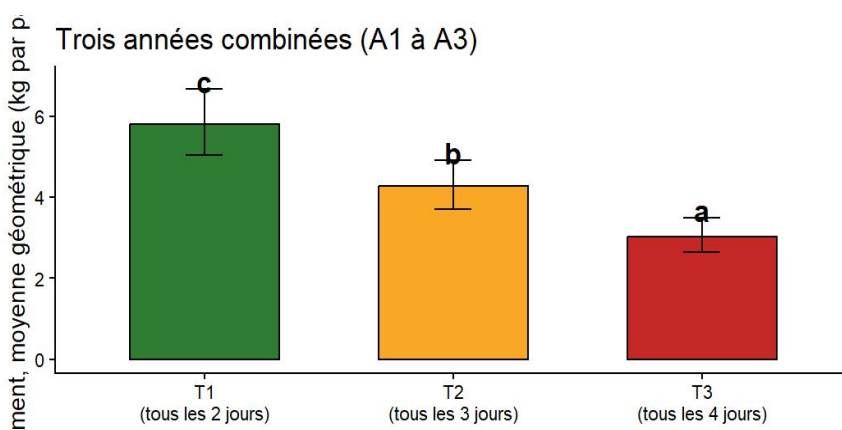


Figure 4 : Rendement moyen de la carotte selon la fréquence d'irrigation, trois années combinées (A1 à A3)

Traitement	Moyenne (log) $\pm$ ES	Rendement (kg)	IC 95 %	Groupe
T1	1,76 $\pm$ 0,065	5,81	5,03 à 6,69	a
T2	1,45 $\pm$ 0,065	4,26	3,71 à 4,90	b
T3	1,11 $\pm$ 0,065	3,03	2,63 à 3,49	c

Tableau 10 : Rendement moyen de la carotte (kg par parcelle de 3 m²) selon la fréquence d'irrigation, trois années combinées (2024-2026)

Interprétation

Sur l'ensemble des trois années, les trois traitements ont différencié significativement (Tukey, $p < 0,05$). Le rendement a diminué avec l'espacement de l'irrigation : T2 a produit environ 73 % du rendement de T1 (4,26 contre 5,81 kg ; $p = 0,015$) et T3 environ 52 % ($p < 0,001$), soit une réduction de près de moitié.

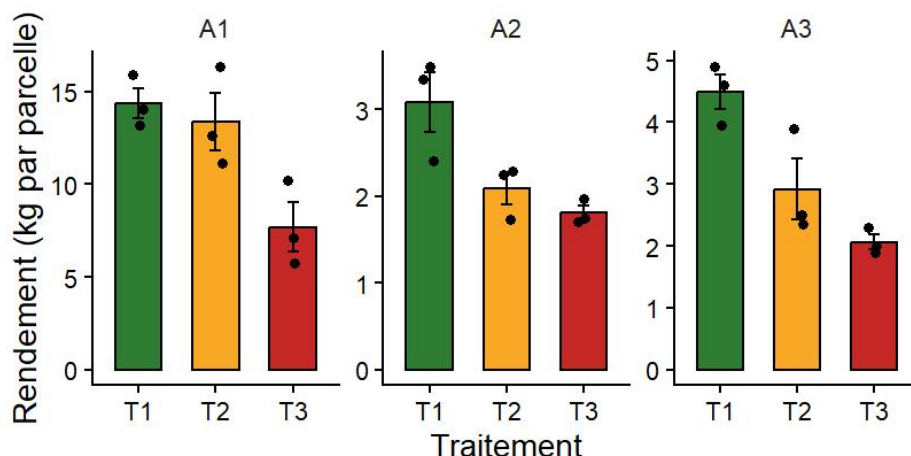


Figure 5 : Rendement de la carotte (kg par parcelle) par année et par traitement : A1 (MIP Ambalamahasoia, 2024), A2 (Tsinjony, 2025) et A3 (Tsinjony, 2026).

DISCUSSION

Effet de la fréquence d'irrigation sur la croissance des racines et du feuillage

Les résultats montrent que l'espacement des irrigations à quatre jours (T3) réduit de façon constante la croissance de la carotte. Par rapport à T1, T3 diminue la masse des racines de 25 à 30 % selon les années (Tableau 3), leur longueur de 28 à 29 % (Tableau 5), leur diamètre de 27 à 28 % (Tableau 4) et la masse des feuilles de 28 à 29 % (Tableau 7).

