Utilisation d'eau à basse température pour le forçage de cultures sous abris. I. Aspects microclimatique et énergétique

Thierry Boulard, Alain Baille, J. Lorgeou, G. Sappe

► To cite this version:

Thierry Boulard, Alain Baille, J. Lorgeou, G. Sappe. Utilisation d'eau à basse température pour le forçage de cultures sous abris. I. Aspects microclimatique et énergétique. *Agronomie*, 1984, 4 (3), pp.213-220. hal-00884628

HAL Id: hal-00884628

<https://hal.science/hal-00884628>

Submitted on 1 Jan 1984

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Utilisation d'eau à basse température pour le forçage de cultures sous abris. I. Aspects microclimatique et énergétique

Thierry BOULARD & Alain BAILLE

avec la collaboration technique de J. LORGEOU & G. SAPPE

I.N.R.A., Station de Bioclimatologie, Centre de Recherches d'Avignon, F 84140 Montfavet

RÉSUMÉ

Dans le contexte actuel d'énergie chère, l'utilisation des sources d'eau à basse température (20-40 °C) pour le forçage des cultures sous abris se développe. La technique de chauffage du sol par des tuyaux enterrés permet d'utiliser facilement cette eau à basse température. Outre le réchauffage direct du sol, cette technique permet de réchauffer l'air de l'abri et le stockage de quantités importantes de chaleur dans le sol qui peuvent être restituées en cas de besoin. Cependant l'inertie de ce système est considérable et ne permet pas d'ajuster instantanément la fourniture de chaleur à la demande. Cet objectif ne peut être atteint que si on adjoint un chauffage d'air à faible inertie, assuré par des aérothermes à basse température. Les équilibres de température sol-air créés par cette combinaison de deux systèmes de chauffage supposent la révision des principes traditionnels de la régulation et de la conduite des cultures.

Mots clés additionnels : *Chauffage de serre, eaux de rejets, chauffage du sol, microclimat de serre, consommation d'énergie.*

SUMMARY

Using warm water for forcing greenhouse crops. I. Microclimatic and thermal aspects.

With the increasing cost of conventional energy sources, the use of warm rather than hot water is becoming more common in protected cultivation. Soil heating with buried pipes can be used with warm water : it contributes to air-heating in the greenhouse and can supply an important reserve of heat to the soil, to be used as required. The inertia of this system is important and does not allow for instantaneous adjustment of heat supply. This can only be achieved by joint use with low-inertia air heating. The balance of air/soil temperature produced by this heating system implies the introduction of new regulation processes taking soil temperature into account.

Additional key words : *Greenhouse heating, waste heat, soil warming, greenhouse microclimate, energy consumption.*

I. INTRODUCTION

Dans le contexte actuel d'énergie chère, les sources d'eau à basse température (entre 20° et 40°) constituent un gisement potentiel d'énergie gratuite ou bon marché qu'il convient d'utiliser et de maîtriser. Ainsi, les rejets thermiques des industries et des centrales de production d'électricité, les gisements géothermiques, les nappes phréatiques (en association avec des pompes à chaleur) peuvent actuellement être utilisés pour le chauffage des cultures, en plein champ et, surtout, sous abri. Les essais entrepris pour utiliser ces rejets à basse température de façon extensive, en plein champ, datent du début des années 70 et ont été particulièrement nombreux aux USA avec les travaux de l'équipe de l'Université de Corvallis (BOERSMA *et al.*,

1974), en Allemagne Fédérale avec le projet Agrotherm (REINKEN, 1981) et en France avec les travaux du Commissariat à l'Energie Atomique (GRAUBY, 1974). Les essais d'utilisation des eaux tièdes de façon plus intensive pour le forçage de cultures sous abris sont plus récents et l'objet de cet article en 2 parties est de présenter un certain nombre de résultats obtenus dans les expérimentations entreprises sur le site de la centrale électrique de Saint-Laurent-des-Eaux (France) de 1977 à 1981, dans le domaine du forçage de cultures sous abris plastiques au moyen d'eau issue du circuit tertiaire de refroidissement de la centrale. Cette eau, dont la température s'établit à 23° au-dessus de celle de l'air humide, avec une valeur minimale de 30°, a été utilisée :

— dans un premier temps, avec chauffage du sol par tuyaux enterrés en plein champ et sous abris,

— ensuite, en y associant un chauffage d'air par aérothermes, utilisant la même eau, pour le chauffage d'abris.

