

Régionalisation des potentiels de production de la canne à sucre à la Réunion

Introduction

Située sous l'influence des alizés de nord-est, l'île de La Réunion (2 512 km²) présente de nombreux microclimats en fonction du relief. La canne à sucre occupe environ 28 000 ha, dont un tiers à moins de 400 m d'altitude, « sous le vent », est irrigué. La variabilité climatique influence la culture à travers l'alimentation en eau, le rayonnement solaire et la température. Ces trois facteurs étant étroitement liés à l'altitude, il s'est avéré intéressant, alors que les coûts de fonctionnement et d'investissement de l'irrigation devenaient importants, de préciser l'efficacité de l'irrigation en fonction de l'altitude. Une méthode de spatialisation des rendements attendus est développée à cette fin.

Méthode

Principe

Une corrélation est établie entre le rendement des essais et un paramètre climatique qui sera retenu comme indicateur régional de la production. La spatialisation de ce paramètre permettra de cartographier le potentiel de production de la culture. En conditions d'alimentation hydrique non limitante, si les autres facteurs de production (façons culturales, fertilisation, contrôle des adventices et des ravageurs, etc.) sont à l'optimum, le rendement

maximum ne dépend que du rayonnement et de la température (MONTEITH, 1981 ; MUCHOW *et al.*, 1994 ; MARTINE *et al.*, 1999). Le rayonnement global (à défaut de mesure du rayonnement intercepté par la culture) est une des variables sélectionnées pour la spatialisation. La baisse des rendements en altitude est, pour partie, liée à la température, cette variable étant intégrée dans le facteur radiatif (LANGELLIER, 1990).

En conditions d'alimentation hydrique limitante, le rendement n'atteint pas le maximum. Le principe appliqué est le suivant : pour une zone donnée, le rendement dépend du potentiel climatique de la zone et du degré de rationnement hydrique évalué par le rapport E_{tr} / E_{tm} (évapotranspiration réelle / évapotranspiration maximale). Ce dernier sera spatialisé, et pris comme seconde variable explicative du rendement de la culture pluviale. L'analyse est menée sous la forme d'une analyse fréquentielle, en terme probabiliste.

Les sites expérimentaux

Sur les sept sites étudiés (figure 1), quatre parcelles de 300 m² sont analysées pour deux systèmes de culture, en pluvial et irrigué, et pour deux périodes de récolte : début de campagne (août) et fin de campagne (octobre-novembre). L'irrigation est réalisée par un réseau en goutte à goutte enterré. Les doses ont été calculées pour satisfaire la demande climatique (BERGERON, 1989). Une

P. LANGELLIER-BELLEVUE

Complexe sucrier de Ferké 2, Sucraf-CI,
BP 731, Korhogo, Côte d'Ivoire
pierre.langellier_bellevue@cirad.fr

A. CLOPES

Cirad-amis, maison de la télédétection,
500 rue Jean-François Breton,
34093 Montpellier Cedex 1, France

F. MARAUX

Cirad-amis, avenue Agropolis,
34398 Montpellier Cedex 5, France



Figure 1. Localisation des sites d'expérimentation et des stations météorologiques.

station météorologique automatique est installée sur chaque site.

Le cycle de culture dure douze mois en repousse et la campagne de récolte s'étale de juillet à novembre. La variété R570 est la référence principale. Les variétés R568 et R571 d'une part et la variété R574 d'autre part, mieux adaptées respectivement aux conditions agroclimatiques des Hauts (Trois Bassins) et de l'Est (Saint-Benoît), ont été retenues pour ces sites. La fertilisation apportée par le réseau d'irrigation (sauf à Saint-

Benoît, site conduit en pluvial strict) a été calculée sur la base de 1 t/ha de l'engrais soluble 15-7-24 (azote, phosphore, potassium).

Modélisation du potentiel de rendement hors stress hydrique

Les données de base du rayonnement global proviennent de la carte de GENERE et NATIVEL (1989) reprise par RAUNET (1991). Pour respec-

ter la continuité par rapport aux limites maritimes de la carte, la variable intermédiaire « rayonnement + altitude » a été créée. L'interpolation de cette variable par la fonction Spline (FRANKE, 1982) conduit à associer, après retrait de l'altitude, une valeur de rayonnement à chaque pixel (carré de 100 m de côté). Le fichier du rayonnement annuel moyen exprimé en joules/cm².jour est ainsi établi. Le modèle linéaire d'estimation du rendement (figure 2) permet de transformer la valeur de rayonnement attribuée à chaque

