

# ITADA PROJET N° 10

**Cultures alternatives - ressources renouvelables  
Culture de plantes énergétiques  
- différentes méthodes de récolte de plantes entières**

## RAPPORT FINAL 1994-1995

### ORGANISMES REALISATEURS

**CHEF DE PROJET :** Dr. Reinhold VETTER (IfuL) Müllheim  
**PARTENAIRE :** Gérard NEUHARD (SUAD67) Schiltigheim  
**ORGANISMES ASSOCIES :** Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen  
IVD, Stuttgart

### 1 POSITION DU PROBLEME

La BIOMASSE représente une ressource énergétique renouvelable qui n'alourdit pas le bilan du gaz carbonique de l'atmosphère (effet de serre). Mise à part des sous produits comme la paille, on peut utiliser des plantes entières comme combustibles solides (ou encore par ex. du bois d'élagage) pour la production de chaleur ou d'électricité. Le rendement énergétique ainsi que le comportement de ces cultures pendant la combustion sont des facteurs déterminants pour leur utilisation en cultures productrices d'énergie.

### 2 OBJECTIFS

1. Choix de cultures énergétiques aptes à la combustion ayant un mode de production connu
2. Test de la technique culturale
3. Amélioration des techniques de récolte et de stockage.
4. Analyse des valeurs énergétiques et du comportement lors de la combustion des cultures énergétiques et du bois

### 3 RETOMBÉES ET EFFETS INDUITS DANS LA PRATIQUE

**Economie :** la culture de plantes énergétiques comme cultures sur terres en jachère (ainsi que l'emploi de bois non-utilisable à d'autres fins) peut contribuer au revenu des agriculteurs.

Sous l'aspect des coûts résultant de l'usage des énergies fossiles (par exemple en conséquence de l'effet de serre par libération de CO<sub>2</sub>) les plantes énergétiques peuvent montrer des avantages sur le plan macro-économique.

**Environnement :** la production de plantes énergétiques respectueuse de l'environnement comme matière première renouvelable, sur des terres agricoles en jachère, aide à maintenir le paysage cultivé. L'utilisation de masse biologique comme énergie renouvelable réduit l'émission de CO<sub>2</sub> et ensuite l'effet de serre. En outre, cela contribue à la sauvegarde des réserves énergétiques fossiles.

## 4 MÉTHODOLOGIE

### 1. Sites expérimentaux

Les essais ont été conduits au cours des deux années sur quatre sites : Müllheim (D), Vendenheim (F-67) et Gamsheim (F-67) ainsi que Binsdorf (D) près de Rottweil.

### Caractéristiques des sites

	site			
	Müllheim (D) 1994 - 95	Vendenheim (F) 1994	Gamsheim (F) 1995	Binsdorf (D) 1994 -95
altitude (m)	232	150	129	600
précipitations (mm)	650	611	821	800
température (°C)	9,5	11,9*	10,6	6,8
Sol	Parabraunerde		Aluvions rhénanes	Schwarzjura
- type de sol	limoneux fin	sablo-limoneux		hhstL
(%S, %Lf, %A)	12, 66, 22	54, 34, 12	25, 35, 37	6, 28, 66
- Qualité relative	81			51
- Particularités				humid.stagn.

\* 1994

Les sites dans la plaine rhénane sont dotés de sols de moyenne à bonne qualité avec une réserve utile satisfaisante, la profondeur à Vendenheim étant supérieure à celle de Gamsheim. A Binsdorf la qualité du sol est endommagée par une couche d'argile retenant l'eau à 60 cm de profondeur.

#### 4.1.1 Conditions climatiques

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	somme/ moyenne
<b>Müllheim</b>													
<b>1994</b>													
mm	50	47	9	82	136	35	68	62	123	53	16		
<b>1995</b>													
mm													
°C													
<b>Vendenheim (1994)</b>													
mm	39	60	26	47	123	78	59	68	74	40	23	43	680
°C	4	3	10	9	15	19	23	20	16	10	9	6	11,9
<b>Gamsheim (1995)</b>													
mm				61	118	84	44	48	55				
°C													
<b>Binsdorf</b>													
<b>1994</b>													
mm	46	34	21	90	135	75	105	70	91	17	34	56	774
<b>1995</b>													
mm													
°C													

A partir de 1995 les données météorologiques ont été enregistrées à Müllheim et Binsdorf par leurs propres stations météo.

Les conditions climatiques de l'année 1994 ont été marquées par les particularités suivantes :

- automne et hiver 1993/94 très mouillés et par conséquent mauvaises conditions pour la préparation des sols et les semis (surtout à Binsdorf)
- printemps arrosé (mai)
- début d'été humide et froid (première décade de juin)
- été subtropical (chaud, sec, stress de chaleur)
- automne doux
- vents d'ouragan au mois de décembre

## **4.2 Choix des cultures et variétés**

L'annexe 1 nous montre les cultures annuelles et pluriannuelles testées en 1994 et 1995 sur les trois sites.

Les cultures ont été choisies selon les critères suivants : existence d'une méthode de culture, coûts du semis etc., productivité élevée en énergie en combinant une faible intensification, caractéristiques de récolte à l'état sec et adaptation au site. Le miscanthus a été introduit comme culture de référence en 1995 à Müllheim.

Les variétés ont été choisies selon les critères de maturité précoce, fiabilité de rendement en conduite extensive (variété low input), résistance au maladie, résistance à la verse, hauteur de paille, tenue de grain à l'épis et inscription (catalogue de variétés).

## **4.3 Réalisation de l'essai**

Les essais ont été installés en grandes parcelles parce qu'il y avait également la technique de récolte à tester :

- Müllheim : 6,5 ar (2 répétitions) en 1994 / 13 ar (sans répétition) en 1995
- Vendenheim : 16 ar (sans répétition)
- Gamsheim : 12 ar (sans répétition)
- Binsdorf : 25 ar (sans répétition)

La préparation du sol a été conduite selon la pratique locale ce qui signifie en général conventionnelle, à Vendenheim et respectivement Gamsheim en partie en combinaison avec le semis.