On présente, dans cette 1^{re} partie, les résultats expérimentaux concernant les aspects thermique et énergétique de ces systèmes de chauffage.

Un autre article traitera de la modélisation du système de chauffage par tuyaux enterrés dans le sol par une comparaison entre les valeurs obtenues expérimentalement et celles du modèle.

La 2^e partie abordera les réactions de certaines plantes (fleurs coupées issues de bulbes) à ces types de chauffage et aux modifications du microclimat qu'ils entraînent.

II. LE CHAUFFAGE DU SOL PAR TUYAUX ENTERRÉS

Contrairement aux chauffages traditionnels de serres qui utilisent de l'eau à haute température (70° à 90°), la majorité des réalisations de chauffage à partir des eaux tièdes nécessitent des échangeurs de grande surface qui, pour ne pas faire obstacle à la pénétration de la lumière, doivent être localisés soit près du sol ou à sa surface comme les gaines plastiques posées sur le sol, soit par des nappes de tuyaux enterrés dans le sol. Le système utilisant les gaines plastiques aussi appelé « paillage radiant » a été étudié de façon approfondie (BAILLE *et al.*, 1977), et on connaît maintenant assez bien ses performances, ses avantages — comme la possibilité de localiser le chauffage à proximité immédiate du sol et des plantes, à l'écart des parois, et de diminuer ainsi les déperditions de chaleur — mais aussi ses inconvénients, l'encombrement au sol qui empêche son utilisation pour des cultures à forte densité (laitues, fleurs coupées, ...) ainsi que la difficulté de contrôler le chauffage du sol indépendamment de celui de l'air. Par contre, le chauffage par tuyaux enterrés n'a fait l'objet que d'un nombre de travaux assez restreint, du moins pour le chauffage d'abris ou de serres (BAILLE & BOULARD, 1980). C'est pourquoi ce système a été particulièrement étudié dans les essais de Saint-Laurent-des-Eaux.

A. Caractéristiques du système de chauffage

Il est constitué d'une nappe de tuyaux enterrés et connectés entre eux à leur extrémité de façon à présenter une alternance de tuyaux aller et retour, cela afin d'homogénéiser le champ de température dans le sens correspondant à l'axe des tuyaux.

Sur le plan thermique, l'utilisation d'un tel système permet de répondre à différents objectifs :

- réchauffer directement le sol de l'abri et la zone racinaire des plantes,
- réchauffer indirectement l'air de l'abri, essentiellement par conduction à travers le sol et les couches d'air adjacentes,
- donner une plus grande inertie au système de chauffage, afin de freiner la baisse de la température intérieure de l'air de la serre en cas de brusque refroidissement de l'air extérieur ou de coupure d'alimentation en eau.

B. Dispositif expérimental

Les 4 principales configurations étudiées lors des essais sont présentées sur la figure 1. Dans tous les cas, des tuyaux en polyéthylène basse densité ont été utilisés, d'un diamètre

DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

Figure 1

Schéma des principales configurations étudiées.

Scheme of the main configuration studied.

extérieur de 3,2 cm dans la 1^{re} configuration et de 4 cm dans les 3 suivantes.

La comparaison systématique des tunnels chauffés par le sol avec des tunnels témoins non chauffés a permis de mesurer l'effet du chauffage du sol sur la température du sol mais aussi sur la température d'air : configurations 1 et 2. Dans les configurations 3 et 4, on a étudié plus en détail les champs de température du sol chauffé en augmentant la densité des mesures dans le sol. Ce suivi microclimatique et thermique a été assuré par une acquisition de données (TAD) de 42 voies, analogiques (sondes de températures, fluxmètres et mesures de rayonnement) ou numériques (compteurs de débit d'eau). Les mesures sont intégrées sur un pas de temps d'1 h puis enregistrées sur une cassette pour être traitées ultérieurement sur ordinateur.

