

## Bibliographie

# « La silphie perfoliée »

*Silphium perfoliatum* L.



## 1) Généralités

La silphie perfoliée, *Silphium perfoliatum* L., est une plante herbacée vivace de la famille *Asteraceae*. Elle est, comme toutes les espèces du genre *Silphium*, originaire d'Amérique du nord, et plus précisément des sols humides des plaines et vallées de l'est des Etats-Unis et du sud-est du Canada (Stanford, 1990 ; eFloras, 2008).

### a) Histoire et état actuel des recherches

Le genre *Silphium* aurait été introduit en Europe entre la fin du XVII<sup>e</sup> et le XVIII<sup>e</sup> siècle. Ce genre a été mentionné pour la première fois en Europe en 1762 par Antoine Gouan dans le catalogue du jardin botanique de Montpellier (Stanford, 1990). En effet, plusieurs espèces de ce genre, dont *S. perfoliatum*, ont commencé au XVIII<sup>e</sup> siècle à être utilisées comme plantes ornementales dans les jardins botaniques européens (Krünitz et al., 1831 cités par LTZ, 2016).

Sa culture n'a débuté qu'à partir des années 1950 dans l'ex-URSS, qui était dans ces années à la recherche de nouvelles plantes destinées à l'ensilage pour l'élevage (Sokolov et Gritsak, 1972). La silphie a été identifiée comme la plus intéressante en fourrage parmi 50 autres espèces.

Elle a été expérimentée pour la première fois en France en 1974 par l'INRA de Clermont-Ferrand, puis entre 1977 et 1981 dans 13 sites répartis dans toute la France. Ces essais ont mené à la publication d'un article en 1978 puis en 1981 par C. Demarquilly et M. Niqueux. Elles restent encore aujourd'hui les seules publications scientifiques françaises sur la silphie !

Les difficultés d'implantation et de récolte (Niqueux, 1981) ont fait qu'elle a été jugée moins intéressante que l'ensilage de maïs qui s'est fortement développé dans les années 70 avec l'arrivée des variétés hybrides. Même dans le reste de l'Europe et du monde, elle n'a été que très peu étudiée jusqu'en 2000. Mais depuis 2000 et surtout 2010, de nombreuses publications ont vu le jour, notamment en Allemagne, Pologne, Lituanie, Russie, Chine et aux États-Unis (Fig. 1). Le « Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg » (LTZ Augustenberg), un institut technique agricole allemand, s'y est intéressé depuis le début des années 2010 et continue actuellement à travailler dessus.

Ces études ont montré que la silphie peut être utilisée comme fourrage et comme source d'énergie renouvelable, mais aussi qu'elle présentait des intérêts médicaux et pour la production de miel. Selon plusieurs revues de la littérature, elle pourrait être une excellente alternative au maïs pour la production de biogaz, grâce aux nombreux bénéfices agronomiques et environnementaux qu'elle apporte : biodiversité, santé des sols, qualité de l'eau, attrait des pollinisateurs, stockage de carbone, érosion, phytoremédiation... (Stanford, 1990 ; Gansberger et al, 2015 ; Peni et al., 2020, Cumplido-Marin et al., 2020). Les récentes études ont aussi mené au développement de semences ayant un taux de germination élevé, ce qui a facilité son développement ces dernières années. Les travaux de recherche actuels se

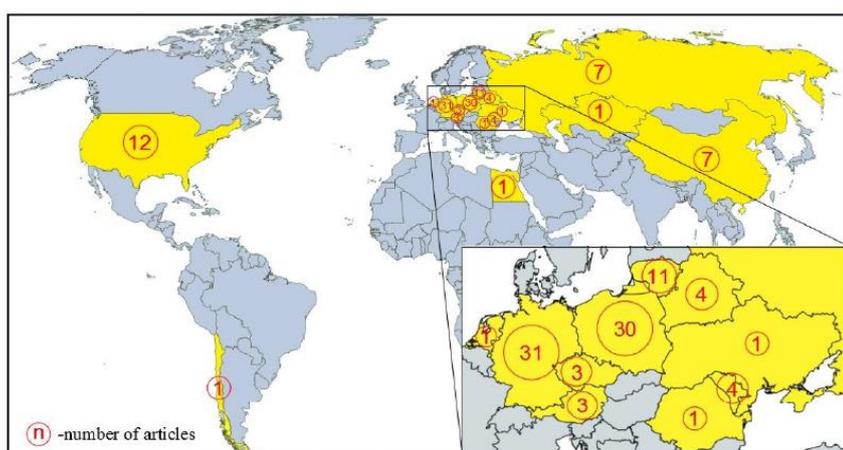


Figure 1: Carte présentant le nombre de publications qui concerne *Silphium perfoliatum* par pays entre 2000 et 2020 (Peni et al., 2020)

concentrent sur la sélection de variétés plus performantes en production de biomasse et rendement en méthane (Von Cossel et al., 2020 ; Wever et al., 2019), ce qui sera nécessaire afin de concurrencer le maïs pour la production de biogaz (Peni et al., 2020).

Cependant, il manque des études démontrant l'intérêt de la silphie en prenant en compte l'ensemble de son cycle de vie et en comparaison d'autres cultures (Peni et al., 2020, Cumplido-Marin et al., 2020), la première datant de 2021 (Bernas et al., 2021). Des connaissances supplémentaires sur la manière de l'intégrer dans les systèmes agricoles, et sur ses conséquences agronomiques et environnementales sur le long terme sont également indispensables. En effet la plupart des études s'arrêtent après seulement 3 années de suivi...

C'est en Allemagne que la culture de la silphie est aujourd'hui le plus développée avec environ 8500 ha en 2020 (Goualan, 2020). En France elle occupait près de 750 ha en 2020 et il y en aurait 3000 en 2021 (Mechekour, 2021).

## b) Biologie

Cette astéracée pérenne, en C3, aurait une durée de vie d'au moins 10 à 15 ans et a pu dépasser 50 ans dans les jardins botaniques (Niqueux, 1981 ; Stanford, 1990).

La première année, la silphie se développe en une rosette (Fig. 2). Des rhizomes courts se forment et portent des bourgeons qui, au printemps suivant, se développent en tiges à section carrée pouvant atteindre 2 m et parfois jusqu'à 3,5 m de haut (Niqueux, 1981 ; Gansberger, 2015 ; LTZ, 2016). Les rhizomes courts continuent à se développer les années suivantes, ce qui augmente le nombre de tiges par pied (10 à 25) et la surface occupée (jusqu'à 1 m de diamètre). Mais le nombre de tiges/m<sup>2</sup> reste stable à environ 38. Ces tiges comportent des feuilles opposées de grande taille (30 x 20 cm). A leur base elles forment une coupelle (Fig. 3) qui sert à accumuler l'eau de pluie et la condensation, d'où le nom de « perfoliée » et « cup plant » en anglais. Les feuilles représentent 40 % de la biomasse aérienne totale juste avant le début de la floraison (Niqueux, 1981).

Le système racinaire, renouvelé en grande partie chaque année, se compose d'un système fasciculé très développé jusqu'à 30 cm de profondeur, mais aussi de longues racines pouvant atteindre et dépasser 1,5 m de profondeur (Fig. 4). Schoo et al., (2016) ont observé des racines jusqu'à 2,4 m. Ces derniers ont aussi montré que la longueur totale des racines par unité de volume de la silphie était comparable au maïs mais inférieure à la luzerne.

Les capitules de fleurs ressemblent à ceux du topinambour, et apparaissent entre fin juin et fin juillet en France. La floraison s'étale alors sur 2 mois jusqu'à fin septembre (Niqueux, 1981 ; LTZ, 2016). Les inflorescences sont des « cymes » qui forment 4 à 6 étages de 2 fleurs (Fig. 5). L'autofécondation ainsi que la pollinisation croisée sont possibles. Du fait de la floraison très étalée, la maturation des graines (Fig. 6) l'est également et dure de fin août à fin septembre en France. Les graines tombent dès



Figure 2 : pied de silphie au stade rosette



Figure 3 : base des feuilles de silphie



Figure 4 : système racinaire d'un pied de silphie



Figure 5 : fleur de silphie



Figure 6 : graines de silphie

leur maturité. Les capitules contiennent 20 à 30 graines (*akènes bruns, elliptiques et plus ou moins aplatis*), d'un PMG allant de 20 à 25 g pour Niqueux, entre 14 et 21 g pour d'autres (*Cumplido-Marin et al., 2020; Gansberger et al., 2015*).

La capacité de germination des graines de silphie est faible, 10 à 20 % selon N.L. Chrestensen, et va dépendre de nombreux facteurs environnementaux (*humidité, températures...*). Pourtant la capacité théorique de germination, c'est-à-dire la proportion de graines considérées comme viables, peut atteindre 98 % (*Gansberger et al., 2017*). Mais cela n'est vrai que pour des graines aux caractéristiques optimales (*maturité, PMG*), ce qui ne peut pas être obtenu sans triage (*Cumplido-Marin et al., 2020*). En effet une partie des akènes sont infertiles à cause d'une absence de graines (*Figas et al., 2016*). Finalement un semis avec des graines naturelles est possible (*Gansberger et al., 2015*) mais provoque une levée très hétérogène.