À l'inverse, T1 et T2 ne diffèrent significativement pour aucun de ces paramètres. Cette sensibilité de la carotte à la réduction des apports d'eau est cohérente avec la littérature. Dans un essai conduit sur sol sablo-limoneux dans l'Himalaya indien, le régime d'irrigation le plus fréquent a augmenté de 33,9 % la longueur et de 41,8 % le diamètre des racines par rapport au régime le plus espacé (Prikkitt et al., 2025). Sur un sol sableux d'Australie occidentale, la productivité de la carotte soumise à une irrigation réduite mais fréquente était limitée avant tout par la baisse de la croissance foliaire, qui restreint la surface d'assimilation (Gibberd et al., 2003). La baisse de masse foliaire observée sous T3 va dans le même sens et suggère que la réduction du feuillage contribue à limiter l'approvisionnement de la racine en assimilats. Cette interprétation n'a toutefois pas été testée directement dans notre étude, faute de mesure de la surface foliaire.

Rendement et validité de l'hypothèse H1

Sur l'ensemble des trois années, le rendement diminue avec l'espacement des irrigations : T2 représente environ 73 % du rendement de T1 (4,26kg contre 5,81 kg/parcelle de 3 m²) et T3 environ 52 % (3,03 kg) (Tableau 10). L'hypothèse H1 n'est donc pas confirmée au sens strict : passer d'une irrigation tous les deux jours à une irrigation tous les trois jours réduit le rendement d'environ 27 % ($p = 0,015$). Elle ne serait vérifiée que si cette perte était jugée acceptable en contrepartie d'une économie d'eau d'un tiers. Ce seuil n'ayant pas été fixé a priori, il relève du contexte de production (disponibilité en eau, prix de vente, coût du travail d'arrosage).

Le volume d'eau apporté étant proportionnel à la fréquence d'irrigation, les traitements T1, T2 et T3 ont reçu respectivement 5 L/m² par apport, soit 2,5, 1,7 et 1,25 mm par jour. T2 et T3 ont donc reçu respectivement 67% et 50% du volume d'eau apporté à T1.

La perte relative de rendement correspond à 0,8 fois la réduction relative du volume d'eau pour T2 et à 1 fois pour T3. Cette valeur est proche du coefficient de réponse du rendement à l'eau ($K_y = 0,82$) rapporté pour la carotte au Brésil par Carvalho et al. (2016). Cette comparaison demeure toutefois indicative, car l'évapotranspiration de la culture et la contribution des précipitations n'ont pas été mesurées.

Rapporté au volume d'eau apporté, le rendement de T2 et de T3 dépasse celui de T1 de 10% et 4%, respectivement. L'intérêt agronomique de T3 est donc faible, tandis que celui de T2 demeure modéré.

Le rendement maximal ne coïncide pas nécessairement avec la meilleure efficacité d'utilisation de l'eau. Carvalho et al. (2016) ont obtenu l'efficacité maximale pour un remplacement de 63,4% de l'eau du sol, tandis que Prikxit et al. (2025) ont observé la meilleure performance avec un régime d'irrigation intermédiaire, plutôt qu'avec l'irrigation la plus fréquente.

Selon Fereres et Soriano (2007), l'irrigation déficitaire doit généralement fournir entre 60 et 100% de l'évapotranspiration afin de limiter les pertes de rendement. En l'absence de mesure de l'évapotranspiration dans cette étude, il n'est pas possible de situer précisément les apports de T2 et de T3 par rapport à cet intervalle.

Maintien de la taille des racines sous T2 et perte de rendement.