C. Propriétés thermiques du sol

La conductivité apparente λ ainsi que la capacité calorifique C du sol de Saint-Laurent-des-Eaux ont été calculées par la méthode de DE VRIES (1975) à partir des résultats analytiques d'un profil de sol représentatif du périmètre chauffé. La description et l'analyse physique de ces sols ont été effectuées par la Station I.N.R.A. d'Agronomie de Châteauroux ; nous les avons reportées sur le tableau 1.

A partir du profil de sol analysé, nous avons calculé la composition et les caractéristiques moyennes du sol sur une épaisseur de 0,5 m :

— Sable > 0,02 mm ;	46 p. 100
— Limons fins < 0,02 mm ;	27 p. 100
— Argiles :	24 p. 100
— Matière organique :	2 p. 100
— Densité apparente :	1,47
— Densité réelle :	2,70

TABLEAU 1

Analyse et propriétés physiques d'un profil de sol représentatif du périmètre chauffé.

Analysis and physical properties of the heated soil.

	0-20 cm	20-35 cm	35-90 cm
Analyses physiques			
% terre fine	100	100	100
% argile	21,8	23,1	28,8
% limons < 0,02 mm	24,4	26,7	34,5
% sables > 0,02 mm	53,8	50,2	36,7
texture	LAS	LAS	LAS
Propriétés physiques			
densité apparente	1,44	1,53	1,30
densité réelle	2,69	2,70	2,75
porosité %	46,6	39,6	52,7

Le calcul de la conductivité par la méthode de DE VRIES oblige à distinguer le quartz ($\lambda = 8,8 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$) des autres minéraux ($\lambda = 2,9 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$) ; c'est pourquoi nous avons été amenés à avancer 2 hypothèses extrêmes sur la composition minéralogique des différentes classes de particules en prenant 90 ou 60 p. 100 de quartz pour le sable (sable de Loire à dominante quartzique), 40 ou 20 p. 100 de quartz pour les limons fins (essentiellement des paillettes mica-cées), 15 à 5 p. 100 de quartz pour les argiles. Au total on distinguera donc 2 cas : 56 p. 100 de quartz dans un cas et 44 p. 100 d'autres minéraux, 36 p. 100 de quartz dans l'autre cas et 64 p. 100 d'autres minéraux. Soit en p. 100 volumique :

1) 30 de quartz, 23 d'autres minéraux, 1,5 de matière organique, 45,5 de porosité.

2) 19 de quartz, 34 d'autres minéraux, 1,5 de matière organique, 45,5 de porosité.

Le calcul de la conductivité apparente du sol que nous avons effectué ne porte que sur la conductivité pure et ne prend pas en compte les transferts de chaleur latente par mouvement de vapeur d'eau. Les résultats des calculs pour différents p. 100 d'humidité volumique sont donnés à la figure 2 en comparaison avec des valeurs tirées de la littérature : une argile, le « Yolo light clay » (MOORE, 1939) et un sol fin de Grenoble (PERSON, 1981).

La fourchette des valeurs de λ trouvée est intermédiaire entre celles trouvées pour ces 2 sols. Dans les conditions de l'essai, le sol supportant des cultures, l'humidité volumique a évolué entre les valeurs correspondantes du point de flétrissement et de la capacité de rétention portées sur la figure 2, donc pour des valeurs de λ comprises entre $1,1 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ et $1,5 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$.

La capacité calorifique apparente a été calculée également par la méthode de DE VRIES (1975), elle est reportée sur la figure 3.