La présence d'une dormance a donc longtemps fait débat car des levées ont été observées dans de nombreuses conditions différentes. D'après Trölenberg et al. (2012), il n'y aurait pas de dormance mais une grande amplitude de température favoriserait la levée. Mais, des études ont finalement démontré une dormance physiologique (*Von Gehren et al., 2016; Gansberger et al., 2017*). D'après celles-ci la germination peut être favorisée par :

- une solution de  $\text{KNO}_3$ ,
- une solution d'acide gibbérellique ( $\text{GA}_3$ ),
- une période de froid :  $0^\circ\text{C}$  pendant 7 jours,
- une alternance des températures : cycles de  $20\text{-}30^\circ\text{C}$  toutes les 12 h,
- et des cycles d'alternance lumière-obscurité.

Associer ces traitements,  $\text{GA}_3$  + alternance des températures par exemple, permet de se rapprocher du taux de germination théorique (*Fig. 7*). Ces traitements doivent être semblables à ceux actuellement appliqués en usine sur les semences commercialisées.

### c) Génétique

Les travaux de recherche sur la génétique de la silphie sont encore peu nombreux mais sur 5 populations identifiées lors d'une étude, 4 avaient des caractéristiques génétiques et de rendement en biomasse et méthane quasiment identiques. La 5ème, d'origine ukrainienne, a eu un rendement en biomasse inférieur (*Wever et al., 2019*). Il s'agit d'une stratification de la population. Toutes les variétés cultivées aujourd'hui sont issues de ce patrimoine génétique, peu diversifié donc.

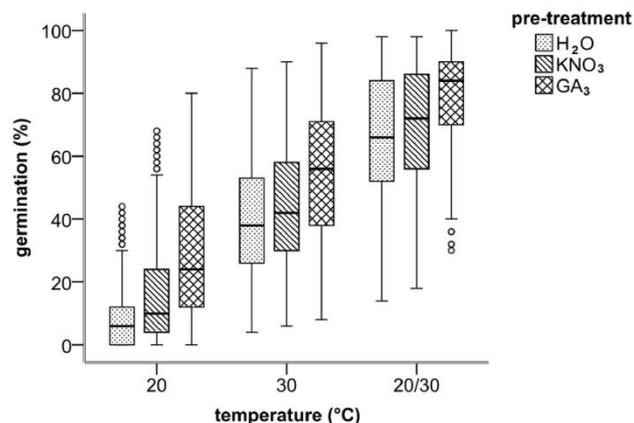


Figure 7 : Effet de différentes températures ( $20^\circ\text{C}$ ;  $30^\circ\text{C}$ ;  $20/30^\circ\text{C}$ ) et de prétraitements ( $\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{KNO}_3$ ;  $\text{GA}_3$ ) sur la germination de *S. perfoliatum* (*Gansberger et al., 2017*)

En Allemagne, une société de sélection et de distribution de silphie a été fondée par des agriculteurs méthaniseurs : Metzler & Brodmann Saaten GmbH. Elle la commercialise sous la marque Donau-Silphie. Le semencier N.L. Chrestensen Erfurter Samen und Pflanzenzucht GmbH sélectionne et commercialise également de la silphie. Ces deux sélectionneurs avancent tous les deux un haut taux de germination, proche de 90 %, grâce à des semences prétraitées en usine.

En France un seul fournisseur a pour le moment l'exclusivité du marché des semences certifiées de silphie : le négoce HADN. Il commercialise la variété ABICA PERFO sous la marque Silphie-France. Cette variété est issue de la collaboration avec un semencier allemand.

## **d) Exigences pédoclimatiques**

### **➤ Exigences pédologiques**

La silphie est capable de s'adapter à diverses conditions pédoclimatiques. Dans ses régions d'origine, le climat est continental mais assez humide. Les conditions idéales sont d'après Stanford (1990), un sol sableux avec une bonne alimentation en eau, des températures autour de 20°C, et un bon ensoleillement. Les sols à pH très acides inférieurs à 5 semblent être à éviter (Cumplido-Marin et al., 2020 ; N.L. Chrestensen, 2019). Certains indiquent un pH optimal neutre à légèrement acide (LTZ, 2016) et d'autres neutre à légèrement basique (Silphie-France). De plus, la silphie est capable de produire beaucoup de biomasse dans les sols saturés en eau, et de résister à des inondations hivernales, voire d'en profiter (Cumplido-Marin et al., 2020). Les sols sablonneux avec peu de précipitations ne sont en revanche pas conseillés (N.L. Chrestensen, 2019).

### **➤ Besoins en températures**

Sokolov et Gritsak (1972) indiquent une température de développement optimale de 10 à 15 °C (cités par Niqueux, 1981). D'après le LTZ, les besoins en températures s'établiraient à 0,13°C /kg MS pour un rendement de 19,6 t MS/ha, soit 2548 DJ sur la période début avril à fin août. Les essais menés en France indiquent qu'elle peut se développer davantage dans les régions chaudes que dans les zones plus froides de montagne, si elle est correctement alimentée en eau. Par contre Schoo et al. (2017) ont montré que dans les zones froides et humides, la silphie peut produire davantage de biomasse que le maïs comme c'est une plante en C3. En effet les plantes en C3 ont un optimum thermique plus faible que celles en C4 pour se développer. Pour le sélectionneur N.L. Chrestensen elle est cultivable à des altitudes supérieures à 700 m et avec des températures moyennes annuelles inférieures à 6°C. Le zéro de végétation n'est pas précisé dans la littérature mais nous pouvons supposer qu'il est de 0°C.

Ses rhizomes seraient capables de résister à des températures de -30°C sans neige (Niqueux, 1981). Les jeunes feuilles du printemps résisteraient très bien à -5°C. Quant aux températures élevées, elles pourraient provoquer un dessèchement rapide des plantes en situation de stress hydrique et d'air sec.

### **➤ Besoins en eau**

La silphie possède un système racinaire très développé, mais la longueur de racines ne serait qu'équivalente à celle du maïs et inférieure à celle de la luzerne. Par conséquent cette dernière a une capacité d'extraction de l'eau significativement supérieure à la silphie. Schoo et al. (2016) ont fait état d'une efficacité d'utilisation de l'eau équivalente à la luzerne (33 kg MS/ha/mm) mais inférieure au maïs (50 kg MS/ha/mm). La silphie possède par contre une évapotranspiration potentielle très élevée, ce qui pourrait lui permettre d'atteindre des rendements comparables à ceux du maïs lorsqu'elle n'est pas limitée en eau (Schoo et al., 2016). Niqueux avait signalé, en France, des rendements très variables en fonction de l'alimentation en eau durant la période estivale. Selon Grebe et al. (2012), la silphie aurait

des besoins en eau annuels de 400 à 500 mm, dont 200 à 250 durant la période de développement, ce qui est similaire au maïs. D'après le LTZ, les besoins en eau seraient de 260 l/kg MS pour atteindre 20 t MS/ha, donc environ 500 mm sur toute la période de croissance. La distribution de l'eau en fonction des besoins influence également la production de biomasse.

Selon plusieurs auteurs allemands, la forme des feuilles en coupelle permettraient à la silphie de mieux résister aux périodes de sécheresse, mais selon d'autres cela est peu probable car une épaisse couche de cire protège des pertes par diffusion (LTZ, 2016). Ces feuilles n'agiraient que comme une barrière contre les insectes venant du sol, et d'abreuvoir pour les pollinisateurs.

## 2) Quel itinéraire technique ?

### a) Rotation des cultures

La silphie s'implante au printemps et n'a pas d'exigence particulière par rapport au précédent cultural. Seuls le tournesol, le colza et le haricot sont à éviter à cause d'un risque sclérotinia (LTZ, 2016 ; N.L. Chrestensen, 2019). Par contre son installation est très lente, donc il conviendra de favoriser des parcelles propres.

### b) Mise en place

#### ➤ Préparation du sol

Il est conseillé d'effectuer un labour à l'automne avant une préparation fine du lit de semence au printemps. Cette préparation doit aussi permettre de maîtriser le plus possible les adventices (*faire plusieurs passages à 3-5 cm*) sans assécher le sol. Ce dernier ne doit pas être trop meuble au moment du semis et peut donc être roulé si besoin (N.L. Chrestensen, 2019).