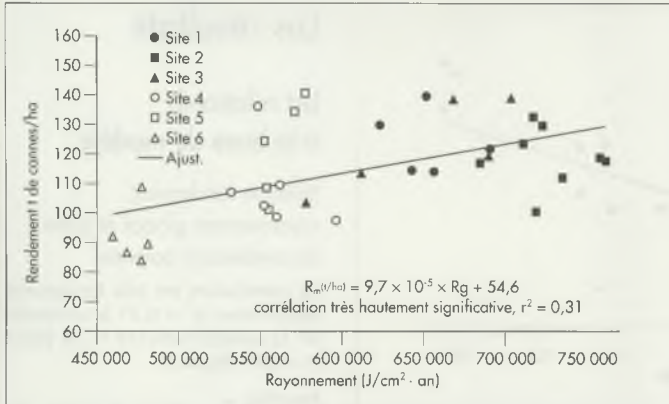


Figure 2. Relation entre le rayonnement global et le rendement en canne, en l'absence de stress hydrique.

pixel en valeur de rendement (figure 3). L'interpolation n'est réalisée que jusqu'à 1 000 m d'altitude. En effet, extrapoler pour des altitudes plus élevées est irréaliste pour la culture de la canne, et trop hasardeux, les ajustements ayant été calculés jusqu'à 990 m d'altitude. On sait par ailleurs, qu'à cette altitude la couverture nuageuse risque d'induire une inversion des gradients de pluie et de rayonnement (BARGEAS, 1984 ; GÈNERE, 1985 et 1990). L'intérieur des cirques de l'île n'est pas non plus pris en compte. Pour des raisons de continuité des calculs informatiques et du tracé, il n'est pas possible de limiter le zonage aux seules aires de production de la canne à sucre. Les zones du Grand Brûlé (pente est du volcan), et la zone côtière entre La Possession et Saint-Denis sont bien sûr impropres à toute culture. Les andosols perhydratés des Hauts de l'Est sont aussi à écarter : sur ces sols peu fertiles, les corrélations de base du modèle ne sont plus valides.

Modélisation du potentiel de rendement des cultures pluviales

L'effet d'un déficit hydrique sur le rendement apparaît dans la relation entre le différentiel de rendement relatif et le déficit d'évapotranspiration relatif (DOORENBOS et KAS-

SAM, 1980) :
 $1 - Ra / Rm = Ky \times (1 - Etr / Etm)$
 (équation 1), avec
 - Ra (t/ha), rendement en culture non irriguée ;
 - Rm (t/ha), rendement potentiel

figurant sur les cartes de potentiels hors stress hydrique ;
 - Etr, évapotranspiration réelle d'une culture pluviale ;
 - Etm, évapotranspiration maximale de cette culture ;
 - Ky, coefficient de réponse du rendement.

Les rapports Etr / Etm, nécessaires à la cartographie du rendement de la culture pluviale, ont été obtenus par simulation du bilan hydrique fréquentiel sur 33 points (18 postes pluviométriques en complément des stations) en année médiane, quinquennale sèche, et quinquennale humide. Les valeurs des Etp Penman quotidiennes ont servi à la simulation. Le cycle de repousse a une durée de douze mois, le sevrage est appliqué un mois avant récolte. La profondeur d'enracinement est de un mètre.

La représentation cartographique de l'indice Etr / Etm pour une réserve

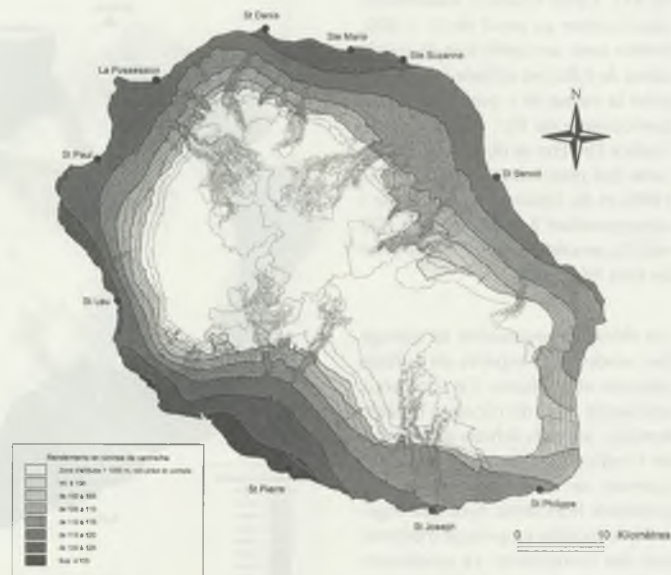


Figure 3. Cartographie des rendements potentiels de la canne à sucre à la Réunion, en l'absence de stress hydrique.