D. Le champ de température

1. Le champ de température du sol et la puissance dissipée par les tuyaux

La profondeur d'implantation des tuyaux influe beaucoup sur la puissance qu'ils dissipent et le champ de température du sol. La figure 4 donne un exemple des valeurs moyennes journalières de température du sol dans 2 cas extrêmes : tuyaux enterrés peu profondément ($-0,05 \text{ m}$) et profondément ($-0,5 \text{ m}$), pour sensiblement les mêmes conditions de

Figure 2

Valeurs de la conductivité apparente du sol de Saint-Laurent-des-Eaux calculées par la méthode de DE VRIES en fonction du pourcentage volumique d'eau θ . Comparaison avec des valeurs trouvées pour une argile (Yolo light clay) et pour un sol fin mélangé avec du sable. (PF : point de flétrissement ; CR : capacité de rétention ; S : saturation).

Apparent conductivity values for St Laurent des Eaux soil, calculated by the DE VRIES method, against volumetric water content θ . Comparison with values obtained for Yolo light clay and for a sandy soil. PF : wilting point, CR : retention capacity, S : saturation.

Figure 3

Valeurs de la capacité calorifique apparente du sol de Saint-Laurent-des-Eaux calculées par la méthode de DE VRIES en fonction du pourcentage volumique d'eau θ .

Apparent heat capacity of St Laurent des Eaux soil, calculated by the DE VRIES method, against volumetric water content θ .

température aux limites (température de surface du sol et des tuyaux). Dans le 1^{er} cas, la puissance moyenne dissipée par les tuyaux (mesurée par le débit que multiplie l'écart de température de l'eau entre l'entrée et la sortie du sol) atteint 60 W/m^2 . Une valeur aussi élevée de puissance dissipée est

Figure 4

Champ de températures moyennes journalières mesurées pour deux configurations de tuyaux enterrés. Pour la 1^{re} configuration (tuyaux à -0,5 m), la puissance moyenne dissipée est de 25 W/m² de sol, pour la 2^e (tuyaux à -0,05 m), elle est de 60 W/m².

Range of daily mean temperatures measured for 2 configurations of buried pipes. For the first (pipes at -0.5 m), the mean dissipated power is 25 W/m² of soil, for the second (pipes at -0.05 m), it reaches 60 W/m².

suffisante pour assurer le chauffage de base d'un abri, mais il apparaît que le champ de température du sol est très contrasté avec notamment de forts gradients de températures dans la zone superficielle du sol où la partie racinaire est la plus abondante. Pour des tuyaux enterrés plus profondément, la puissance dissipée est plus réduite (25 W/m²), mais le champ de température dans la « zone utile » du sol est beaucoup plus homogène.

2. La température de surface du sol

La connaissance des températures aux différentes interfaces du système (interface sol-air, interface sol-tuyau) est fondamentale. La valeur de ces paramètres conditionne en effet les échanges de chaleur dans le sol et entre le sol et l'air.

Si la température de surface du tuyau a pu être contrôlée à 2°C près par la maîtrise de la température et du débit de l'eau qui parcourt les tuyaux, la température de surface du sol se fixe spontanément en fonction du bilan thermique à l'interface sol-air, bilan dans lequel le chauffage du sol a une part importante. Pour donner un ordre de grandeur du poids relatif du chauffage du sol par rapport aux autres facteurs dans le bilan d'énergie à la surface du sol et dans la fixation de la température de surface du sol, on a comparé, dans le cas du plein champ, l'évolution journalière de la température de surface d'un sol chauffé (par des tuyaux à -0,5 m) et celle du même sol non chauffé. Parallèlement, sur les mêmes intervalles de temps, on a mesuré la puissance dissipée par les tuyaux au niveau du sol (débit × écart de température d'eau entrée-sortie). Pour une journée sans

nuages avec une forte amplitude journalière de température, 30°C pour la journée du 24 avril 1981 (fig. 5), l'écart de température entre la surface du sol chauffé et témoin est pratiquement constant et égal à 3°C, soit le 1/10 de la valeur de l'amplitude journalière. Par contre, pour une journée couverte avec une faible amplitude journalière de température, 9°C pour la journée du 28 mars 1981 (fig. 6), l'écart de

Figure 5

Comparaison de l'évolution de la température de surface d'un sol chauffé (tuyaux à -0,5 m) et non chauffé en plein champ, évolution parallèle de la puissance dissipée par les tuyaux enterrés. Cas d'une journée avec une forte amplitude de température.