#### ➤ La plantation

Jusqu'au début des années 2010, seule la plantation garantissait une mise en place réussie de la culture. Mais son coût très élevé (*compter 0,10-0,12 €/plant*) est une des raisons de l'abandon de la culture de cette plante. La plantation peut se faire de mi-mai à début juin, avec une planteuse à légumes en visant une densité de peuplement de 3 à 4 plants/ m<sup>2</sup> (*rangs de 50 à 75 cm*). 4 plants/m<sup>2</sup> serait la situation la plus productive (Gansberger et al., 2015 ; LTZ, 2016). Bury et al. (2020) sont arrivés à la conclusion que le semis était préférable à la plantation pour son coût moins élevé et sa meilleure production de biomasse.

#### ➤ Le semis

Pour le semis, des semoirs de précision standards peuvent être utilisés avec un réglage adapté à la graine (Schäfer et al., 2015). N.L. Chrestensen préconise d'utiliser un disque perforé en 2,1 mm, Schäfer (2015) en 2,2 mm. La profondeur conseillée varie dans la littérature entre 10 et 20 mm, en raison de son pouvoir germinatif faible. Schäfer et al. ont conclu à une meilleure levée à une profondeur de 15 mm que 10. Une faible profondeur garantie une levée rapide mais les graines seraient plus exposées au dessèchement si l'alimentation en eau n'est pas suffisante. Ce semis peut se faire à partir de mi-avril à fin mai en France (CA Alsace, 2019).

La densité de semis avec des graines prétraitées doit être d'environ 8 à 12 graines/m<sup>2</sup>, soit 2,5 kg/ha, d'après le LTZ. Selon Silphie-France il faut viser 3 kg/ha. Et N.L. Chrestensen conseille 15 à 18 graines/m<sup>2</sup>, soit 2,5 à 3 kg/ha. Concernant l'utilisation de graines naturelles, la densité de semis se situerait de 6 kg (Niqueux, 1981) à 15-20 kg/ha (Gansberger et al., 2015). L'écartement optimal semble

être de 50 cm, bien qu'il soit possible de semer entre 15 et 75 cm d'après la littérature (LTZ, 2016 ; N.L. Chrestensen, 2019 ; Schäfer et al., 2015 ; Gansberger et al., 2015).

Il est possible de semer la silphie en association avec du maïs, si l'eau est disponible en quantité suffisante pour les deux cultures. Il est conseillé de semer un maïs précoce à port dressé, et à ½ dose, afin de ne pas trop défavoriser le développement de la silphie (LTZ, 2016). Cette association a l'avantage de participer à la réduction de l'enherbement la 1ère année, et également de permettre une « demi-récolte » alors que la silphie ne produit rien la 1ère année.

Même si le semis a un coût largement inférieur à la plantation, il reste tout de même conséquent en s'établissant autour de 1600-1800 €/ha (CA Alsace, 2019 ; Mechekour, 2021). Cet investissement est donc un facteur très limitant pour le développement de cette culture. Il faudrait également ajouter à ce coût la perte de chiffre d'affaires liée à la demi-récolte de maïs voire à l'absence de récolte l'année du semis. Par ailleurs l'implantation de la silphie peut ne pas réussir ou ne pas être optimale, à cause d'une mauvaise gestion de l'enherbement, de mauvaises conditions de levée (*sec*), ou d'un sol finalement peu adapté (*trop acide*) par exemple.

### c) Désherbage

La gestion de l'enherbement de la silphie est déterminante pour la réussite de son implantation. En effet elle se développe très lentement et se fait très facilement concurrencée par les adventices avant d'atteindre le stade de rosette à l'automne. Il est conseillé d'associer désherbage chimique et mécanique.

En Allemagne, des herbicides à base de pendiméthaline sont autorisés. Il est recommandé une dose de 3,5 l/ha de Stomp Aqua (= *Atic Aqua*) en pré-levée (N.L. Chrestensen, 2016 ; LTZ, 2016). D'autres molécules seraient tolérées par la silphie : Ethofumesate, Pyridate, Clethodium, Fluzafop-P. Cependant, en France, aucune n'est autorisée. La seule possibilité est donc un traitement au glyphosate avant mise en culture. Concernant le désherbage mécanique, il faut penser à adapter l'écartement pour le passage d'une bineuse. Les possibilités d'utilisation de la herse étrille n'ont pas été étudiées.

A partir de la 2<sup>ème</sup> année aucun désherbage n'est nécessaire, chimique ou mécanique. Le développement de la silphie au début du printemps suffit pour étouffer les adventices.

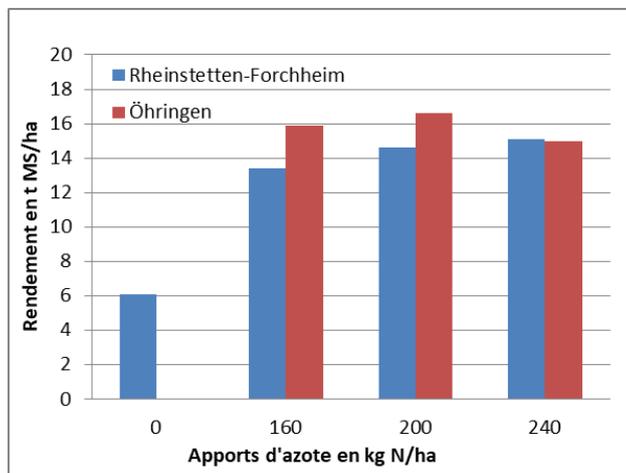
### d) Fertilisation

La fertilisation azotée de la silphie a fait l'objet de plusieurs études en Europe ces dernières années. Pour les autres éléments minéraux (*P, K, Mg, Ca*) quelques études en ont mesuré les exportations. Le tableau 1 ci-dessous présente les résultats d'analyses de 2 études, et les valeurs présentes dans les Tables INRA de la valeur des aliments (*données issues des études de Demarquilly et Niqueux*). En comparaison du maïs, la silphie semble contenir, et donc exporter, beaucoup plus de calcium (*5 à 10 fois plus*), plus de magnésium et un peu plus de potassium.

Tableau 1 : Concentrations en N, P, K, Mg, Ca de la silphie et du maïs, parties aériennes, selon plusieurs études, en g/kg MS

| Concentrations en g/kg MS | Lunenberg et Hartmann, 2016 | LTZ, 2016 | Baumont et al, 2018 (Tables INRA)  |                        |
|---------------------------|-----------------------------|-----------|------------------------------------|------------------------|
| Culture et stade          | Silphie, 26-28 % MS         | Silphie   | Silphie, début floraison 11,5 % MS | Maïs ensilage, 25 % MS |
| <b>N</b>                  | 8,1                         | 9,0       | 17,1 (ferti N importante)          | 12,8                   |
| <b>P</b>                  | 2,1                         | 1,7       | 2,7                                | 1,8                    |
| <b>K</b>                  | 14,1                        | 19        | 15                                 | 10                     |
| <b>Mg</b>                 | 3,9                         | 3,0       | 2,5                                | 1,2                    |
| <b>Ca</b>                 | 22                          | 19        | 9,8                                | 2                      |

D'après la littérature la silphie possède un bon potentiel de rendement pour une fertilisation azotée raisonnable, inférieure au maïs. La quantité à apporter dépendra de l'objectif de rendement, mais pour N.L. Chrestensen les besoins de la plante s'élèvent à environ 9 kg N/tMS produite. Ils conseillent un apport annuel de 120 à 150 kg N/ha. Le LTZ Augustenberg annonce des besoins de 150 à 200 kg/ha, excepté pour l'année d'implantation où 50 à 80 kg/ha sont suffisants, auxquels il faut déduire les fournitures du sol. Leurs résultats



**Figure 8** : Rendements moyens sur 3 années d'essais, en t MS/ha de *Silphium perfoliatum* en fonction de différentes fertilisations azotées, et pour 2 emplacements (d'après LTZ Augustenberg, 2016)

montrent que des apports supérieurs à 200 kg N/ha ne permettent pas d'augmenter significativement le rendement (Fig. 8). Gansberger et al. avaient déjà signalé en 2015 dans leur revue une plus forte augmentation du rendement jusqu'à 100 kg N/ha. De même parmi les études recensées par Cumplido-Marin et al. en 2020, les doses conseillées vont de 100 à 150 kg/ha.

Ces apports doivent être faits au début du printemps, entre fin mars et fin avril. Cela peut être de la fertilisation minérale mais aussi du digestat ou du lisier (CA Alsace, 2019).

Pour les autres éléments minéraux voici ce qui est conseillé comme apports (minéraux ou organiques) annuels pour compenser les exportations de 15 t MS/ha de silphie (Conrad et al., 2009 ; N.L. Chestensen, 2016 ; CA Alsace, 2019) :

- P : 25-30 kg/ha
- K : 200-250 kg/ha
- Mg : 50-70 kg/ha
- Ca : 200-300 kg/ha

## e) Gestion des maladies et ravageurs

Globalement la littérature fait état d'un état sanitaire très bon. Pour les maladies, en cas de temps humide *Sclerotinia sclerotiorum* peut toucher les tiges de silphie, et *Botrytis cinerea* peut s'observer sur les capitules (Niqueux, 1981 ; LTZ, 2016). Des tâches foliaires bactériennes, de *Pseudomonas syringae* (Fig. 9), peuvent apparaître notamment au début de l'été (LTZ, 2016). Une étude autrichienne a fait l'état d'une nouvelle espèce de champignon pouvant se trouver sur la silphie : *Ascochyta silphii* sp. Nov. (Bedlan, 2014).