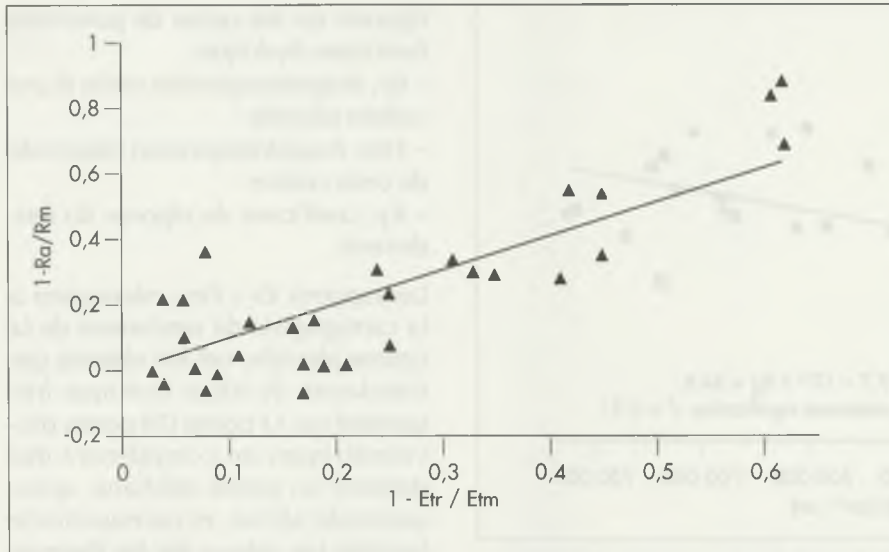
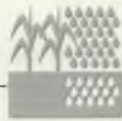


Figure 4. Relation entre le déficit hydrique et le rendement de la canne à sucre.

utile (RU) de 100 mm (correspondant à peu près à la RU médiane des zones irriguées) est utilisée comme référence. Le calcul de cet indice pour les réserves utiles 40 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm, et 120 mm conduit à une relation quadratique entre d'une part l'écart de l'indice pour sa référence à la RU égale à 100 mm et d'autre part le différentiel de RU. Cette relation hautement significative au seuil de 1/ 1 000, établie avec un coefficient de corrélation de 0,88, est utilisée pour interpoler la valeur de I, pour une valeur quelconque de RU. Le zonage de l'indice Etr / Etm se déduit donc de la carte des réserves utiles (RAUNET, 1989) et du fichier des valeurs de I correspondant à la RU égale à 100 mm. La procédure est identique pour les trois fréquences.

Les éléments nécessaires au zonage des rendements espérés en culture pluviale sont réunis. Ce sont pour une seule date de récolte (15 septembre) : les trois fichiers des valeurs de l'indice Etr / Etm aux trois fréquences, un fichier des rendements potentiels hors stress hydrique (figure 3), le modèle empirique d'estimation des rendements. Le rendement médian est donné en illustration (figure 5). La différence entre la carte des potentiels hors stress (figure 3) et celle des rendements de la culture

pluviale conduit à estimer les gains de rendements en canne à sucre dus à l'irrigation une année sur deux (figure 9).

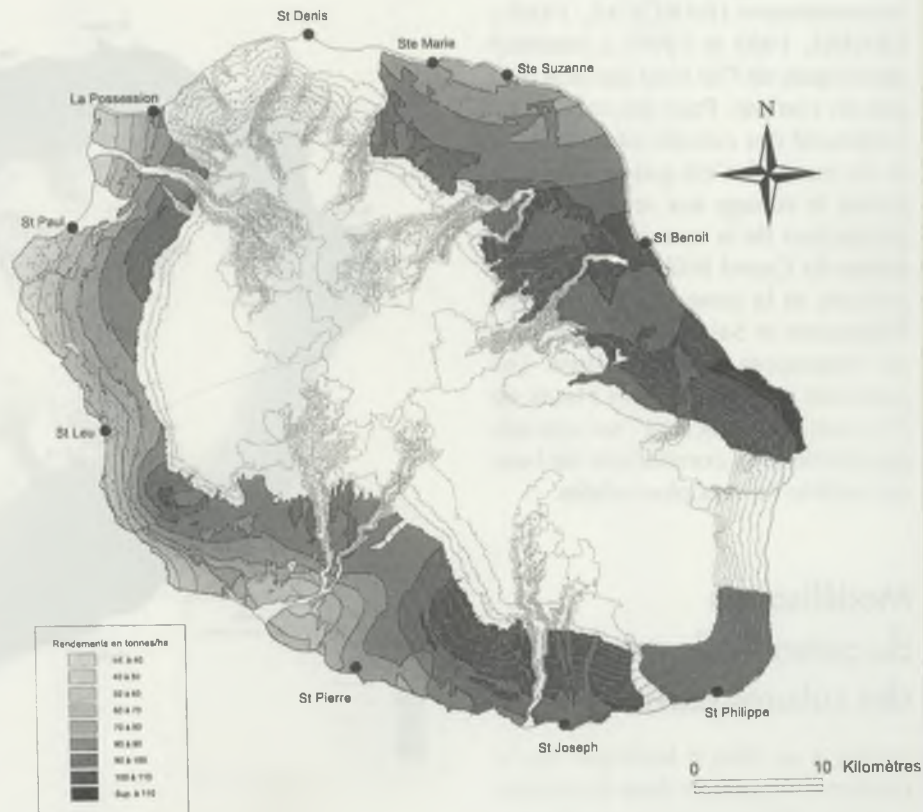


Figure 5. Cartographie des rendements médians de la canne à sucre en culture pluviale.