Change in surface temperature of a heated soil (pipes at -0.5 m) and of a non-heated soil in the field; power dissipated by the buried pipes on a day with a high temperature range.

Figure 6

Comparaison de l'évolution de la température de surface d'un sol chauffé (tuyaux à -0,5 m) et non chauffé en plein champ, évolution parallèle de la puissance dissipée par les tuyaux enterrés. Cas d'une journée avec une faible amplitude de température.

Change in surface temperature of a heated soil (pipes at -0.5 m) and of a non-heated soil in the field; power dissipated by the buried pipes on a day with a small temperature range.

température de surface due au chauffage du sol est encore de 3 °C et représente plus du 1/3 de la valeur de l'amplitude journalière. Les températures de surface du sol chauffé et d'un témoin ont été mesurées par différentes techniques :

— par thermographie infrarouge (caméra AGA) lors de mesures des températures de surface ponctuelles ;

— par sondes platines ou thermocouples implantés à quelques mm sous la surface du sol pour des campagnes de mesures de plus longue durée (cas des exemples des fig. 5 et 6).

Ces résultats sont présentés au tableau 2. On observe que le réchauffement de la surface du sol est assez faible pour des tuyaux enterrés profondément et qu'il augmente avec le rapprochement des tuyaux de la surface du sol.

3. Le dessèchement du sol

Le chauffage du sol ne modifie pas uniquement le profil de température du sol : la chaleur dissipée par les tuyaux enterrés contribue également à augmenter l'évaporation de l'eau à la surface du sol et les échanges à l'intérieur même du sol.

Le profil hydrique du sol chauffé en est modifié. Des contrôles de l'humidité du sol par pesée et étuvage de prélèvement de terre de divers horizons du sol ont permis de constater (fig. 7) qu'il n'apparaissait pas de manchons isolants autour des tuyaux comme cela a pu être signalé autour de résistances électriques enterrées (BOERSMA *et al.*, 1974), mais on constate un dessèchement marqué du sol en profondeur, alors qu'en surface les profils s'égalisent du fait des apports d'eau en surface.

Sous abris, ce processus se traduit par un transfert d'eau vers l'atmosphère de l'abri et se concrétise par une augmentation de l'humidité de l'air qui passe en moyenne de nuit

Figure 7

Evolution du profil hydrique en sol chauffé et non chauffé en plein champ en fonction de la profondeur (février 1981).

Change in water content with depth in a heated soil and a non-heated soil in the field (February 1981).

sur la période de novembre à juin de 86 p. 100 dans le témoin à 90 p. 100 dans l'essai pour des températures d'air sec identiques.

E. Problème de l'inertie thermique

La prise en compte de l'inertie thermique du système est absolument nécessaire si on veut expliquer les variations de température et de puissance dissipée dans le sol. Au niveau journalier, les variations de puissance sont avant tout

TABLEAU 2

Mesures de la température de surface du sol.
Soil surface temperature values.

Paramètres	Dates	Serre	Plein champ	T sol chauffé	T sol non chauffé	ΔT écart	Nature des mesures
T eau ~ 30 °C profondeur 0,5 m écartement 0,8 m Ø tuyau 0,04 m	le 4-5/12/81		×	7,5	6,2	1,3	Mesures instantanées par thermographe infrarouge
			×	5,7	4,5	1,2	
			×	8,8	7,6	1,2	
		×		8,4	7,2	1,2	
		×		8,0	7,0	1,0	
	mars-avril 81		×	13,7	11,1	2,8	Moyenne par thermocouple à - 0,002 m
	février-mars 81	×		11,9	10,0	1,9	
	mars-avril 81	×		17,6	16,5	1,1	Moyenne par sonde platine à - 0,005 m
	novembre 78	×		12,5	7,5	5,0	Moyenne par sonde platine à ~ - 0,005 m