Les cultures ont été produites suivant des conduites peu intensives (voir annexe) :

- fertilisation azotée réduite (80 à 120 U/ha, Nmin déduit)
- protection phytosanitaire réduite (seulement herbicide)
- pas de régulateur de croissance
- densité peu élevée

L'objectif est de réduire l'utilisation de l'énergie (surtout avec N) et respectivement les coûts,, d'assurer le respect de l'environnement ainsi que d'éviter des produits de combustion éventuellement nocifs résultant des résidus des produits phytosanitaires.

#### 4.4 Essai de combustion

Toutes les cultures testées dans les essais ainsi que les bois de différents espèces d'arbres ont été analysés à „l'Institut pour les processus techniques et les chaudières“ (IVD) de l'Université de Stuttgart.

- **analyse de laboratoire**

Les analyses de laboratoires permettent d'estimer de manière globale le comportement dans la combustion et ses effets éventuels sur les installations de combustion. L'azote, le soufre et le chlore sont responsables des émissions de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> et HCl et ainsi des constituants plutôt indésirables des combustibles. Le chlore peut en outre, provoquer de la corrosion à haute température aux surfaces de surchauffage et évaporation des générateurs de vapeur. Les pourcentages des composants volatiles et la houille solide caractérisent le combustible dans ces propriétés de combustions et de dégazage. A travers l'analyse de la composition des combustibles on peut dans le cas idéal prévoir les émissions qui se produiront lors de la combustion.

La valeur calorifique est établie au laboratoire à l'aide d'un calorimètre-bombe. Avec la formule 1, qui inclut en outre l'humidité du combustible et la teneur en hydrogène, est calculée la valeur calorifique inférieure

$$(1) \quad H_u = H_o - 24,41 \times \text{humidité (\%)} - 218,1 \times \text{teneur H}_2 \text{ (\%)}$$

La valeur calorifique (valeur supérieure H<sub>o</sub>) se distingue de la valeur calorifique inférieure par l'enthalpie d'évaporation

- a) de l'eau qui entre dans les gaz de fumée par l'humidité du combustible,
- b) de l'eau qui entre dans les gaz de fumée par l'oxydation de l'hydrogène du combustible.

La valeur calorifique lors de la combustion se distingue d'autant moins de la valeur calorifique du combustible que le combustible est sec et que sa teneur en hydrogène est faible.

Remarques : en utilisant une chaudière calorifique comme il en existe déjà pour les chaudières à gaz (pour les chaudières à bois elles sont en phases de développement), la vapeur d'eau contenue dans les gaz de fumée est condensée et la chaleur libérée est ainsi utilisée. Avec cette technique, la valeur calorifique supérieure peut être considérée comme la valeur calorifique disponible en minimisant les pertes avec les gaz de fumée.

- **propriétés de combustion dans une chaudière à charbon pulvérisé ainsi que dans une chaudière à couche en tourbillon.**

## 5.5 RESULTATS

### 5.1 Culture des plantes énergétiques

#### 5.1.1 Rendements en matière sèche

L'image N°1 montre les rendements moyens en plantes entières des plantes énergétiques annuelles sur les quatre sites et sur deux ans. Les rendements les plus faibles des cultures annuelles se trouvent avec colza et tournesol. La matière récoltée était presque uniquement de la paille, les grains étant pratiquement tous perdus par égrenage.

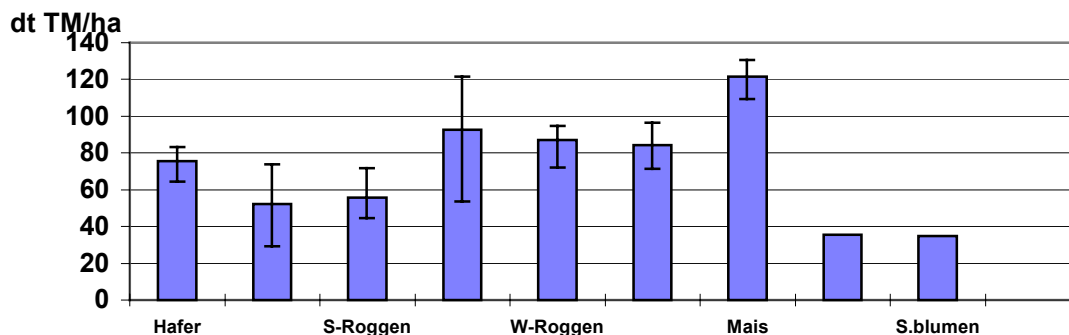
Pour les céréales de printemps, l'avoine a produit avec environ 7,5 t MS/ha le rendement moyen le plus élevé et le plus stable. Triticale et seigle se trouvent en moyenne en dessous à cause de rendements faibles sur deux sites, suite à des problèmes de semis et de récolte.

Les céréales d'hiver ont produit comme prévu des rendements élevés de presque 9 t MS/ha en moyenne. Le triticale d'hiver dépasse le seigle d'hiver et l'orge d'hiver même avec un rendement très peu élevé obtenu sur un site cause d'une densité très faible.

Le maïs a obtenu le rendement le plus élevé de toutes les cultures annuelles et a été dépassé seulement à Binsdorf par exemple par le triticale d'hiver.

Les différences de rendement entre les sites n'ont pas été significatives après deux ans d'expérimentation parce que toutes les cultures n'ont pas été semées pour chaque année sur tous les sites et parce que leur conduite n'a pas été identique.

Les rendements grains des céréales et du maïs étaient compris entre 15 q/ha (seigle de printemps, Binsdorf 1994) et 51 q/ha (avoine, Müllheim 1994) respectivement entre 26 q/ha (Gamsheim 1995) et 68 q/ha (100% MS, Müllheim 1994) pour le maïs suite à la conduite.



	Avoine	Triticale d'été	Seigle d'été	Triticale d'hiver	Seigle d'hiver	Orge d'hiver	Maïs	Colza d'hiver	Tournesol	Millet fibres
<b>ø</b>	75,5	52,4	55,8	92,5	87,1	84,3	121,7	35,4	35,0	
<b>Min</b>	64,6	29,2	44,7	53,8	72,0	71,5	109,3			
<b>Max</b>	83,2	74,0	71,9	121,4	94,7	97,0	130,7			

**Image N° 1 : Rendements moyens et extrêmes des cultures énergétiques annuelles de tous les sites pour les années 1994 et 1995 (q MS/ha)**

Le niveau de rendement des cultures énergétiques pluriannuelles se retrouve en dessous du niveau de rendement des céréales d'hiver (voir tableau N°1). Les herbes énergétiques dépassent jusqu'à maintenant, en moyenne le topinambour et les saules de 2 ans. Pour des résultats plus fiables il faut attendre les prochaines récoltes.