Les résultats

Les relations à la base du modèle

Relation rendement, rayonnement global et carte de rendement potentiel

La corrélation est très hautement significative ($r^2 = 0,31$ à comparer de la valeur tabulée 0,20 pour $P = 0,01$) (figure 2).

$$R_m \text{ (t/ha)} = 9,7 \times 10^{-5} \times R_g \text{ (J/cm}^2 \cdot \text{Jour)} + 54, 6.$$

Le rendement potentiel maximum est obtenu dans le sud de l'île (Saint-Pierre) (figure 3). Ce maximum voisin de 130 t/ha est à considérer comme un rendement moyen espéré de la zone. Il ne s'agit pas d'un seuil, car les données à la base de la relation rendement-rayonnement montrent une voie très

nette d'amélioration pour les fortes valeurs de rayonnement. La réalisation du rendement va dépendre des conditions édaphiques rencontrées par la canne. Parmi les sept sites étudiés, celui de Piton Saint-Leu présente d'excellentes qualités, ce qui explique que les données issues de ce site sont majoritairement au-dessus de la droite d'ajustement (figure 2). Ce constat est valable aussi lorsque la qualité du sol ne permet pas d'atteindre le potentiel permis par le climat (comme sur le site de Pierrefonds, avec des points situés majoritairement en-dessous de la droite d'ajustement).

Relation entre la baisse de rendement et le déficit de l'évapotranspiration relative en culture pluviale

La corrélation est aussi très hautement significative ($r^2 = 0,73$, à comparer à la valeur tabulée 0,20 pour $P = 0,01$) (figure 4).

$1 - Ra / Rm = 1,03 \times (1 - Etr / Etm)$.

La carte du rendement médian de la culture pluviale (figure 5) fait clairement ressortir les zones au vent et sous le vent.

Les potentialités de rendement hors stress hydrique

Les cartes permettent de visualiser la distribution des rendements sur l'ensemble de l'île. Chaque carte constitue une base de données dont on peut extraire des résultats. On a pris comme exemple les couples rendement / altitude sur cinq toposéquences étagées entre les cotes 0 et 1 000 m. Des comportements similaires apparaissent entre Grand Bois et Saint-Pierre et entre Nord et Ouest (figure 6) ainsi qu'une convergence vers 700 m. Les potentiels diminuent en fonction de l'altitude, selon un gradient spécifique à chaque zone (tableau 1).

Les potentialités de rendements de la culture pluviale

Le fichier des rendements des cannes pluviales (figure 5) permet une comparaison entre les zones de production (tableau 2). On remarque que les rendements estimés au-dessous de 400 m pour les zones Ouest et Sud (Saint-Pierre) en année médiane s'avèrent faibles et impropres à satisfaire une bonne rentabilité de l'exploitation, notamment hors irrigation.

Les évolutions des rendements pour les quatre toposéquences précédemment définies sont aussi accessibles (figure 7). Pour la zone Ouest (toposéquence établie à Saint-Gilles), on remarque une augmentation rapide des rendements jusqu'à 500 m, plus lente ensuite. Si la même limite de 500 m d'altitude est observée au Sud, on constate qu'au-delà de 600 m, le potentiel de la culture pluviale n'évolue plus. Le potentiel maximal de la culture pluviale, atteint dès 600 m dans le Sud, est obtenu plus haut dans l'Ouest. Ceci traduit des déficits