fonction de la profondeur d'implantation des tuyaux (fig. 8). Pour des tuyaux faiblement enterrés (– 5 cm), la puissance dissipée est une fonction directement inverse, avec un certain amortissement, de la température de l'air. Des mesures effectuées simultanément sur des tuyaux enterrés un peu plus profondément (– 10 cm) montrent que les variations de puissance dissipée sont très amorties par rapport à celles des tuyaux à 5 cm. Cet amortissement augmente avec la profondeur d'implantation des tuyaux jusqu'à 30 cm environ, profondeur au-delà de laquelle les tuyaux dissipent une puissance à peu près constante tout au long de la journée.

On observe un phénomène semblable en ce qui concerne les variations journalières du champ de température du sol. Dans le cas des tuyaux peu enterrés, il existe, à proximité immédiate des tuyaux, des zones de sol à température uniforme, peu influencées par les variations de la température extérieure. Par contre, pour des tuyaux implantés à plus de 30 cm de profondeur, la comparaison avec un sol non chauffé montre que le chauffage du sol ne modifie ni le rythme, ni l'ampleur des variations naturelles journalières de température (fig. 9 et 10).

L'inertie du système de chauffage du sol est avant tout fonction de la profondeur d'implantation des tuyaux : c'est en jouant sur ce paramètre qu'on peut ménager une réponse plus ou moins rapide du chauffage du sol à une modification de la température de l'air.

Figure 8
Evolution de la puissance dissipée en fonction de la température d'air pour différentes profondeurs d'implantation des tuyaux.
Change in external temperature and in dissipated power at two depths of pipe.

Figure 9
Evolution en fonction du temps du profil vertical de température sur sol chauffé (cas de tuyaux enterrés à – 50 cm) et non chauffé, à 8 h et à 16 h TU.
Vertical temperature profiles for a heated soil (pipes at – 0.5 m) and a non-heated soil at 08 00 and 16 00.

Figure 10
Comparaison des variations « spontanées » de température du sol en surface et à – 15 cm sur sol chauffé (cas de tuyaux enterrés à – 50 cm) et non chauffé.
Variation in soil temperature (surface and – 0.15 m) for a heated soil (pipes at – 0.5 m) and for a non-heated soil.

III. CHAUFFAGE D'AIR ASSOCIÉ AU CHAUFFAGE DU SOL (CHAUFFAGE MIXTE)

A. Caractéristiques du chauffage d'air

Comme on peut le constater dans l'exemple de la figure 11, l'adjonction d'un chauffage direct de l'air permet d'ajuster immédiatement la fourniture de chaleur aux besoins, alors que le chauffage du sol, du fait de sa forte inertie, ne permet pas de répondre à la brusque diminution de la température au coucher du soleil et à la demande de chauffage qu'elle implique. Pour accroître la puissance calorifique que l'on peut extraire de l'eau tiède, on a donc fait passer cette eau dans des échangeurs secs, du type aérotherme à basse température.

Les mesures faites sur un aérotherme présentant 0,09 m² de tubes ailetés par m² de sol de serre ont permis d'obtenir une relation entre la puissance calorifique dissipée, l'écart de température entre l'eau et l'air et le débit parcourant l'appareil. Pour l'appareil utilisé, ces grandeurs sont liées par une fonction asymptotique, d'équation (fig. 12) :

$$P = 4,15 (T_{\text{eau}} - T_{\text{air}}) (1 - 1,141^{-d})$$

avec

- P puissance dissipée ramenée au m² de sol (W/m²)
- d débit d'eau ramené au m² de sol (l/h . m²)
- T_{eau} température d'eau à l'entrée de l'appareil (°C)
- T_{air} température d'air de consigne de l'abri (°C).

Pour des débits qui tendent vers l'infini, la puissance dissipée tend vers une valeur constante qui est fonction des caractéristiques de l'appareil (géométrie de la surface d'échange, ventilateur, etc.) ; cependant, à un débit de 12 l/h . m², on obtient déjà près de 90 p. 100 de la puissance maximum qui peut être dissipée par l'appareil dans ces conditions de température.