	<b>Herbe énergétique (1 coupe)</b>	<b>Topinambour</b>	<b>Saule (2 années)</b>
<b>Ø</b>	72,0	37,4	50,6
<b>Min</b>	52,9	27,0	
<b>Max</b>	86,4	84,6	

**Tableau N° 1 : Rendements moyens et extrêmes des cultures énergétiques pluriannuelles sur deux sites pour les années 1994 et 1995 (q MS/ha)**

En tout, les rendements récoltés des plantes entières se situent en dessous des rendements produits. En général, cette différence s'explique par la verse en combinaison avec la technique de récolte (Ex. : les céréales) ou surtout par la technique de récolte (Ex. : topinambour à Binsdorf).

### 5.1.2 Méthodes de récolte

Pour la récolte des plantes entières, on a utilisé les techniques disponibles, parfois déjà hors d'usage habituel (voir aussi annexes 11 à 13).

La récolte des plantes entières de céréales est en général sans problème avec les techniques décrites ci-dessous (tableau). Les pertes en graines ont été comprises entre 1 et 20 % de la matière sèche récoltée pour l'année 1994 et les plus faibles pour le triticale. Les pertes importantes à Binsdorf 1994 sont dues au retournement répété de l'andain après une pluie. A Müllheim, les pertes de grain étaient comprises entre 1 et 2 %. En 1995, un battage retardé de l'andain au stade de maturité jaune / début stade de maturité complète, a permis la mise en balles le jour même avec une humidité inférieure à 20 %.

	<b>Céréales Colza</b>	<b>Maïs Tournesol Topinambour</b>	<b>Herbe</b>	<b>Saules</b>
<b>Technique de récolte</b>				
Alternative I	Andaineuse Presse à balles carrées	Récolteuse-hacheuse	Faucheuse Epanduse d'herbe Presse à balles carrées	Récolteuse-hacheuse
Alternative II		Faucheuse à disques Presse à balles carrées		Cisaille/Scie (manuellement)

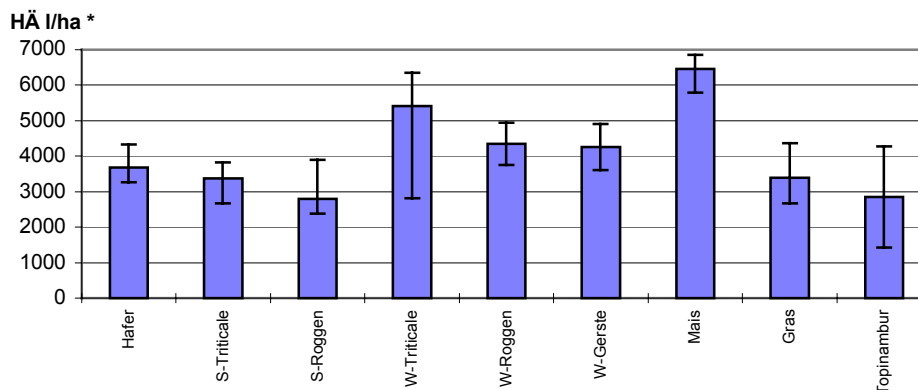
La récolte de l'herbe a été identique à celle des foins ou même plus facile, suite à la coupe tardive comparée à la production de fourrage, ce qui signifie à un stade de lignification avancée.

Toutes les autres cultures ont été récoltées avec une récolteuse-hacheuse parfois aussi avec faucheuse et ensuite presse à balles. Avec le maïs, le pressage des plantes fauchées est possible mais il reste le problème d'une humidité relativement élevée (1994 : 25 à 28 %) même avec une récolte tardive, ce qui complique le stockage prolongé. Avec le topinambour, il faut continuer les tests suivant l'alternative II.

Pour la récolte des plantes entières (exemple des céréales) en une seule fois, il existe des engins de différents constructeurs. Le BIOTRUCK de l'entreprise HAIMER récolte les plantes entières en forme de pellets et les sèche à 4 % par la chaleur du moteur de l'engin. Les combinés-récolteurs des entreprises CLAAS et DEUTZ-FAHR produisent de grosses balles à partir de plantes fauchées et éventuellement hachées. Pour les arbres à croissance rapide, il existe des prototypes de récolteuses-hacheuses qui produisent des morceaux de différentes tailles.

### 5.1.3 Rendement énergétique (équivalent fioul)

Comme les valeurs de combustion des plantes énergétiques analysées ne se différencient guère les unes des autres (voir Chapitre 5.1.5), les équivalents fioul de ces biomasses solides dépendent surtout du rendement en matière sèche. Les cultures diverses se différencient donc selon les rendements par hectare. Suite à cela, les valeurs les plus élevées sont relevées avec le maïs et le triticale d'hiver avec respectivement plus de 6 000 et 5000 l/ha.



\* par rapport au fuel

	Avoine	Triticale de print.	Seigle de print.	Triticale d'autom	Seigle d'hiver	Orge d'autom	Maïs	Herbe	Topinambour
<b>Ø</b>	3682	3374	2792	5421	4344	4257	6459	3390	2852
<b>Min</b>	3272	2671	2385	2817	3757	3612	5791	2668	1421
<b>Max</b>	4326	3820	3889	6356	4941	4902	6864	4359	4282

**Image N° 2 : Rendements moyens et extrêmes de quelques cultures énergétiques sur tous les sites pour les années 1994 et 1995 (q MS/ha)**

### 5.1.4 Bilan énergétique

Pour les deux cultures intéressantes de triticale d'hiver et d'herbe énergétique, les bilans énergétiques simplifiés sont établis pour démontrer le rapport entre l'énergie entrante et l'énergie obtenue. Les limites du système dans ce bilan sont la production des intrants (Ex : Energie entrante pour la production des semences) d'une part et la récolte des plantes énergétiques d'autre part.