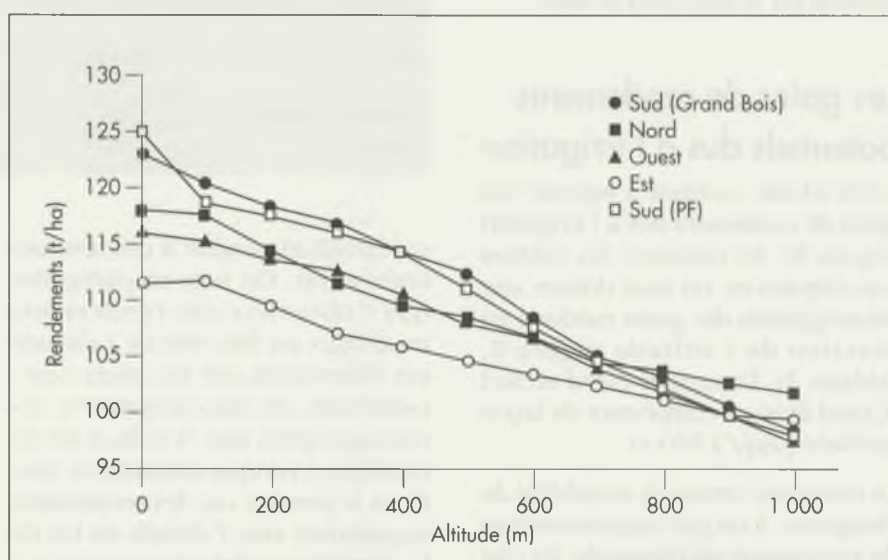


Figure 6. Evolution des rendements potentiels hors stress hydrique de la canne à sucre en fonction de l'altitude.

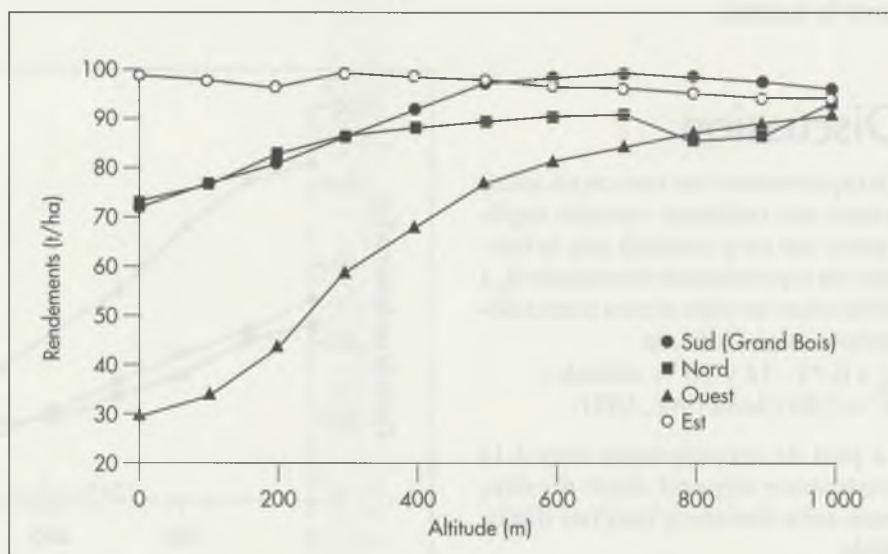


Figure 7. Estimation des rendements potentiels médians de canne à sucre en culture pluviale.



hydriques plus importants dans l'Ouest.

Les zones Nord (toposéquence à Sainte-Marie) et Sud (toposéquence à Grand Bois) évoluent de façon semblable jusqu'à 300 à 400 m. Par la suite, les rendements divergent au profit de la zone Sud, qui offre de meilleures potentialités pluviales en altitude que le Nord.

Dans la zone Est, les rendements ont tendance à diminuer à partir de 350 m. Cette observation trouve sa justification dans un bilan hydrique mieux équilibré en dessous de cette altitude. La même évolution est notée, mais plus haut, en année humide sur la côte sous le vent.

Les gains de rendements potentiels dus à l'irrigation

Cette étude conduit à estimer les gains de rendement dus à l'irrigation (figure 9). En retenant les mêmes toposéquences, on peut dresser une allure globale des gains médians en fonction de l'altitude (figure 8, tableau 3). Les zones Nord et Sud (Grand Bois) se comportent de façon similaire jusqu'à 500 m.

Le choix des limites de rentabilité de l'irrigation, à un gain supplémentaire de rendement en canne de 30 t/ha pour le goutte à goutte et de 20 t/ha pour l'aspersion (CHASTEL, 1989 ; FERRAND, 1989), permet d'en dessiner le contour.

Discussion

Le rayonnement net intercepté aurait fourni une meilleure variable explicative, car on a constaté que la fraction de rayonnement interceptée (f_{ri}) varie selon les sites et plus particulièrement selon l'altitude :

$$f_{ri} = 0,75 - 18 \times 10^{-5} \times \text{altitude} ;$$

$$R^2 = 0,93 \text{ (MARTINE, 1997).}$$

La part de rayonnement utile à la croissance dépend donc du site, mais cette donnée n'était pas disponible.

Malgré cette réserve (sur la valeur utilisée pour le rayonnement), la

Tableau 1. Pentés des courbes altitude / rendement (t/ha pour 100m).

Régions	Sud Grand Bois	Sud St Pierre	Ouest	Nord	Est
---------	----------------	---------------	-------	------	-----

Tableau 2. Les limites de rendement (t/ha), en année médiane, en fonction de la situation.