Sous T2, la masse, la longueur et le diamètre des racines sont équivalents à ceux de T1, alors que le rendement par parcelle est inférieur d'environ un quart. Les racines individuelles n'étant pas plus petites, cet écart provient plus du nombre de racines commercialisables par parcelle que de leur taille : levée, survie des plants, racines fourchues ou fendues, ou racines déclassées. Gibberd et al. (2003) ont montré que la part de racines commercialisables passait de 73 % à 56 ou 63 % lorsque l'irrigation était réduite de 151 % à 124 ou 97 % de l'évaporation, ce qui limitait le gain d'efficacité de l'eau calculé sur le rendement commercialisable. Muhie et al. (2024) rappellent par ailleurs que la levée et l'installation du peuplement sont souvent lentes et irrégulières chez la carotte, et que la gestion de l'irrigation figure parmi les principaux facteurs de variation du rendement. Cette explication reste une hypothèse : le nombre de racines et la part de racines commercialisables n'ont pas été relevés dans nos essais.

Fréquence, dose et conditions de culture.

L'effet d'un espacement des irrigations dépend de la dose apportée à chaque irrigation, de la demande évaporative et du sol. Ainsi, Muhie et al. (2024), sur la variété Nantes en Éthiopie, ont obtenu les rendements commercialisables les plus élevés avec des intervalles de 7 et 10 jours (graines traitées à l'eau distillée) plutôt qu'avec 4 jours. Dans notre étude, la dose par apport est constante (5 L/m²), de sorte que l'espacement réduit à la fois la fréquence et le volume total apporté. Les effets observés ne peuvent donc pas être attribués à la fréquence seule. Tous les traitements ont par ailleurs reçu le même apport de compost (10 t/ha). L'effet d'une hausse de la teneur en carbone organique sur la capacité en eau disponible du sol est généralement faible : une augmentation de 1 % de carbone organique n'accroît en moyenne cette capacité que d'environ 1,2 mm pour 100 mm de sol (Minasny et McBratney, 2018). Il est donc peu probable que le compost ait compensé la réduction des volumes d'eau, même sur le sol sableux et peu riche en matière organique d'Ambalamahaso. L'absence d'un témoin sans compost ne permet toutefois pas de tester une interaction entre compost et irrigation.

Constance des effets entre les années et les sites (H2).

Le classement des traitements ($T1 = T2 > T3$) est identique pour la masse, la longueur et le diamètre des racines, et l'interaction année $\times$ traitement n'est significative ni pour l'analyse combinée de A2 et

A3 ($p = 0,243$) ni pour celle des trois années ($p = 0,311$). L'hypothèse H2 est donc confirmée pour le classement des traitements, malgré des sols contrastés (sableux à Ambalamahaso, argilo-limoneux à Tsinjony) et des saisons différentes. L'effet marqué de l'année sur le rendement ($p < 0,001$) traduit des différences de niveau de production entre les essais, sans modifier l'effet des traitements. Ces différences sont particulièrement fortes en A1, où la masse moyenne des racines est environ quatre à cinq fois supérieure à celle de A2 et A3. Elles ne peuvent être attribuées avec certitude à une cause précise : l'effet de l'année et celui du site sont confondus pour A1, et le climat, la date de semis et le lot de semences, qui changent d'une année à l'autre, n'ont pas été contrôlés.

La hauteur des plants se distingue des autres paramètres. T3 la réduit de 31 % en 2025 ($p = 1,48 \times 10^{-4}$), mais la différence n'est pas significative en 2026 ($p = 0,194$), malgré une réduction du même ordre (33 %), en raison de la forte dispersion des valeurs. Ce paramètre ne peut donc pas servir seul d'indicateur de l'effet de l'irrigation.

Limites de l'étude

L'essai de 2024 a été conduit sur un site différent de ceux de 2025 et 2026, de sorte que l'effet de l'année et celui du site sont confondus pour A1 ; seule la comparaison entre A2 et A3, sur un même site, isole l'effet de l'année. Les mesures ont porté sur dix pieds par parcelle, moyennés avant l'analyse, et chaque essai ne comporte que trois blocs : la puissance des tests est donc limitée pour détecter de faibles différences. Certains paramètres n'ont pas été mesurés lors de toutes les années (hauteur en 2024, diamètre en 2025, longueur en 2024 et masse des feuilles en 2026), et les analyses de sol de 2026, réalisées avec un kit, ne sont pas strictement comparables à celles de 2024 et 2025, effectuées au laboratoire du FOFIFA. Enfin, la fréquence et le volume d'eau varient simultanément, et l'humidité du sol, l'évapotranspiration et le nombre de racines par parcelle n'ont pas été mesurés.