Avec les conduites des cultures pratiquées on a récolté environ 13 x plus d'énergie par unité de surface que nécessaire à la production des plantes énergétiques (voir tableau N°2). Cela correspond avec la bibliographie qui indique des valeurs comprises entre 9 et 13 pour les céréales produites en conduite faiblement intensive.

**Tab. 2: Bilan énergétique des plantes énergétiques (résultats 1994 et 1995)**

	Triticale d'automne	Herbe énergétique
Rendement dt TM/ha	93	72
Valeurs de combustion Bo (J/g)	18639	17955
<b>Energie-Sortant (MJ/ha) *</b>	<b>173343</b>	<b>129276</b>
Energie-Entrant (MJ/ha)	13437	9567
Energie-Entrant (%)	8	7
<b>Energie-Sortant / Entrant</b>	<b>12,9</b>	<b>13,5</b>

### 5.1.5 Composition

Les plantes énergétiques des programmes d'essais 1994 et 1995 ont été analysées pour

- la teneur en protéines brutes
- la teneur en lignine, cellulose et hémicellulose
- la valeur calorifique (analyse élémentaire)

**Tableau 3 : Analyse des éléments constituant du bois et de la houille (Valeurs de référence anhydre)**

	Houille Göttelborn 5/94	Houille Göttelborn 12/94	Hêtre	Epicéa	Chêne	Pin	Saule Hohen- heim	Saule Griß- heim	Peuplier Betten- reute
<b>Volatil (%)</b>	34,6	33,55	83,18	82,1	80,57	81,33	81,24	79,42	81,57
<b>Cendre (%)</b>	8,25	11,1	0,34	0,45	0,53	0,43	1,3	2,24	1,63
<b>C fixé (%)</b>	57,1	55,3	16,94	17,46	18,9	18,23	17,47	18,33	16,8
<b>Soufre (%)</b>	0,82	1,38	0,01	0,03	0,01	0,03	0,04	0,09	0,06
<b>Soufre (g/MJ)</b>	0,26	0,44	0,006	0,016	0,006	0,016	0,022	0,046	0,03
<b>Azote (%)</b>	1,09	1,59	0,13	0,11	0,18	0,1	0,48	0,34	0,39
<b>Azote (g/MJ)</b>	0,35	0,51	0,07	0,06	0,09	0,05	0,26	0,17	0,2
<b>Chlore (%)</b>	0,16	0,18	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
<b>Chlore (g/MJ)</b>	0,05	0,06	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
<b>Valeurs de combustion H<sub>o</sub> (J/g)</b>	31 440	31 430	19730	20385	19625	20870	18 590	19 546	19 680

Les bois ne se différencient que très peu dans leur composition. Seuls les représentants des plantations à croissance rapide (saules et peupliers) présentent une teneur en azote quelque peu plus élevée (voir tableau N°3). Cela est dû à la proportion élevée des écorces de ces biomasses récoltées avec des branches très minces. Les teneurs en soufre et chlorure sont extrêmement faibles pour les bois. En comparaison les valeurs de 2 charges de charbon. Les charbons présentent pour tous les éléments nocifs des concentrations nettement élevées que les biomasses. En outre, il faut remarquer la marge dans la composition des deux charges du charbon provenant de la même mine.

Pour les plantes énergétiques sont disponibles les résultats des analyses d'un essai préliminaire à Müllheim 1993 et de l'année 1994 (voir tableau N°4 et 5). On remarque que la teneur en azote augmente dans l'ordre suivant :

tiges de topinambours < paille d'orge de printemps < paille de maïs < paille de tournesols < plantes entières d'avoine < plantes entières de seigle < graines de maïs < graines de tournesol.

La teneur en soufre des plantes entières se situent légèrement au dessus de celle de la paille mais est à juger de toute façon comme faible. La teneur en chlorure est variable selon les résultats disponibles : l'avoine a la teneur la plus élevée. En comparaison avec le charbon, les plantes énergétiques analysées sont (en référence à l'unité énergétique) moins riches en soufre, plus ou moins riches en azote (suivant qu'il, s'agit de paille ou de graines) et plus riche en chlorure (à l'exception de la paille de topinambours). La valeur calorifique est à peu près égale à celle des bois analysés.

Dans les tableaux N° 4 et 5 sont représentés les résultats des biomasses analysées. Les teneurs en éléments volatils se trouvent dans les biomasses analysées dans une marge restreinte entre 77 et 82 %. Les teneurs en cendres se retrouvent dans une marge plus large comprise entre 2 et 10 %. La teneur en cendres la plus faible se trouve dans les graines de plantes entières. Ainsi, les graines de maïs, avoine, seigle et triticale comprennent entre 2 et 3 % de cendres. Les plantes entières, donc paille et graines, contiennent des teneurs en cendres comprises entre 4 et 7 %. La teneur en cendres la plus élevée se trouve dans la paille de tournesol avec 9,8 %.



Pour la teneur C-total, les biomasses ligneuses ont tendance à présenter des pourcentages élevés comparés aux plantes entières agricoles. La teneur en C varie entre 45 à 50 %. La teneur en azote et grains se situe aussi en dessus de celle des mélanges paille et graines des plantes entières. Cela est dû à la teneur en acides aminés dans les graines. On a trouvé des valeurs comprises entre 0,37 % pour la paille de topinambours et tout juste 2 % pour les graines d'avoine.