Ce mode de chauffage permet de maintenir des températures de consigne d'air allant jusqu'à 15° avec de l'eau à 30 °C, mais il n'est pas souhaitable, compte tenu du faible écart de température entre l'air et l'eau, d'utiliser ce type d'échangeur pour maintenir une température de consigne supérieure à cette valeur, du fait de la surface importante des échangeurs qui serait nécessaire.

Figure 11

Puissance dissipée par le chauffage du sol (P_{sol}) et par l'aérotherme (P_{air}) en fonction de la température d'air extérieur pour maintenir 11°C sous l'abri.

Power dissipated by soil heating (P_{sol}) and by pulsed air (P_{air}) to maintain 11°C under a tunnel.

B. Performances du système mixte

La comparaison d'un tunnel chauffé par le système mixte (aérotherme avec $0,09\text{ m}^2$ d'échangeur/ m^2 de sol et chauffage du sol) avec un tunnel témoin chauffé par aérotherme électrique pendant 2 campagnes de culture (1979-1980 et 1980-1981) a permis de cerner ses performances sur les plans thermique et microclimatique.

Pendant la campagne 1980-1981, on observe en moyenne, de novembre à mars, une température d'air à 1 m de 11°C dans les 2 tunnels ; par contre, la température du sol chauffé à -15 cm est de 14°C et seulement de 9°C dans le sol du tunnel témoin.

Sur le plan énergétique, les consommations de chauffage de sol et d'air ont été suivies par acquisition sur un pas horaire des valeurs de débits et d'écart de température d'eau entre l'entrée et la sortie du sol ou des aérothermes. La consommation électrique des ventilateurs des aérothermes ainsi que des chauffages d'appoints (aérothermes électriques) a été relevée biquotidiennement. Les consommations globales d'énergie pour ces différents postes, du mois d'octobre 1980 au mois de juin 1981, sont récapitulés sur le tableau 3. On observe que près de 96 p. 100 de l'énergie nécessaire au chauffage de la serre équipée du système mixte provient de l'eau à 30°C . L'énergie électrique nécessaire au travail du ventilateur de l'aérotherme ne représente que 3 p. 100 du total consommé et la consommation calorifique d'appoint n'atteint que 1 p. 100. Sur les 96 p. 100 de chaleur extraite à partir des rejets, 40 p. 100

Figure 12

Valeurs expérimentales et ajustement de la puissance dissipée par un aérotherme dit basse température en fonction du ΔT entre l'air et l'eau et du débit qui le parcourt, toutes ces valeurs sont ramenées au m^2 de serre.

Experimental values and adjustment curves of power dissipated by the low-temperature pulsed air system for different values of ΔT between air and water and different flow rates (values for 1 m^2 of tunnel).

Figure 13

Bilan des consommations d'énergie extraites d'eau de rejets à 30°C pour chauffer une serre avec le système mixte (T1) et comparaison avec un témoin (T2) chauffé à la même température de consigne d'air par des aérothermes électriques.

Cumulated heat consumption for a tunnel with the T1 air-soil heating system using waste water and for the T2 test tunnel heated by an electric pulsed air system at the same air temperature.

TABLEAU 3

Consommations d'énergie des différents postes d'un chauffage mixte et d'un témoin (octobre 1980 à juin 1981).
Energy consumption of the air soil system and of the control (October 1980-June 1981).

	Chauffage mixte					Témoin Chauffage d'air
	Ventilateur	E air Appoint	E sol Rejets	E sol Rejets	E total Rejets	
KW · h/m ²	4,47	2,15	123	83	206	198
Equivalent en litres de FOD/m ²	0,58	0,28	16	11	27	26

sont fournis par le chauffage du sol et 60 p. 100 par le chauffage d'air (fig. 13).