**Figure 9** : *Pseudomonas syringae* sur feuilles de silphie

Concernant les ravageurs, plusieurs espèces ont été identifiées dans la littérature mais aucune ne fait état d'un impact significatif sur la production de biomasse. Gansberger et al. (2015) citent des papillons nocturnes (*Autographa gamma*, *Amphipyra tragoponis*, *Hecatera bicolorata*), une larve de pyrale (*Eucosma giganteana*), une larve de coléoptère (*Mordellisteba cf. aethipos* Smith), un puceron (*Uroleucon cf. ambrosiae*), une guêpe parasitoïde (*Acanthocaudus n.sp.*), et une mouche des fruits (*Neotephritis finalis*). *Eucosma giganteana* serait le ravageur le plus impactant mais il ne se trouve pas en Europe.

## f) Récolte

La récolte est possible à partir de l'année suivant celle de l'implantation. Elle se fait la plupart du temps par ensilage, comme pour le maïs, avec des ensileuses conventionnelles, à une hauteur de 5-10 cm (Niqueux, 1981). L'idéal serait d'avoir une barre de coupe directe équipée de coupe-bordures (CA Alsace, 2019). Une fauche avant ensilage ou pour un affouragement en vert sont aussi praticables.



Figure 10 : parcelle de silphie fin septembre

La mise en pâturage ne serait à priori pas envisageable car les piétinements pourraient détruire les bourgeons au niveau des rhizomes. Il est possible de faire 1 à 2 récoltes par an. Une 3<sup>ème</sup> affaiblirait trop la plante avant l'hiver (Niqueux, 1981).

### ➤ Cas d'une simple récolte

La période optimale semble être entre fin août et début septembre en Allemagne et en Alsace, au stade mi-floraison (LTZ, 2016 ; CA Alsace, 2019). Une récolte trop tardive entraînerait une chute de rendement à cause de la sénescence des feuilles, ainsi qu'une perte de capacité à s'ensiler. La plante est alors à 25-28 % de matière sèche. Cette simple récolte a l'avantage de laisser la silphie arriver à floraison ce qui présente un intérêt écologique. Pour un débouché méthanisation, c'est cette technique qui est la plus adaptée.

### ➤ Cas d'une double récolte

Les périodes de récoltes optimales sont d'après Gansberger et al., (2015), le stade bouton pour la 1<sup>ère</sup> coupe, puis en septembre pour la 2<sup>ème</sup>. La teneur en MS au stade bouton est d'environ 12-14 % (Niqueux, 1981). La double récolte sera plus adaptée pour la production de fourrage.

Pichard a montré en 2012 qu'une seule récolte produisait plus de biomasse que 2 récoltes. Par contre les valeurs fourragères deviennent de moins en moins intéressantes (en énergie, protéines, digestibilité...) une fois le stade végétatif dépassé (Niqueux, 1981 ; Pichard, 2012).

## 3) Quel potentiel de rendement ?

### ➤ Dans le monde

La littérature fait état d'une grande variation de rendement en fonction des contextes pédoclimatiques, de la date de récolte et de l'itinéraire technique. Le rendement moyen obtenu par les études recensées dans la revue de Peni et al. (2020) est de 13,3 t MS/ha. Mais les valeurs sont hétérogènes, en allant de moins de 5 t à plus de 25 (Fig. 11). Le LTZ Augustenberg conclut à un rendement possible de 7 à 20 t MS/ha, pour une moyenne de 13-14 t MS/ha.

L'importance de la disponibilité en nutriments et de l'alimentation en eau est confirmée par la littérature. Elles sont déterminantes afin d'obtenir des rendements élevés (Hartmann et Lunenberg, 2016 ; Peni et al., 2020). En comparaison du maïs ensilage, la silphie semble être capable d'atteindre des rendements équivalents dans certains contextes pédoclimatiques et parfois supérieurs (Ustak et Munoz, 2018). Mais en moyenne elle aurait des rendements 20 % inférieurs (LTZ, 2016 ; Gansberger et al., 2015). Cette différence est donc certainement très variable en fonction des conditions pédoclimatiques, qui seront plus adaptées soit à la silphie soit au maïs. Concernant l'alimentation en eau, des essais

comparant silphie, maïs, et luzerne avec et sans irrigation ont été mis en place en 2013 et 2014 en Allemagne. Schoo et al. (2016) y ont observé en moyenne un rendement de silphie inférieur de 33 % en situation « sec » par rapport à la situation « irrigué » (10,8 contre 16,1 t MS/ha). Cette valeur était de 18 % pour le maïs (17,7 contre 21,7 t MS/ha) et 14 % pour la luzerne (12,2 contre 14,2 t MS/ha).

### ➤ En France métropolitaine

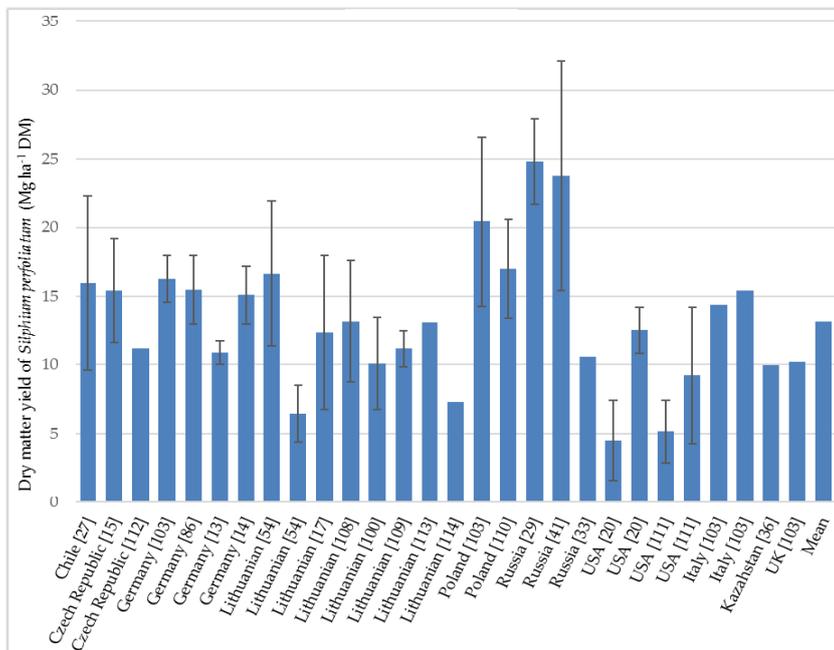
La Chambre d'agriculture d'Alsace (2019) signale un rendement de 13 à 18 t MS/ha en fonction du type de sol.

Les essais conduits en France par l'INRA entre 1977 et 1981 ont quant à eux permis d'atteindre 16 t MS/ha en moyenne, avec **2 récoltes**. Pour un même site ils semblent relativement stables chaque année (Tab. 2). Les zones du sud de la France semblent pouvoir atteindre avec irrigation un rendement régulièrement à 20 t MS/ha (stations de Montpellier, Toulouse et St-Martin de Hinx). Il faut néanmoins préciser que la fertilisation dans ces essais était assez élevée (400 à 500 kg N/ha, 200 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 500 à 700 kg K<sub>2</sub>O).