**Tableau 4 : Analyse des éléments du bois et de la houille (Valeurs de référence anhydre)**

	Houille Göttelborn 12/93	Seigle plante entière	Avoine plante entière	Paille d'orge d'été	Paille de maïs	Grain de maïs	Paille de tournesol	Graines de tournesol	Herbe de Topi- nambour
Volatil (%)	34,90	78,87	76,44	78,65	78,51	79,35	79,99	86,26	83
Cendre (%)	8,11	3,78	6,74	4,27	4,74	3,88	4,28	3,81	2,71
C fixé (%)	57,0	17,35	16,8	17,08	16,75	16,87	15,72	9,89	14,28
Soufre (%)	1,14	0,1	0,18	0,12	0,11	0,14	0,05	0,14	0,09
Soufre (g/MJ)	0,36	0,05	0,1	0,06	0,06	0,07	0,023	0,046	0,05
Azote (%)	1,18	1,36	1,06	0,61	0,84	1,41	0,91	2,54	0,2
Azote (g/MJ)	0,38	0,67	0,58	0,29	0,45	0,7	0,43	0,83	0,1
Chlore (%)	0,22	0,41	0,88	0,4	0,31	0,3	0,14	0,42	<0,1
Chlore (g/MJ)	0,07	0,2	0,48	0,2	0,17	0,15	0,08	0,14	<0,05
Valeurs de combustion H <sub>0</sub> (J/g)	31 470	20 208	18 170	20 544	18 470	20 072	21 023	30 254	18 730

Dans les biomasses se trouve peu de soufre. Seuls les échantillons de colza sont à remarquer avec 0,4 % S. Les autres biomasses analysées sont comprises entre 0,1 et 0,2 % de soufre.

Le rôle clé dans les composants en ce qui concerne la combustion technique incombe au chlore. C'est lui qui est responsable de la corrosion haute température Cl et peut aussi participer à la production des dioxines et furanes. Les teneurs en chlorure des biomasses sont très variables et dépendent du site et probablement aussi de la fertilisation. C'est ainsi qu'on a trouvé des teneurs plus élevées en chlore dans la paille proche de la côte. Dans les biomasses analysées ici on a trouvé des concentrations en chlore < à 0,1 % (limite technique d'analyse) jusqu'à environ 0,5 % pour les grains de tritcale et la plante entière d'avoine.

**Tab. 5 : Composants des plantes énergétiques plantes entières sélectionnées - pour l'année 1994 (Valeurs moyennes)**

	Triticale de print.	Triticale d'autom	Seigle d'autom	Orge d'autom	Maïs	Colza d'autom	Herbe énerg.	Topi- nambour
<b>Protéine brute (% i. TM)</b>	11,81	8,75	7,34	8,41	7,89	6,54	7,06	2,17
<b>Lignine (%) *</b>	14,9	20,1	22,3	15,1	7,0	26,1	16,3	21,0
<b>Hémicellulose (%) *</b>	13,8	16,8	15,5	13,7	9,83	14,7	13,4	16,8
<b>Holocellulose (%) *</b>	54,65	72,8	75,8	66,1	42,8	78,1	70,1	78,45
<b>Cellulose brute (%) *</b>	26,7	42,4	45,1	35,8	28,44	42,4	39,0	39,85
<b>Volatil (%) **</b>	78,32	79,19	78,86	76,43	80,78	80,43	74,13	81,79
<b>Cendre (%) **</b>	4,99	3,75	3,86	5,92	3,46	6,26	7,35	3,67
<b>C fixé (%) **</b>	16,7	17,07	17,31	17,65	15,77	13,33	18,57	14,55
<b>Soufre (%) **</b>	0,17	0,11	0,10	0,12	0,16	0,35	0,13	0,11
<b>Azote (%) **</b>	1,38	0,88	0,52	0,88	1,31	0,92	1,03	0,31
<b>Chlore (%) **</b>	0,24	0,22	0,45	0,78	0,24		0,0	0,3
<b>Valeurs de com- bustion H<sub>0</sub> (J/g)**</b>	18772	18639	18577	17992	1902	18233	17855	18526
					9			

\* se réfère à atro, \*\* se réfère à anhydre

## **5.1.6 Recherches sur le sol**

### **5.1.6.1 N<sub>min</sub>**

Les recherches N<sub>min</sub> effectuées après récolte ne montrent aucun résultat inquiétant sur tous les sites et pour les deux années (voir annexe 6 - 10). Cela est dû à une fertilisation restrictive ou manquante en azote (herbage). Les valeurs les plus élevées après récolte étaient de 117 kg N/ha (Nov. 1994) pour le maïs respectivement 221 kg N/ha pour le triticale (Août 95) à Binsdorf, le plus bas était 5 kg N/ha (Nov. 94) pour l'herbe énergétique à Müllheim.

### **5.1.6.2 Recherches spéciales sur le sol**

Pour les paramètres de fertilité du sol comme l'humus, le pH et les teneurs en éléments nutritifs de base on ne peut pas encore se prononcer après deux années.

## **5.1.7 Stockage des grosses balles**

Les plantes énergétiques récoltées en grosses balles ont été stockées soit sur le champ sous bâches (Müllheim) ou dans une halle.

Après le pressage la température des balles a été mesurée à Müllheim : elle ne dépassait en aucun cas 36 °C (herbe, céréales, colza) puisque l'humidité des plantes entières lors du pressage se situait entre 3 et 20 % (voir annexe 11). La même chose doit être valable pour les autres sites là où l'humidité de la récolte se situait entre 7 et 10 % (voir annexe 12 et 13).

Environ trois mois après, on a ouvert une balle de chaque type de cultures récoltées en balles. En aucun cas l'intérieur des balles n'était pourri ; uniquement dans les balles stockées sur le champ à Müllheim on a constaté qu'il y avait des punaises. Il semble que celles-ci s'y sont cachées ou ont mangé les semences.

## **5.1.8 Coûts de préparation et prix des porteurs énergétiques**

Les calculs suivants (primes 1994 inclus) ont pour résultats des marges comprises entre 500 et 1000 DM/ha (1700 et 3450 FF/ha) pour la production des biomasses franco champs (voir Tab. 6). Elles ont été calculées aussi pour une récolte de maïs et topinambour par récolteuse-hacheuse.

Les coûts pour la matière sèche de biomasse se retrouvent entre 3,85 DM/t pour plantes entières de maïs et 21,54 DM/t pour les plantes entières de céréales. Ils sont influencés surtout par le rendement en matière sèche. Les prix pour le kWh d'énergie de biomasse varient entre à peine 0,01 DM pour le maïs et 0,03 DM pour les céréales. Les coûts de production et respectivement les prix de revient sont les moins élevés pour le maïs (sans prise en compte des coûts pour un séchage éventuel).