Altitudes	Sud Grand Bois	Sud St-Pierre	Ouest	Nord
< 100 m	< 78	≅ 55	< 34	< 76
< 200 m	< 82	< 61	< 44	< 83
< 400 m	< 92	< 77	< 68	< 89
> 800 m	< 98	> 84	> 88	> 86

Tableau 3. Limites d'altitude (en m) de rentabilité de l'irrigation.

Zones	Ouest	Sud (GB)	Nord
Goutte à goutte	500	300	250
Aspersion	700	450	450

spatialisation conduit à des résultats intéressants. On note en particulier que l'obtention des rendements maximaux en fonction de l'altitude est déterminée par les effets compensatoires de deux paramètres climatiques selon que la culture est en condition hydrique limitante ou non. Dans le premier cas, les rendements augmentent avec l'altitude du fait de l'augmentation de la pluviométrie, et dans le second cas, les rendements baissent du fait de la diminution du rayonnement.

Le décalage entre les points 800 et 900 m en zone Nord (figures 7 et 8) est à relier à une insuffisance de données météorologiques. Pour améliorer la méthode, il conviendrait d'étoffer le réseau météorologique de la côte au vent et, à condition de retenir la même démarche expérimentale, d'utiliser le rayonnement net au lieu du rayonnement global. L'acquisition de ce paramètre nécessite cependant un appareillage complexe.

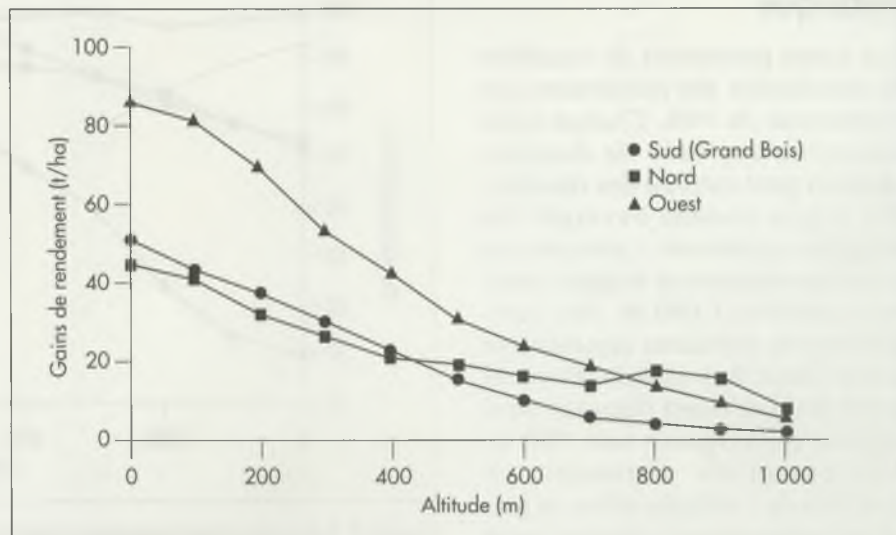


Figure 8. Gains de rendement en canne dus à l'irrigation en année médiane.

Conclusion

A partir de résultats d'essais comparatifs irrigués et non irrigués, de données météorologiques issues d'un réseau d'enregistrement automatique, d'une bonne connaissance des sols, et d'un modèle numérique de terrain au pas de 100 m, les potentiels de production de la canne à sucre ont été spatialisés. Le point clé a été la réalisation des interpolations.

La première interpolation, celle du rayonnement global, a permis de créer des cartes de potentiels de rendement hors stress hydrique. Les autres interpolations, qui concernaient les rendements des cultures non irriguées, ont été effectuées en deux étapes : le calcul des indices de satisfaction hydrique par simulation du bilan hydrique, puis la création d'un modèle linéaire de production intégrant ce paramètre (E_{tr} / E_{tm}) et les rendements hors stress hydrique.

Les cartes de rendement conduisent à l'étude de la rentabilité de l'irrigation en fonction de l'altitude. Les limites de la méthode sont celles des procédures d'interpolation et la simplicité du modèle (front racinaire, etc.). Une diffi-

culté est liée au faible nombre de stations météorologiques, surtout sur la côte au vent. Ces résultats constituent une base de réflexion pour le développement, en particulier pour la mise en eau du périmètre de l'Ouest.