**Tableau 2 :** Rendements moyens en t MS/ha de *Silphium perfoliatum* obtenus dans les essais menés en France entre 1977 et 1981, avec 2 récoltes (Niqueux, 1981)

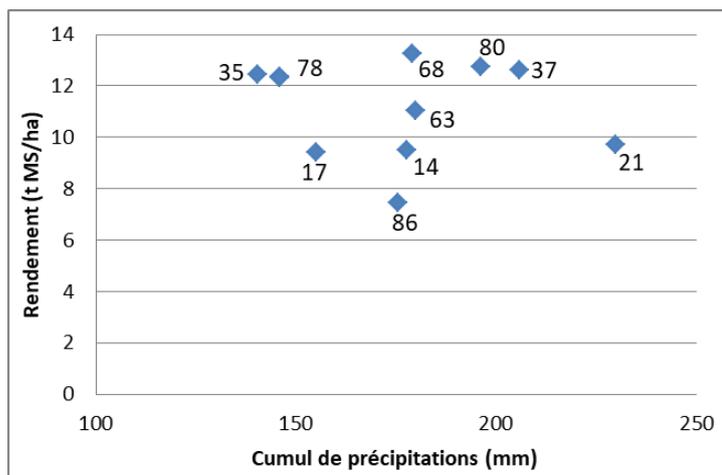
| Lieu                       | Année de semis | 1978     |          |         | 1979     |          |         | 1980     |              |         |
|----------------------------|----------------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|--------------|---------|
|                            |                | 1e coupe | 2e coupe | T année | 1e coupe | 2e coupe | T année | 1e coupe | 2e(3e) coupe | T année |
| CHANGINS(Suisse)           | 1977           | 10.9     | 5.9      | 16.8    | 10.2     |          |         | 6.9      | 3.9          | 11.4    |
|                            | 1978           |          |          |         | 9.3      | 2.1      | 11.4    | 10.6     | 5.0          | 16.1    |
| CLERMONT-FD(63)            | 1976           | 6.9      | 3.0      | 9.9     | 9.8      | 3.4      | 13.2    | 11.5     | 5.3          | 16.8    |
|                            | 1978           |          |          |         | 12.4     | 6.8      | 19.3    | 14.6     | 6.3          | 20.9    |
| COLMAR (68)                | 1977           | 13.8     | 7.6      | 21.4    | 10.2     | 6.0      | 16.2    | 15.8     | 5.6          | 21.4    |
| DIJON (21)                 | 1977           | 6.6      | 3.3      | 11.9    | 8.2      | 3.3      | 11.5    | 12.4     | 2.9          | 15.3    |
| GRIGNON (78)               | 1977           | 14       | 3        | 17      | 14.3     | 3.4      | 17.7    | 8.8      | 6.8          | 15.4    |
| LA MINIERE (78)            | 1977           | 13.5     | 4.8      | 18.3    | 11.3     | 4.5      | 15.8    | 12.1     | 5.2          | 17.3    |
| LE ROBILLARD(14)           | 1978           |          |          |         | 9.0      | 3.6      | 12.6    | 10.0     | 3.5          | 13.5    |
| LUSIGNAN (86)              | 1977           | 9.8      | 2.3      | 12.1    | 5.4      | 2.3      | 7.7     | 7.2      | 1.9          | 9.1     |
| MONTPELLIER(34)            | 1977           | 11.2     | 5.7      | 16.9    | 15.5     | 4.5      | 20.0    | 15.7     | 4.5          | 20.2    |
| PERONNE (80)               | 1977           | 8.7      | 5.3      | 14.0    | 14.0     | 6.8      | 20.8    | 15.5     | 7.5          | 23.0    |
| RENNES (35)                | 1977           | 13.5     | 2.9      | 16.4    | 11.8     | 5.2      | 17.0    | 12.4     | 4.8          | 17.2    |
| ST LAURENT DE LA PREE (17) | 1977           | 7.9      | 9.9      | 17.8    | 9.1      | 0        | 9.1     | 11.2     | 1.5          | 12.7    |
| ST MARTIN DE HINX (40)     | 1977           | 10.7     | 11.2     | 21.9    |          |          |         |          |              |         |
| TOULOUSE (37)              | - sec          | 12.2     | 5.8      | 18.0    | 10.7     | 4.5      | 15.2    | 15.0     | 4.8          | 19.8    |
|                            | - irrigué      | 12.2     | 6.2      | 18.4    | 10.7     | 8.9      | 19.6    | 16.2     | 6.2          | 22.4    |

La mise en relation de ces rendements avec les précipitations montre que pour la 1<sup>ère</sup> coupe, qui a lieu entre mi-juin et début juillet, les pluies du printemps seraient toujours suffisantes pour que la silphie atteigne son potentiel de rendement (Fig. 12). Le rendement de la 2<sup>ème</sup> coupe par contre semble plutôt dépendant des précipitations de juillet-août (Fig. 13). Il faudrait néanmoins préciser ces résultats avec des données climatiques et d'itinéraires techniques plus précises. En comparaison du maïs la littérature ne semble pas attribuer à la silphie une meilleure tolérance à la sécheresse, mais sa période de développement fait qu'elle a déjà produit une grande partie de sa biomasse avant le

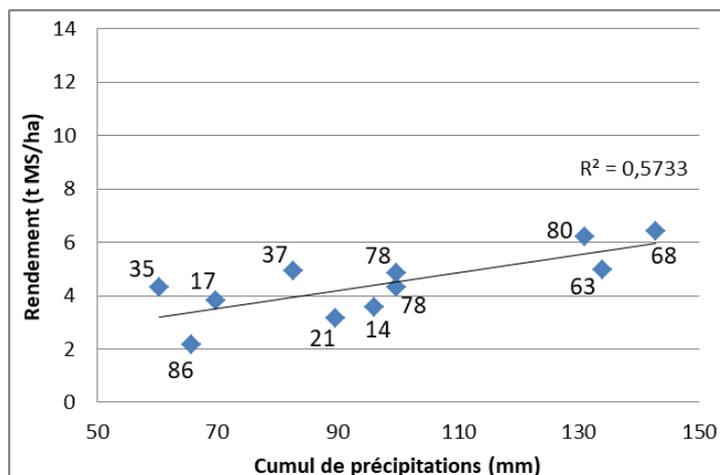


**Figure 11 :** Rendements moyens en t MS/ha de *Silphium perfoliatum* obtenus par différentes études de différents pays, tous facteurs confondus. Les barres d'erreurs montrent les valeurs minimales et maximales. (Peni et al., 2020)

début de l'été. Un rendement minimum d'environ 10-12, voire 14 t MS/ha quelle que soit la pluviométrie estivale semble donc envisageable. Mais pour atteindre de hauts rendements, 18-20 t MS/ha, des précipitations estivales importantes ou une irrigation seront probablement nécessaires.



**Figure 12 :** Rendements moyens en T MS/ha de la 1<sup>ère</sup> coupe obtenus sur les 3 années pour 11 stations (Niqueux, 1981), en fonction du cumul de précipitations d'avril à juin (données de stations départementales disponibles sur Meteociel.fr)



**Figure 13 :** Rendements moyens en T MS/ha de la 2<sup>ème</sup> coupe obtenus sur les 3 années pour 11 stations (Niqueux, 1981), en fonction du cumul de précipitation sur juillet-août (données de stations départementales disponibles sur Meteociel.fr)

D'après les sélectionneurs, la silphie est mise en place pour une durée d'au moins 10 ans. Mais il faut signaler qu'il n'apparaît pas, dans la littérature récente, d'expérimentations, avec un suivi de rendement en biomasse, faites sur une aussi longue durée. La plus longue s'arrête à 7 ans, mais des simulations faites avec le modèle PIXGRO (Ruidisch et al., 2015) prédisent un rendement similaire sur plus de 10 ans (Cumplido-Marin et al., 2020). D'après Niqueux (1981) la bonne stabilité du nombre de tiges par m<sup>2</sup> sur 5 ans montre qu'une certaine stabilité du rendement est certainement possible sur 15 ans.

## 4) Quelles utilisations ?

### a) Méthanisation

Le potentiel méthanogène de la silphie a fait l'objet de plusieurs études principalement en Allemagne. Le LTZ Augustenberg a conclu, à partir de la teneur en nutriments et de coefficients de digestibilités, à un rendement de 260 à 270 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t MS. La revue bibliographique de Peni et al. (2020) fait état d'un rendement allant de 232 à 321 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t MS, mais la majorité des valeurs se situe entre 260 et 280. La littérature semble s'accorder sur le fait que le maïs a un potentiel méthanogène supérieur, de 5 à 10 % pour Ustak et Munoz (2018). Cela s'expliquerait notamment par la teneur en lignine 2 fois supérieure de la silphie. Un prétraitement mécanique (*broyage*) ou enzymatique pourrait aider cette dégradation mais cela reste encore à étudier (LTZ, 2016 ; Von Cossel, 2020). Par ailleurs il est possible que cette teneur en fibres élevée puisse poser des problèmes de couches flottantes dans le méthaniseur.

Pour une même surface, en comparaison du maïs, la silphie semble produire moins de biométhane (Gansbeger et al., 2015 ; LTZ, 2016 ; Von Cossel, 2020 ; Peni et al., 2020). Cela s'explique à la fois par un rendement biomasse généralement inférieur et un potentiel méthanogène inférieur également. En Allemagne, les besoins en surfaces pour produire du biométhane à partir de silphie plutôt que de maïs seraient donc augmentés de 20 % (LTZ, 2016). Ces résultats sont néanmoins à nuancer sur le fait que les rendements en biomasse de la silphie pourraient dans certains contextes pédo-climatiques

être équivalents voire supérieurs. De plus, des progrès dans la sélection de variétés plus productives sont possibles à l'avenir.