**Tableau N° 6 : coûts de production et prix de revient énergétique pour différentes biomasses.**

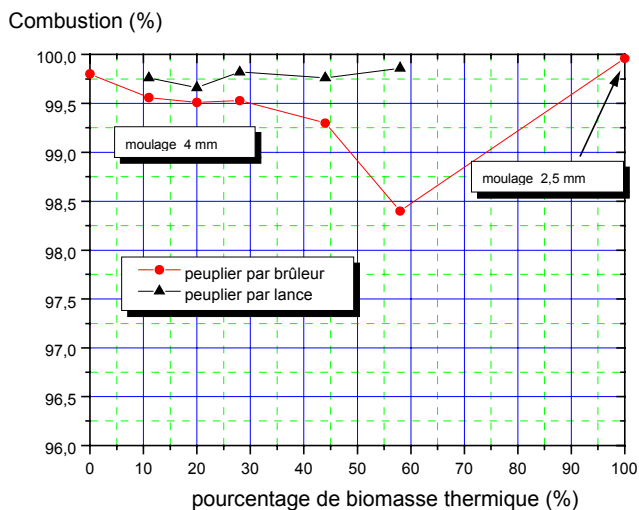
	Coûts de production en DM/q MS				Prix de revient Pf/kWh			
	Céréales plantes entières	Maïs	Herbe énergéti que	Topi- nambour	Céréales plantes entières	Maïs	Herbe énergéti que	Topi- nambour
<i>Marges brutes 500 DM/ha</i>								
<b>Min.</b>	6,33	3,85			1,1	0,7		
<b>Max.</b>	12,19	6,68			2,3	1,2		
<b>Ø</b>	9,26	5,27	9,58	9,45	1,7	1,0	1,9	1,8
<i>Marges brutes 1000 DM/ha</i>								
<b>Min.</b>	13,28	7,67			2,4	1,4		
<b>Max.</b>	21,54	10,68			4,3	1,9		
<b>Ø</b>	17,41	9,18	15,40	15,33	3,4	1,7	3,0	2,9

## 5.2 Essais de combustion

Les essais de combustion de l'IVD, qui d'ailleurs ne sont pas encore terminés, se sont concentrés sur les différents bois (bois de reliquat forestier) pour l'année 1994. La combustion a été effectuée soit en mélange avec du charbon dans un dispositif pour la combustion de poussières, soit en flamme de bois pur. Les plantes énergétiques de la production 1994 ont été analysées au laboratoire et pour la combustion surtout en 1995.

### 5.2.1 Détermination de la taille optimale des grains

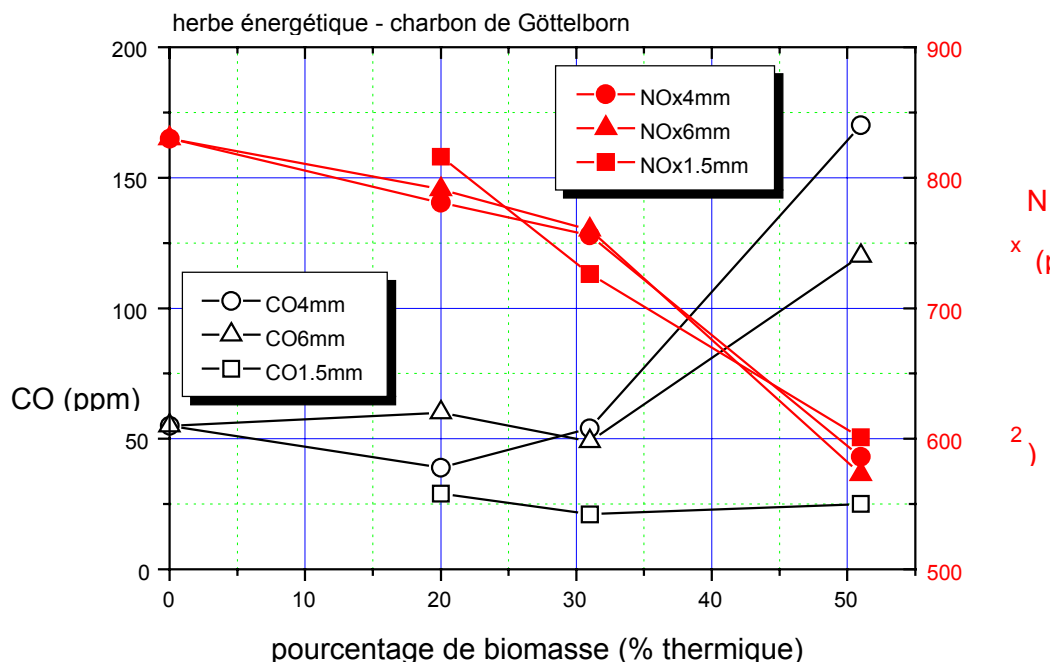
La taille des grains est responsable au premier rang du pourcentage de combustion d'un combustible dans un temps donné de passage à travers la zone de combustion chaude d'un dispositif de



**Image 3 : Pourcentage de Combustion en fonction du pourcentage de biomasse**

Pour détermination du moulage nécessaire en combustion en mélange avec du charbon de Göttelborn les herbes énergétiques ont été moulues en trois degrés différents. L'image N° 4 démontre les émissions en CO et NOx des flammes du mélange en fonction du pourcentage de biomasse thermique. Jusqu'à un pourcentage de biomasse de 30% les émissions de CO se trouvent sur un niveau faible pour tous les degrés de moulage. En dessus de ce pourcentage les émissions en CO augmentent pour les moulages moins fins. Pour les combustions en mélange jusqu'à 30% de biomasse un moulage

combustion de poussière. Plus le combustible est fin, plus le pourcentage de combustion est élevé. Par contre, le moulage fin implique aussi une consommation d'énergie élevée pour le moulage. L'image N°3 qui représente une flamme pure du bois de peuplier montre qu'un moulage de 2,5 mm est suffisant pour atteindre un bon pourcentage de combustion. En utilisant une lance d'injection même un moulage de 4 mm est suffisant. Les céréales plantes entières ainsi que l'herbe énergétique ont été moulues finement (< 1,5 m) à cause de la non-homogénéité du mélange grain-paille. Uniquement pour la paille il suffit d'un moulage < 4 mm.