On remarque également que l'efficacité énergétique du système mixte sur le chauffage d'air est légèrement moins bonne que celle du système conventionnel : il demande un peu plus d'énergie pour maintenir la même température d'air à 1 m, notamment à partir de mars, époque où on commence à aérer les serres dans la journée et à évacuer une part importante de la chaleur dissipée en continu par le sol. Cet exemple illustre le problème que pose la régulation de ce système compte-tenu de la forte inertie thermique du sol. Sur le plan pratique, il suppose la révision des principes de régulation traditionnels et la prise en compte de la température du sol ainsi que de ses propriétés thermiques.

IV. CONCLUSION

Les essais conduits à Saint-Laurent-des-Eaux ont démontré qu'il est possible d'utiliser des gisements d'eau tiède

jusqu'à 30 °C pour chauffer des serres à une température de consigne de 10 °C à 15 °C. Ces résultats confirment d'autres essais français (CORMARY, 1981) ou étrangers (PILE *et al.*, 1978), utilisant des sources d'eau tiède dont l'origine est très diverse. Dans le cas présent, le bas niveau de la température d'eau utilisée permet d'envisager l'application de ces nouvelles techniques dans de nombreux domaines. Cependant, certains problèmes subsistent tant au niveau du contrôle de l'inertie du système qu'au niveau de la modification du microclimat dans la serre. A cet égard, une meilleure connaissance du champ de température du sol et la possibilité de modéliser le chauffage du sol permettent de se prévenir contre les hausses trop importantes de la température du sol qui entraînent des problèmes physiologiques et parasitologiques nouveaux qu'il convient d'étudier et d'essayer de résoudre (BOULARD & BAILLE, 1984).

Reçu le 14 mars 1983.

Accepté le 13 octobre 1983.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Baille A., Boulard T.**, 1980. Quelques résultats concernant l'utilisation des rejets thermiques des centrales pour le chauffage du sol par tuyaux enterrés. XIV^e Journées de l'Hydraulique, Soc. Hydro-techn. Fr., Paris, 16-18 sept. 1980, Quest. V, 111-117.
- Baille M., Nicolas B., Rassent E., Brun R.**, 1977. Le chauffage de serres par circulation d'eau dans des gaines plastiques posées au sol : étude microclimatique et résultats agronomiques. *Plasticulture* (36), 13-29.
- Boersma L., Ringle J. C., Davis L. R.**, 1976. A systems analysis of the economic utilization of warm water discharge from power generating stations. *Engin. Expe. Stn. Oregon St. Univ. Corvallis*, Bull. n° 48, déc. 1974, 248 p.
- Boulard T., Baille A.**, 1984. Utilisation d'eau à basse température pour le forçage de cultures sous abris. II. Effet du chauffage du sol sur la croissance et le développement de plantes issues de bulbes (glaiéul, iris, tulipe, lis). *Agronomie*, 4 (3) 221-230.
- Cormary Y.**, 1981. How to calculate greenhouse heat loss according to plant comfort and the type of greenhouse heat exchanger. *Acta Hortic.*, 115, 637-647.
- Grauby A.**, 1974. Quelques exemples d'utilisation des rejets thermiques dans le domaine de l'agriculture en France. *Proc. World Conf., Inst. Vie*, Paris (9-319), T3, 285-291.
- Moore R. E.**, 1939. Water conduction from shallow water tables. *Hilgardia*, 12 (6), 383-426.
- Person J. P.**, 1981. *Caractérisation des propriétés thermo-hydrauliques d'un sol non saturé. application au transport ou au stockage d'énergie par systèmes enterrés*. Thèse Dr-Ing. Univ. Sci. Médic., Inst. Nat. Polytechn., Grenoble, 155 p.
- Pile R., Burns E., Madewell C.**, 1978. Greenhouse environmental control utilizing reject heat. *Transaction ASAE*, (21-2), 342-348.
- Reinken G.**, 1981. Using waste heat for vegetable growing in the open, under plastics and in glasshouses. *Acta Hortic.*, 115, 655-661.
- De Vries D. A.**, 1975. Heat transfer in soils. In D. A. de Vries & N. H. Afgan : « *Heat and mass transfer in the biosphere. I. Transfer processes in plant environment* ». Washington, D. C., 1-28.