## b) Fourrage

Très peu de références existent sur l'utilisation de la silphie en tant que fourrage. L'étude de l'INRA entre 1977 et 1981 a permis son enregistrement dans les Tables de valeurs des aliments (Tab. 3). Niqueux concluait en 1981 à une valeur alimentaire correcte et à une bonne appétibilité. Mais il conseillait de l'utiliser en affouragement en vert car elle ne serait pas adaptée à l'ensilage (teneur en glucides solubles insuffisante, faible teneur en MS, teneur élevée en cendres, conservation mauvaise sans acide formique).

**Tableau 3 :** Composition et valeur alimentaire de *Silphium Perfoliatum* (INRA Clermont-Ferrand, 1977 cité dans Niqueux, 1981)

| N° du cycle   | Date      | Stade de végétation                     | % M.S. | Composition chimique % M.S. |      |      | Coefficient de digestibilité |      |          | Valeur nutritive par kg M.S. |        |            | Matière sèche ingérée (g/kg Po <sup>75</sup> ) | Production/ha |        |             |  |
|---|-----------|---|--------|-----------------------------|------|------|------------------------------|------|----------|------------------------------|--------|------------|--|---------------|--------|-------------|--|
|   |           |   |        | Cen-dres                    | M.A. | C.B. | M.O.                         | M.A. | C.B. (l) | U.F.L. (l)                   | U.F.V. | M.A.D. (g) |  | M.S. (t)      | U.F.L. | M.A.D. (kg) |  |
| 1   | 12/6-18/6 | Hauteur 140-170 cm                      | 10,0   | 15,0                        | 14,7 | 21,7 | 72,0                         | 72,7 | 62,0     | 0,81                         | 0,75   | 106        | 78,1   | 9,3           | 7.530  | 1.140       |  |
| 1   | 19/6-25/6 | Début boutons ....                      | 10,1   | 14,5                        | 13,2 | 25,0 | 65,6                         | 67,3 | 53,4     | 0,71                         | 0,64   | 89         | 79,6   | 10,9          | 7.739  | 970         |  |
| 1   | 26/6-1/7  | Boutons bien formés                     | 10,1   | 15,2                        | 12,1 | 27,5 | 62,3                         | 65,9 | 46,8     | 0,65                         | 0,57   | 80         | 65,2   | 12,0          | 7.800  | 960         |  |
| 1   | 3/7-8/7   | Premières fleurs ....                   | 11,5   | 13,0                        | 10,7 | 28,0 | 62,1                         | 63,8 | 45,4     | 0,66                         | 0,58   | 68         | 60,0   | 14,4          | 9.504  | 980         |  |
| 2   | 4/9-9/9   | Repousses du 1/7<br>Age moyen : 68 j... | 11,2   | 15,7                        | 13,7 | 21,7 | 69,2                         | 66,1 | 57,8     | 0,75                         | 0,69   | 91         | 72,8   | 4,5           | 3.380  | 410         |  |
| Ensilages réalisés le 1 <sup>er</sup> juillet sur le premier cycle.                           |           |   |        |                             |      |      |                              |      |          |                              |        |            |  |               |        |             |  |
| Sans conservateur .....   |           |   | 13,4   | 11,1                        | 11,6 | 32,3 | 59,9                         | 59,3 | 47,3     | 0,63                         | 0,54   | 69         | 47,5   |               |        |             |  |
| Avec acide formique (5 l/t) .....   |           |   | 14,9   | 11,3                        | 12,8 | 28,9 | 60,8                         | 62,4 | 47,7     | 0,65                         | 0,57   | 80         | 64,2   |               |        |             |  |
| Ensilage réalisé le 8 septembre sur le deuxième cycle (repousses du 1 <sup>er</sup> juillet). |           |   |        |                             |      |      |                              |      |          |                              |        |            |  |               |        |             |  |
| Avec acide formique (5 l/t) .....   |           |   | 12,9   | 13,0                        | 13,7 | 22,6 | 64,0                         | 59,7 | 49,7     | 0,69                         | 0,62   | 81         | 60,3   |               |        |             |  |

(1) La valeur énergétique a été calculée en supposant que l'énergie brute de la plante de silphium était identique à celle des graminées de même composition.

Une étude au Chili s'est aussi intéressée aux valeurs fourragères de la silphie (Pichard, 2012). Selon lui il faut que la silphie soit encore au stade végétatif pour que sa valeur alimentaire soit intéressante pour l'élevage (Tab. 4). Elle pourrait être intéressante comme ressource alimentaire complémentaire lors des sécheresses estivales.

**Tableau 4 :** Effet du stade phénologique sur la composition chimique et la digestibilité des feuilles et tiges de *S. perfoliatum*. (Pichard, 2012)

S1 = stade végétatif 80 cm de haut, S2 = stade végétatif 100 cm de haut, S3 = stade bouton, S4=floraison 10 %, S5 = 50 % floraison, S6 = stade graines. ADIN = Acid Detergent Insoluble Nitrogen. NDF = Neutral detergent Fiber. ADF = Acid Detergent Fiber. CW = Cell Wall

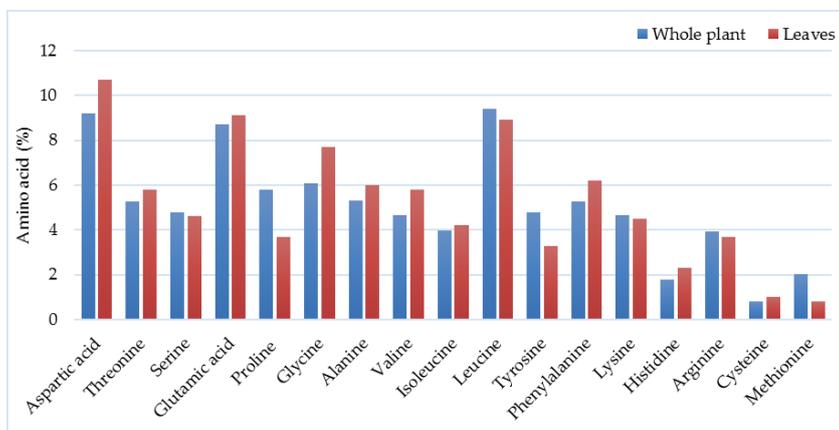
| Stages <sup>1</sup>                     | Leaves |     |     |     |     |     | Stems |     |     |     |     |     |
|---|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
|   | S1     | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  | S1    | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  |
| Dry matter, g DM kg <sup>-1</sup>       | 139    | 136 | 146 | 182 | 197 | 221 | 93    | 108 | 130 | 169 | 210 | 239 |
| Ash, g DM kg <sup>-1</sup>              | 148    | 145 | 145 | 138 | 157 | 150 | 95    | 80  | 71  | 52  | 50  | 42  |
| Crude protein, g DM kg <sup>-1</sup>    | 200    | 162 | 151 | 127 | 127 | 108 | 52    | 43  | 34  | 25  | 26  | 15  |
| Soluble N, g kg total N <sup>-1</sup>   | 134    | 104 | 141 | 168 | 281 | 291 | 179   | 261 | 241 | 175 | 293 | 167 |
| ADIN, g kg total N <sup>-1</sup>        | 26     | 24  | 19  | 19  | 20  | 17  | 63    | 77  | 74  | 80  | 85  | 113 |
| NDF, g DM kg <sup>-1</sup>              | 300    | 264 | 246 | 242 | 244 | 234 | 525   | 557 | 604 | 589 | 612 | 600 |
| ADF, g DM kg <sup>-1</sup>              | 247    | 252 | 232 | 220 | 237 | 217 | 468   | 486 | 515 | 506 | 523 | 525 |
| Lignin, g DM kg <sup>-1</sup>           | 68     | 82  | 42  | 55  | 49  | 48  | 85    | 86  | 88  | 85  | 106 | 93  |
| CW Digestibility, g DM kg <sup>-1</sup> | 891    | 904 | 885 | 922 | 825 | 783 | 619   | 514 | 456 | 370 | 300 | 227 |
| DM Digestibility, g DM kg <sup>-1</sup> | 838    | 839 | 843 | 852 | 828 | 820 | 671   | 600 | 543 | 500 | 443 | 407 |

Plusieurs solutions ont été envisagées pour réduire les inconvénients de la silphie : (Niqueux, 1981 ; Gansberger, 2015 ; Von Cossel, 2020)

- Préfaucher avant ensilage pour augmenter le taux de MS
- Stocker la silphie en mélange avec de l'ensilage de maïs, de blé ou d'avoine
- Incorporer des matières absorbantes comme les pulpes
- Ajouter des conservateurs, comme l'acide formique.

Ces solutions sont aussi valables lorsque la silphie ensilée est destinée à la méthanisation.

Deux autres études se sont intéressées à la composition chimique de la silphie, notamment en éléments minéraux, métaux lourds et acides aminés. Peni et al. (2020) ont agrégé leurs résultats sur les acides aminés (Fig. 14).