**Image N° 4 : émissions en CO et NOx de mélanges herbe énergétique - charbon**

grossier est suffisant. Par contre les pourcentages de biomasse plus élevés demandent un moulage plus fin.

### 5.2.2 Réduction des NOx par mesure primaire

Pour la réduction NOx par mesure primaire, on essaye de réduire la création d'oxydes de nitrogène dans la zone des flammes par des mesures techniques de combustion, contrairement aux mesures secondaires qui visent à réduire les oxydes de nitrogènes déjà créés.

Introduction de l'air dans la zone de combustion avec des flammes de biomasse pure en étages :

On a analysé les flammes de biomasse pure pour leur potentiel de réduction de NOx à travers une introduction d'air dans la zone de combustion en étages. Avec ce système on n'introduit pas tout l'air nécessaire pour la combustion comme air secondaire par le brûleur mais une partie est introduite en forme d'air tertiaire dans la chambre de combustion par une lance à air. Ont été testés épicea, peuplier et paille, trois biomasses qui ont des teneurs en azote augmentant dans cet ordre. C'est pour la paille que l'on trouve les émissions les plus élevées de NOx. L'épicea procure les émissions les plus faibles et il s'agit pour la majorité des oxydes, de nitrogènes d'origine thermique qui sont de plus en plus importants avec la faible importation d'azote avec le combustible. La combustion du peuplier produit des émissions NOx comprises entre celles de l'épicea et de la paille.

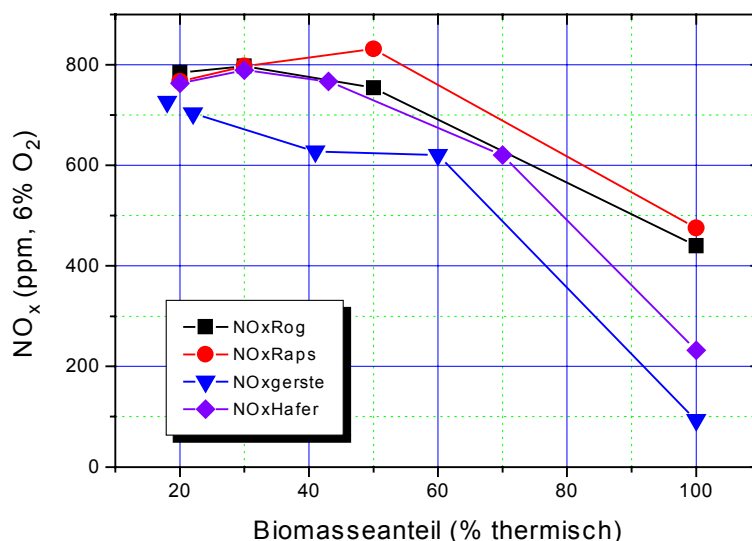
### 5.2.3 Emissions NOx avec différents pourcentages de biomasse

Les émissions NOx diminuent avec un pourcentage de biomasse croissant, bien que l'imput d'azote augmente par la teneur en azote élevée (en comparaison avec la valeur calorifique) de l'herbe énergétique. Une de ces raisons est la conversion réduite de l'azote dans le combustible en NO qui résulte de la libération accrue de CO et NH<sub>3</sub>. Dans l'image N°6 sont présentées les émissions d'NOx lors de la combustion en mélange de colza, orge d'hiver, avoine et plantes de seigle avec charbon de

Göttelborn. Les combustibles se distinguent dans leurs teneurs en azote et ainsi les flammes dans l'imput en azote. La comparaison des teneurs en azote du biomasse et du charbon est présentée dans le tableau N°7, une fois en pourcentage de poids et une autre fois en relation avec leur valeur de chauffage.

**Tableau N° 7 :**

Combustible	Teneur N en % du poids	Teneur N en g/MJ
Göttelborn 12 94	1,59	0,51
Orge d'hiver	0,53	0,28
Seigle d'hiver	0,67	0,36
Herbe énergétique	1,03	0,57
Colza d'hiver	1,47	0,73
Avoine	1,54	0,89



**Image 6 : Emissions NOx des mélanges plantes entières-charbon**

On remarque que les biomasses aux teneurs en azote élevées (colza, seigle, avoine) ont un comportement semblable à la combustion. A l'exception du seigle d'hiver, ces biomasses connaissent des teneurs en azote plus élevées que le charbon. Cela conduit dans ce cas à des émissions NOx comparables. Avec des flammes de biomasses pures (100%), surtout pour les flammes de l'orge et de l'avoine, les émissions de NOx sont en forte diminution et cela en raison des émissions CO très élevées qui ont été enregistrées avec les deux flammes. Le CO réagit avec le NOx pour se transformer en CO2 et azote moléculaire.

## 5.2.4 Emissions SO<sub>2</sub> avec la combustion en mélange de biomasse et charbon

Grâce à la teneur en soufre très réduite, des biomasses on peut s'attendre à une diminution des émissions de SO<sub>2</sub>.

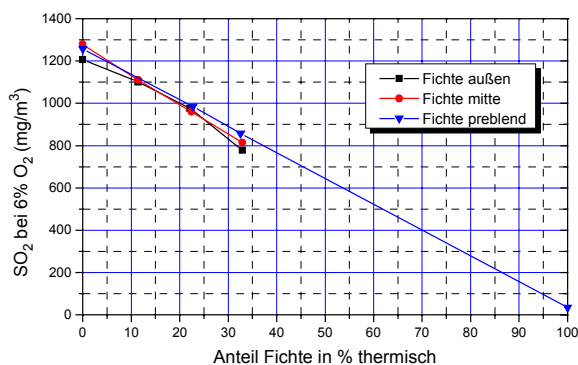


Image N° 7 : Emissions de SO<sub>2</sub> en fonction des pourcentages de biomasse