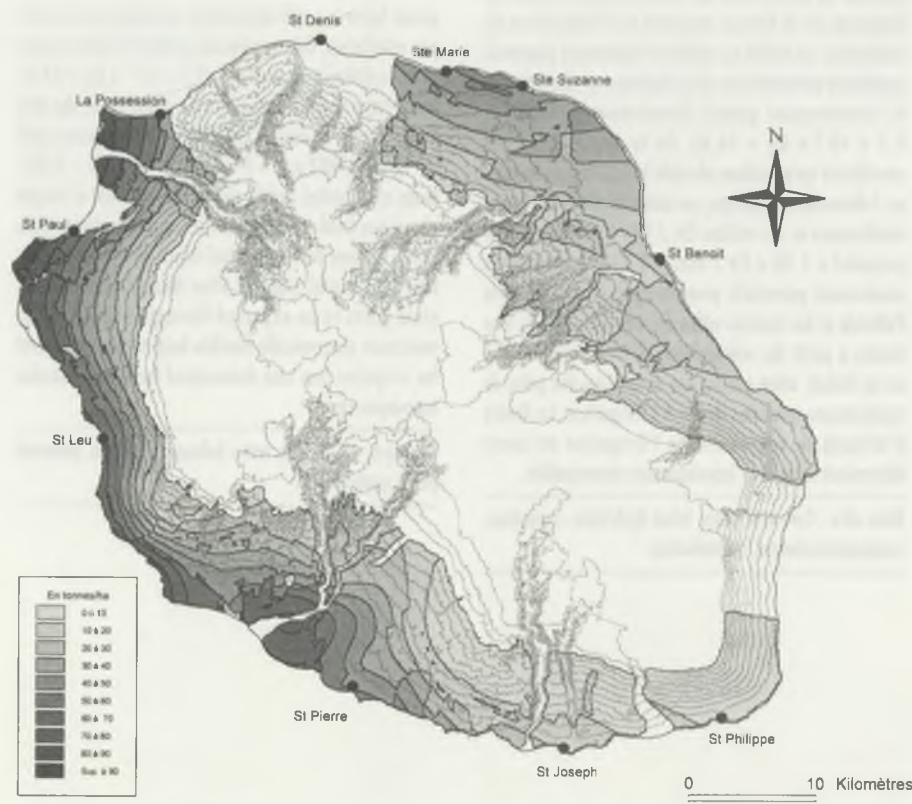


Figure 9. Représentation cartographique des gains de rendement en canne dus à l'irrigation en année médiane.

Bibliographie

BARGEAS A., 1984. Evaluation globale de la ressource en eau de l'île de la Réunion ; apports de la simulation par modèles hydrologiques. Rapport : 84SGN 232 AU/REU, BRGM, Orléans, France, 384 p.

BERGERON M., 1989. Etude comparative du bilan hydrique simulé et mesuré avec une sonde neutronique. Application à la culture de la canne à sucre sur l'île de La Réunion. Ensam, Irat, la Réunion.

CHASTEL J.-M., 1989. Choix du matériel d'irrigation. Aspects économiques. Irat, rapport annuel Réunion, 1989, Saint-Denis.

DOORENBOS J., KASSAM A.H., 1980. Réponse des rendements à l'eau. Document Fao n° 33, Rome, Italie. 235 p.

FERRAND I., 1989. Le goutte à goutte à La Réunion, quelques critères de décision pour les agriculteurs. Saint-Denis, la Réunion, Irat, mémoire Istom, 67 p.

FRANKE R., 1982. Smooth Interpolation of Scattered Data by Local Thin Plate Splines. *Comp. & Maths. With Appls.* 8 (4) : 237-281.

GENERE B., NATIVEL R., 1989. Répartition de la ressource solaire à la Réunion. Fiche d'essai climatologie 01. Irat, la Réunion, 6 p.

GENERE B., 1985. Réseau multilocal de mesures climatiques à la Réunion: pour une connaissance fiable du mésoclimat et l'appui à l'expérimentation agronomique. *L'Agron. Trop.* 40 (3) : 202-210.

GENERE B., 1990. Etude de l'évapotranspiration potentielle (Etp Penman) à la Réunion. *L'Agron. Trop.* 45 (2) : 115-123.

LANGELLIER P., 1990. Etude de la variabilité multilocale de la croissance de la canne à sucre à La Réunion. Ses conséquences sur le rendement. Application à la zone des périmètres irrigués de l'ouest et du sud. Irat, la Réunion, 32 p.

MARTINE J.-F., 1997. Variabilité de la croissance et des potentialités de la canne à sucre à la Réunion : utilisation du modèle de

croissance Mosicas. Comptes rendus du congrès Artas, 1997, la Réunion, p. 353-365.

MARTINE J.-F., SIBAND P., BONHOMME R., 1999. Simulation of the maximum yield of sugar cane at different altitudes: effect of temperature on the conversion of radiation into biomass. *Agronomie* 19 : 3-12.

MONTEITH J.-L., 1981. Does light limit crop production ? *Physiological Processes Limiting Plant Productivity*. C.B. Johnson. London, Grande Bretagne, Butterworths, p. 23-37.