CONCLUSION

Cette étude, conduite pendant trois années culturales successives sur deux sites des Hautes Terres d'Amoron'ny Mania, montre que la fréquence d'irrigation, associée à un volume apporté proportionnel, influence significativement la croissance et le rendement de la carotte fertilisée au compost. Une irrigation tous les quatre jours (T3) réduit d'environ 25 à 30 % la masse, la longueur et le diamètre des racines et ramène le rendement à environ 52 % de celui de T1, soit une baisse de près de moitié pour une économie d'eau de moitié : elle ne se justifie pas. Une irrigation tous les trois jours (T2) maintient la taille et la masse des racines, mais le rendement diminue d'environ 27 % (73 % de celui de T1) pour une économie d'eau d'environ un tiers. Elle ne peut donc être envisagée que si cette perte est jugée acceptable au regard de la rareté de l'eau ou du coût de l'arrosage. Le classement des traitements est resté constant d'une année et d'un site à l'autre, ce qui confirme la reproductibilité des résultats dans les conditions des Hautes Terres d'Amoron'ny Mania.

En perspective, il serait utile (i) de relever le nombre de racines et la part de racines commercialisables pour expliquer la perte de rendement sous T2, (ii) de dissocier l'effet de la fréquence de celui du volume en comparant plusieurs fréquences à volume total constant, (iii) de suivre l'humidité du sol et d'estimer l'évapotranspiration pour calculer la productivité de l'eau, (iv) de tester des fréquences intermédiaires ou des apports adaptés au stade de la culture, avec un témoin sans

compost, et (v) de répéter les essais sur davantage de sites et de répétitions, en y associant une analyse économique avec les producteurs.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Carvalho D.F.,** Oliveira Neto D.H., Felix L.F., Guerra J.G.M., Salvador C.A. (2016). Yield, water use efficiency, and yield response factor in carrot crop under different irrigation depths. *Ciência Rural* 46(7) : 1145-1150. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20150363>
- Claire WITTLING,** octobre 2020, Efficience de l'irrigation à la parcelle. Quelles marges de manœuvre pour des économies d'eau ? G-EAU, INRAE, AgroParisTech, Cirad, IRD, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, France
- Fereres E.,** Soriano M.A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany* 58(2) : 147-159. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- Gibberd M.R.,** McKay A.G., Calder T.C., Turner N.C. (2003). Limitations to carrot (*Daucus carota* L.) productivity when grown with reduced rates of frequent irrigation on a free-draining, sandy soil. *Australian Journal of Agricultural Research* 54(5) : 499-506. <https://doi.org/10.1071/AR02127>
- Hamdaoui et Sabrina,** 2020, Pilotage d'irrigation par le modèle aquacrop et cropwat : cas de la pomme de terre et de la tomate, 52p. ; ill. ; 30cm ; +cd-rom. ; +cd-rom/ oct-2020
- HERILANTO Ny Avo Fahendrena Jisy,** 2026. Rapport pédologie des différents sites du projet MIP (Minimal Irrigation Project).
- Minasny B.,** McBratney A.B. (2018). Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science* 69(1) : 39-47.
- Muhie S.H.,** Akele F., Yeshiwas T. (2024). Phenological and yield response of primed carrot (*Daucus carota* L.) seeds under deficit irrigation. *Advances in Horticultural Science* 38(2) : 119-127. <https://doi.org/10.36253/ahsc-14965>
- Prikkrit, Sharma J.C.,** Klate A., Sharma A. (2025). Response of European carrot (*Daucus carota*) to different irrigation schedules and sowing methods under the mid-hill conditions of north-western Himalayas, India. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 95(12) : 1540-1546. <https://doi.org/10.56093/ijas.v95i12.161654>
- Randriamifidison, R. F. A., Rakotoarisoa, D., Tsiavahananahary, T. J., Rakotovao, T., and Rene de Rolland, L. A. :** 2021, Utilisation des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : réalités écologiques, sociales et économiques dans les communes Ambositra I et Ambositra II Madagascar, Proc. IAHS, 384, 305–312, <https://doi.org/10.5194/piahs-384-305-2021>.
- RABEMANANTSOA Harimalala Lucia,** 2026. Rapport d'analyse de sol du site Mangamila du projet MIP.