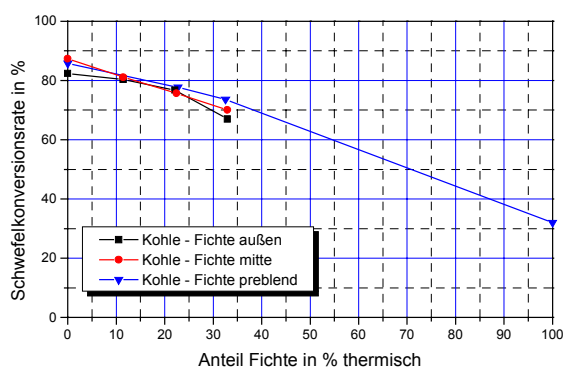


Image N° 8 : Taux de conversion de soufre pour une combustion mélangée biomasse-charbon

Cela a pu être confirmé. Dans l'image n°7, les émissions des SO<sub>2</sub> des flammes mélangées avec épicéa sont proposées pour des différentes configurations de brûleurs. En supplément est inscrite une flamme d'épicéa pur. Avec un pourcentage en augmentation de l'épicéa, les émissions SO<sub>2</sub> diminuent linéairement. Cela est d'une part dû à l'importation faible de soufre par le mélange de combustibles, et d'autre part la disposition de la biomasse à fixer du soufre dans les cendres à travers leurs teneurs en Ca. Cela réduit les émissions de SO<sub>2</sub>.

Dans l'image N° 8 est représenté le taux de conversion de soufre en dessus du pourcentage d'épicéas. Le taux de conversion décrit la relation entre l'émission en SO<sub>2</sub> réelle et l'émission potentielle maximale à partir de la teneur en soufre du combustible. Les différents teneurs en soufre des mélanges sont donc calculés. Le taux de conversion en diminution démontre que l'émission de SO<sub>2</sub> est plus faible que ce que l'on pourrait attendre à partir du soufre entrant parce qu'une partie est fixée dans les cendres. Les configurations de brûleurs n'ont pas d'influence sur les émissions SO<sub>2</sub>.

## 6 Conclusions

Les cultures étudiées comme plantes énergétiques, produites en conduite peu intensive, conviennent plus ou moins en ce qui concerne les rendements en plantes entières. Le colza et les tournesols ont connus les rendements les plus faibles à cause des pertes de grains importantes (jusqu'à perte totale) et ne feront plus l'objet d'études futures. Avec des valeurs calorifiques des différentes biomasses assez proches les unes des autres (à l'exception des plantes oléagineuses) c'est surtout le rendement en plantes entières qui influence le rendement énergétique par hectare.

Le bilan énergétique positif rend intéressant l'utilisation des biomasses solides comme source d'énergie.

La technique de récolte testée pour fourrage non fauché de céréales et d'herbes est propice à l'obtention de produits secs (stockables). Pour le maïs, même avec une récolte tardive, on obtient un produit qui n'est pas stockable longtemps sans séchage.

Lors d'une production des plantes énergétiques supposée sur la jachère, les biomasses agricoles se sont partiellement avérées économiquement concurrentielles vis à vis du fioul.

La combustion en mélange des biomasses dans un dispositif de combustion de charbon en poussière est viable sur l'aspect technique aussi bien que sur l'aspect des émissions.

Pour les plantes énergétiques intéressantes, on doit continuer à tester leur niveau de rendement en fonction du régime de culture, éventuellement des nouvelles techniques de récolte propices ainsi que l'influence sur les teneurs en éléments significatifs pour la technique de combustion du terroir ou de la fertilisation.

## 7 Perspectives

Les biomasses d'origine agricole et forestière vont avoir de plus en plus d'importance comme énergies renouvelables dans le Land Bade-Wurtemberg et en Allemagne. Elles pourraient, par exemple, être utilisées dans des installations spéciales pour biomasse à la production de chaleur ou d'énergie électrique.

On a démontré des possibilité de culture et de combustion.

La rentabilité des biomasses est dépendante des prix des porteurs d'énergie fossile.

## 8 Résumé

Différentes cultures annuelles et pérennes ont été testées pour le rendement en plantes entières, les méthodes de récolte propices à l'obtention d'un produit stockable sans séchage, leur composition élémentaire en vue des aptitudes à la combustion, leur combustion dans des installations adéquates ainsi que pour les aspects économiques. L'ordre des rendements après deux années de cultures état le suivant : maïs > triticale d'hiver > seigle d'hiver > orge d'hiver > seigle de printemps > triticale de printemps > herbes énergétiques > saules > topinambours > colza > tournesols. En analogie aux rendements de matière sèche (à cause des valeurs calorifiques presque identiques de toutes les biomasses à l'exception des plantes oléagineuses) les rendements énergétiques par hectare sont les plus élevés pour le maïs avec 6 000 l d'équivalent de fioul et seulement 3 000 l /ha pour l'herbe énergétique. Avec la mécanisation de récolte utilisée, les plantes entières de céréales, herbes et topinambours peuvent être récoltés dans un état stockable. En prenant en compte l'énergie entrante lors de la culture (jusqu'à la récolte), l'énergie sortante est 13 fois plus élevée que l'entrante pour le triticale d'automne et l'herbe énergétique. Le bilan énergétique est donc nettement positif. Les prix de revient à partir des plantes entières énergétiques ont été compris entre 2,4 et 4,3 Pfg/kWh (année de production 1994) pour les céréales (marge standard 1000 DM/ha) comparé avec le fioul dans les 3,5 Pfg/kWh.

Les biomasses d'origine agricole analysées (de l'année de Production 1994) ont eu des teneurs (par rapport à l'unité d'énergie) moins élevées en soufre, plus ou moins élevées en nitrogène et plus élevées en chlore (à l'exception de topinambour et l'herbe), toujours en comparaison avec le charbon. Les bois ne varient que peu dans leur composition. Leurs teneurs en soufre, nitrogène et chlore sont réduits en comparaison avec le charbon.

L'incinération dans un dispositif de combustion de poussière de charbon est possible. Dans le cadre des essais de combustion, on a testé aussi le taux de moulage optimal pour une complète combustion de la biomasse.

Avec des configurations de brûleurs variées (introduction de l'air de combustion secondaire et tertiaire et du combustible) on a pu atteindre une réduction des émissions de NOx, plus importante pour les bois que pour les biomasses d'origine agricole. En mélange avec du charbon les émissions de NOx diminuent avec un taux de biomasse augmentant. Les émissions de SO2 diminuent de même façon à cause des teneurs en soufre inférieures de la biomasse.