MUCHOW R., SPILLMAN M.F., WOOD A.W., THOMAS M.R., 1994. Radiation interception and biomass accumulation in a sugar cane crop grown under irrigated tropical conditions. *Aust. J. Agric. Res.* 45 (1) : 37-49.

RAUNET M., 1989. Carte morphopédologique. Aptitudes à l'irrigation. Littoral ouest. Echelle 1/10000. Irat, département de la Réunion.

RAUNET M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion. Conséquence pour la mise en valeur agricole. Cirad-ca, 438 p.



Résumé...Abstract...Resumen

P. LANGELLIER-BELLEVUE, A. CLOPES, F. MARAUX —
Etude de la régionalisation des potentiels de production de la canne à sucre à la Réunion.

Conduite sur l'île de La Réunion, cet étude utilise comme variable d'entrée les résultats d'essais menés en divers sites d'altitude variée, pour spatialiser les rendements de la canne à sucre. En posant comme principe qu'à l'optimum de tous les facteurs de production d'une culture, la conversion du rayonnement solaire en biomasse est le facteur essentiel de l'élaboration du rendement, on établit un modèle d'ajustement plaçant le rendement potentiel hors stress hydrique en relation avec le rayonnement global (Rendement potentiel = $9,7 \times 10^{-5} \times R_g + 54,6$). De la même façon, en considérant qu'en culture pluviale le seul facteur limitant est l'alimentation hydrique, on établit la relation entre les rendements et les indices E_{tr} / E_{tm} ($R = \text{Rendement potentiel} \times 1,03 \times E_{tr} / E_{tm} - 0,03$). Des cartes de rendements potentiels, prenant également en compte l'altitude et les réserves utiles des sols, ont ainsi pu être tracées à partir des valeurs interpolées de ces relations ; on en déduit, entre autres, une estimation des gains de rendements attendus grâce à l'irrigation. La limite d'altitude de rentabilité de l'irrigation est aussi déterminée sur quatre toposéquences remarquables.

Mots-clés : Canne à sucre, bilan hydrique, irrigation, rendement potentiel, spatialisation.

RES: P. LANGELLIER-BELLEVUE, A. CLOPES, F. MARAUX —
Study of the regionalization of sugarcane production potential in Réunion.

This study, conducted in Réunion, used as the initial variable the results of trials conducted at various sites at different heights above sea level, with a view to spatializing sugarcane yields. Taking as a principle that when all the production factors for a given crop are optimum, solar radiation conversion into biomass is the prime factor in yield elaboration, an adjustment model was established, linking potential yield (PY) without water stress to global radiation ($PY = 9.7 \times 10^{-5} \times R_g + 54.6$). In the same way, assuming that in rainfed crops, the only limiting factor is water supply, the relation between yield (Y) and AET/MET is $Y = PY \times 1.03 \times AET/MET - 0.03$. Maps of potential yields, also taking account of height above sea level and available soil water reserves, were drawn up from the interpolated values for these relations; they can be used, amongst other things, to estimate the yield gains to be expected through irrigation. The maximum economically feasible height above sea level for irrigation was also determined for four particular toposequences.

Keywords: Sugarcane, water balance, irrigation, potential yield, spatialization

P. LANGELLIER-BELLEVUE, A. CLOPES, F. MARAUX —
Estudio de la regionalización de los potenciales de producción de la caña de azúcar en la Reunión.

Este estudio, realizado en la Reunión, utiliza como variable de entrada los resultados de ensayos realizados en diferentes sitios de distinta altitud, para espacializar los rendimientos de la caña de azúcar. Estableciendo como principio que en el nivel óptimo de todos los factores de producción de un cultivo, la conversión de la radiación solar en biomasa es el factor esencial de la elaboración del rendimiento, se estableció un modelo de ajuste situando el rendimiento potencial sin estrés hídrico con relación a la radiación global ($R_m = 9,7 \times 10^{-5} \times R_g + 54,6$). Igualmente, considerando que en cultivo de secano el único factor limitante es la alimentación hídrica, se estableció la relación entre los rendimientos y los índices E_{tr} / E_{tm} ($R_a = R_m \times 1,03 \times E_{tr} / E_{tm} - 0,03$). De esta forma se pudieron trazar mapas de rendimientos potenciales, tomando en cuenta la altitud y las reservas útiles del suelo, a partir de los valores interpolados de dichas relaciones; se deduce, entre otras cosas, una estimación de las ganancias de rendimientos esperados gracias al riego. Se determinó también el límite altitudinal de rentabilidad del regadío sobre cuatro toposecuencias características.

Palabras clave: caña de azúcar, balance hídrico, riego, rendimiento potencial, espacialización.

Irrigation sur pomme de terre en rotation avec la canne à sucre à l'île Maurice.
 (© Cirad)