**Figure 14** : Proportion de chaque acide aminé pour *Silphium perfoliatum*, comparaison entre la plante entière et ses feuilles (Peni et al., 2020 d'après les résultats de Titeil et al., 2013 et Kowalska et al., 2020)

Silphie-France conseille de limiter la silphie à 30 % de la ration afin d'éviter le risque d'acidose pour les bovins (Mechekour, 2021), la Chambre d'agriculture du Cantal conseille 50 % maximum (Olivieri, 2021). Des éleveurs français ont commencé à en ajouter dans les rations. Les références scientifiques étant encore limitées, leur retour d'expérience sera important afin d'évaluer l'intérêt de la silphie en tant que fourrage.

### c) Autres débouchés

#### ➤ Production de miel

Les fleurs de la silphie sont appréciées des pollinisateurs et notamment des abeilles (Niqueux, 1981). De plus sa période de floraison intervient comme le tournesol, à une période où les ressources en pollen et nectar sont limitées (LTZ, 2016). La silphie pourrait par contre avoir davantage d'intérêts pour les abeilles mellifères que pour les abeilles sauvages, peut-être à cause d'une teneur en sucre trop faible. Mais cela reste à confirmer (LTZ, 2016). Une étude russe aurait évalué un rendement en miel atteignable de 150 kg/ha (Sokolov et Gritsak, 1972 cités par Gansberger et al., 2015 et LTZ, 2016). Mueller et al. ont estimé en 2020 une production en nectar de 80 kg/ha (cités par Cumplido-Marin et al., 2020). Selon Ohler et Horn (2012), le miel est de couleur brun rougeâtre, sa cristallisation est lente et la teneur en eau se situe entre 18 et 20 %.

#### ➤ Production de graines

La silphie aurait aussi le potentiel d'être cultivée comme plante oléagineuse grâce à des graines ayant une composition acide gras intéressante. Cependant l'échelonnement de la maturité de ces graines rendrait difficile la récolte (LTZ, 2016).

### ➤ Propriétés médicinales

D'après la littérature, la silphie semble avoir des propriétés médicinales, notamment avec : (LTZ, 2016 ; *Cumplido-Marin et al., 2020*)

- Des sesquiterpènes : inhibition de maladies humaines
- Le kaempférol : flavonoïde naturel pouvant avoir un intérêt contre le cancer
- Les saponines : réduction du cholestérol
- Les polysaccharides : propriétés antioxydantes
- Extraits alcooliques des racines : propriétés antibactériennes (*Kowalski et al., 2007*).

### ➤ Granulés et briquettes de silphie

Le pouvoir calorifique de la silphie a été étudié par plusieurs auteurs. Il ressort un pouvoir calorifique supérieur d'environ 17 à 19 MJ/kg MS et un pouvoir calorifique inférieur de 11 MJ/kg de matière fraîche (*Peni et al., 2020*). Elle serait adaptée à la production de biocarburants solides compacts (*Wrobel et al., 2013 ; Titei et al., 2021*).

### ➤ Autres utilisations possibles

- Propriétés antifongiques des extraits de feuilles
- Extraction des protéines avant l'entrée dans le méthaniseur (*Von Cossel et al., 2020*).

## 5) Evaluation écologique

La littérature s'accorde sur le fait que la silphie présente de nombreux bénéfices agronomiques et environnementaux en comparaison des cultures annuelles, et notamment du maïs.

### ➤ Une culture pérenne

Elle présente tout d'abord l'avantage de ne nécessiter aucun travail du sol. De ce fait une couverture du sol est présente toute l'année, ce qui protège le sol de l'érosion. Même après la récolte fin août la repousse est rapide (LTZ, 2016). Elle est par ailleurs suffisamment étouffante pour ne pas avoir besoin d'herbicides. Ruf et al. (2018) ont étudié les impacts des cultures pérennes (*dont S. perfoliatum*) destinées à la production d'énergie en comparaison des cultures énergétiques annuelles et des prairies permanentes sur les indicateurs de la qualité de sols (*carbone organique, structure, biomasse microbienne...*). Il ressort que ces cultures pérennes auraient des effets positifs sur la qualité des sols (*néanmoins bien inférieurs à ceux des prairies permanentes*), et les auteurs recommandent le remplacement des cultures énergétiques annuelles par des cultures pérennes.

### ➤ Des besoins en fertilisation azotée limités

En comparaison du maïs, les besoins de la silphie en fertilisation azotée sont moins importants, même si elle reste indispensable pour obtenir des hauts rendements. De plus des études ont montré que si la fertilisation est trop importante, la plante a la capacité d'en absorber la totalité. En effet les reliquats azotés restent identiques quelle que soit la quantité apportée (Fig. 15). C'est la biomasse racinaire ainsi que sa teneur en azote qui augmente. La fonction de ce stock d'azote n'a pas été étudiée. Par ailleurs les repousses de silphie entre la récolte et l'hiver permettent de mobiliser ces reliquats ainsi que la minéralisation éventuelle avant la période de drainage.

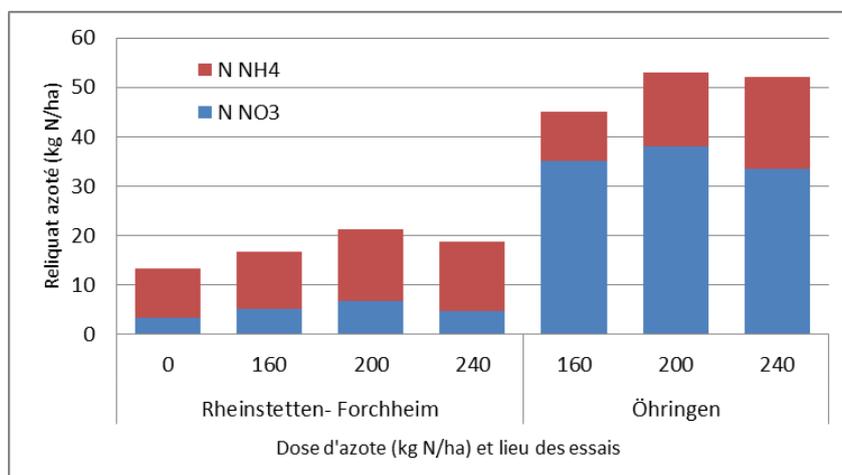


Figure 15 : Reliquats azotés (en kg N/ha) après récolte, à une profondeur de sol de 0 à 90 cm (localités Rheinstetten-Forchheim et Öhringen, moyenne sur 3 années et 3 répétitions). (Adapté des résultats publiés par le LTZ Augustenberg en 2016)

### ➤ Une production de biomasse précoce

Comme signalé précédemment le développement de la silphie commence tôt au printemps ce qui permet une production de biomasse importante avant la période estivale. Ses besoins en eau durant cette période devraient donc être moins importants que les cultures annuelles d'été comme le maïs.

### ➤ Favorise la biodiversité

Les revues bibliographiques concluent à une amélioration de la biodiversité des sols, notamment grâce à la production importante de biomasse. La population en vers de terre a par exemple tendance à augmenter avec l'âge de la culture de silphie en comparaison du maïs (Schorpp et Schrader, 2016). Les pollinisateurs sont aussi bien présents avec la floraison en été. Une étude tchèque pointe un risque de diminution de la présence de méso et macrofaune en comparaison d'espèces pérennes indigènes (Hedenec et al. 2014 cités par Cumplido-Marin et al., 2020).

### ➤ Une plante envahissante ?

Dans la littérature, peu d'auteurs envisagent un risque de dissémination de l'espèce. En effet les rhizomes sont courts, les graines ne peuvent pas se disséminer par le vent, et les jeunes pousses ont un niveau de compétitivité très faible (LTZ, 2016). Ende et al. (2020) ont fait état d'un risque de dissémination accru dans des écosystèmes humides et conseillent de surveiller la culture. Silphie-France garantit que leur variété ABICA PERFO est non invasive.

### ➤ Phytoremédiation

Si le zinc est défavorable à la croissance de la silphie (Zhang et al., 2010), elle serait par contre capable de stocker le cadmium dans ses racines, lui conférant une certaine résistance à cet élément ainsi qu'une capacité de phytostabilisation (capacité d'une plante à fixer un élément polluant).

## 6) Situation actuelle en France

Environ 3000 ha de silphie sont implantés en France en 2021. Elle est présente presque partout en France, même si elle semble davantage présente dans la moitié nord de la France (carte visible sur le site de Silphie-France). Des expérimentations sont menées dans le Grand-Est depuis 2019 par les Chambres d'agriculture et celle d'Alsace avait écrit une plaquette sur la culture en 2019 (CA Alsace, 2019). Depuis d'autres départements ont commencé des suivis (Chambre d'Agriculture du Cantal, Coopérative de Creully...). Un article a été rédigé en 2020 dans les Landes (CA Landes, 2020). Le débouché visé semble être principalement la méthanisation mais certains agriculteurs ont commencé à en planter pour une utilisation comme fourrage (Cridling, 2021 ; Olivieri, 2021 ; Mechekour, 2020 ; Roy, 2021 ; R., 2021). D'après

Silphie-France une grande partie des surfaces serait destinée à l'alimentation des bovins (*Mechekour, 2021*). Les GEDA de Vendée ont organisé en 2021 une commande groupée de semences de silphie afin d'obtenir des tarifs préférentiels (*CA PDL, 2021*).

En Nouvelle-Aquitaine des parcelles ont été semées dans presque tous les départements. Des conseillers des Chambres départementales d'agriculture ont commencé à suivre des parcelles, notamment en Dordogne, Haute-Vienne, Corrèze, Landes, Creuse.

D'un point de vue réglementaire la silphie perfoliée a fait l'objet d'une question à l'Assemblée Nationale en 2019 (*N°23371 de M. Stéphane Vitry*). La réglementation limite l'alimentation des méthaneurs par des cultures principales, à hauteur de 15 % du tonnage brut du total des intrants (*décret n° 2016-929 du 7 juillet 2016*). La silphie, étant une culture pérenne, est considérée comme une culture principale et est donc soumise à ce seuil. Concernant la déclaration PAC, elle doit être enregistrée comme « Autres plantes ornementales et PPAM pérennes » sous le code « PPP ». Cette limite de 15 % qui vise à limiter la concurrence vis-à-vis des cultures alimentaires, pourrait constituer, sauf changement, un frein pour le développement de la silphie en France comme intrant pour la méthanisation.

## 7) Conclusion

La silphie perfoliée, étudiée initialement pour la production de fourrage, connaît depuis 2010 un fort regain d'intérêt avec le développement de la méthanisation. La littérature a montré qu'elle peut être une excellente alternative au maïs pour la production de biométhane. En effet, cette plante pérenne présente de nombreux bénéfices agronomiques et environnementaux, comme l'amélioration de la qualité des sols et la réduction de l'utilisation des intrants. En France, la silphie intéresse de plus en plus d'agriculteurs depuis 2019, à la fois pour une utilisation méthanisation et élevage. Concernant le rendement en biomasse, elle semble avoir un potentiel un peu inférieur au maïs ensilage, mais avec des besoins en fertilisations azotés inférieurs et des besoins en eau inférieurs durant la période estivale. Le pouvoir méthanogène semble également un peu inférieur à celui du maïs. Pour les valeurs fourragères, les références sont pour le moment très limitées, mais elles sont globalement correctes.

Si les références recensées dans cette bibliographie montrent de nombreux intérêts de la silphie pour la production de biomasse, il reste encore des freins à lever et des points à étudier pour qu'elle se développe davantage. Le principal frein est le coût d'implantation. Il a été réduit grâce à la recherche faite sur des semences avec une meilleure capacité de germination. Mais la dose de semis est toujours très élevée par rapport au nombre de pieds nécessaires. De plus l'enherbement la première année mène parfois à des échecs d'implantation ce qui provoque l'arrêt de la culture, et à une perte financière importante pour l'agriculteur.

Certains auteurs ont pointé la nécessité de réaliser des analyses de cycle de vie afin de démontrer l'intérêt de la silphie par rapport aux autres cultures. Il manque également des références sur la manière de l'intégrer dans les systèmes agricoles, ainsi que sur ses conséquences agronomiques et environnementales sur le long terme. Il serait aussi pertinent d'étudier la possibilité d'associer la silphie avec des légumineuses pérennes comme le trèfle ou la luzerne.

En France il manque tout d'abord des références sur le niveau de production de biomasse atteignable en fonction des différents contextes pédoclimatiques. Une évaluation de la rentabilité sur le long terme est aussi à réaliser afin de préciser l'intérêt économique de la silphie pour les agriculteurs. De plus, comme elle est implantée pour au moins 10 ans, mieux connaître ses besoins

en eau et en températures permettrait de voir s'il s'agit d'une culture adaptée face au changement climatique. Les retours d'expériences des agriculteurs seront décisifs pour le développement de la culture. Les capitaliser permettrait de mieux comprendre dans quels contextes et pour quelles utilisations la silphie est la plus adaptée. Le tableau 5 ci-dessous résume les éléments qui sont à ce jour connus sur la culture de la silphie et ceux qui sont à approfondir.

**Tableau 5** : Tableau récapitulatif des éléments connus et à étudier sur la culture de la silphie

|                                     | <b>Éléments connus</b>  | <b>Études à conduire</b>          |
|-------------------------------------|--|--|
| <b>Semences</b>                     | - Possibilités de levée de la dormance des graines   | - Approfondir les connaissances sur l'influence des facteurs environnementaux sur la levée                           |
| <b>Semis</b>                        | - Densité de pieds/m <sup>2</sup> optimale<br>- Profondeur de semis                                      | - Améliorer la technique de semis pour favoriser la levée et diminuer le coût d'implantation                         |
| <b>Désherbage</b>                   | - Utilisation de la bineuse<br>- Association avec du maïs  | - Améliorer la gestion de l'enherbement -<br>Utilisation herse étrille   |
| <b>Besoins en températures</b>      | - Tolérance au gel<br>- Températures optimales de croissance   | - Somme de degrés jour nécessaire pour atteindre le stade de récolte   |
| <b>Besoins en eau</b>               | - Besoins en eau annuels   | - Préciser les besoins en irrigation en fonction de la pluviométrie estivale   |
| <b>Fertilisation</b>                | - Besoins en azote<br>- Niveaux d'exportation des principaux éléments minéraux                           | - Déterminer le besoin unitaire d'azote<br>- Préciser les besoins dans les différents sols français                  |
| <b>Ravageurs</b>                    | - Ravageurs potentiels identifiés  | - Risques d'augmentation de la présence de certains ravageurs en France  |
| <b>Récolte</b>                      | - Matériel à utiliser<br>- Stade de récolte optimal  | - Préciser les dates de récoltes en France   |
| <b>Rendement</b>                    | - Références récentes essentiellement à l'international  | - Potentiel en fonction des différents contextes pédoclimatiques français  |
| <b>Utilisation comme fourrage</b>   | - Quelques références de valeurs fourragères   | - Intérêt de la silphie comme fourrage en comparaison d'autres plantes et en fonction des animaux                    |
| <b>Utilisation en méthanisation</b> | - Quelques références de pouvoir méthanogène   | - Préciser les intérêts et inconvénients par rapport au maïs<br>- Possibilités d'augmentation du pouvoir méthanogène |
| <b>Intérêt économique</b>           | - coût d'implantation et d'entretien annuel  | - Rentabilité sur le long terme<br>- Comparaison avec d'autres cultures  |
| <b>Impacts agronomiques</b>         | - Intérêts communs aux plantes pérennes ( <i>Carbone, érosion, structure du sol...</i> )                 | - Impacts sur le long terme  |
| <b>Impacts environnementaux</b>     | - Amélioration de la biodiversité des sols et attrait des pollinisateurs                                 | - Impacts sur le long terme  |
| <b>Possibilités d'associations</b>  | - Implantation avec du maïs la 1 <sup>ère</sup> année  | - Association avec des légumineuses pérennes ( <i>trèfle, luzerne...</i> )   |

## Bibliographie

- ASAPISTRA, 2020. Silphie : plante miracle contre la sécheresse et les pesticides. In : *asapistra* [en ligne]. 12 août 2020. [Consulté le 22 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://asapistra.fr/?q=node/1900>
- BAUMONT, René, TRAN, Gilles, CHAPOUTOT, Patrick, MAXIN, Gaëlle, SAUVANT, Daniel, HEUZÉ, Valérie, LEMOSQUET, Sophie et LAMADON, Anne, 2018. *Tables Inra de la valeur des aliments utilisés en France et dans les régions tempérées* [en ligne]. Editions Quae. [Consulté le 11 octobre 2021]. ISBN 978-2-7592-2867-6. Disponible à l'adresse : <https://hal.inrae.fr/hal-02791193>
- BERNAS, Jaroslav, BERNASOVÁ, Tereza, GERSTBERGER, Pedro, MOUDRÝ, Jan, KONVALINA, Petr et MOUDRÝ, Jan, 2021. Cup plant, an alternative to conventional silage from a LCA perspective. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 février 2021. Vol. 26, n° 2, pp. 311-326. DOI [10.1007/s11367-020-01858-x](https://doi.org/10.1007/s11367-020-01858-x).
- BEDLAN, Gerhard, 2014. *Ascochyta silphii* sp. nov. – eine neue *Ascochyta*-Art an *Silphium perfoliatum*. *Journal für Kulturpflanzen* 66(8) 2014. août 2014. pp. 866 KB, 276-280. DOI [10.5073/JFK.2014.08.03](https://doi.org/10.5073/JFK.2014.08.03).
- BURY, Marek, MOŽDŽER, Ewa, KITCZAK, Teodor, SIWEK, Hanna et WŁODARCZYK, Małgorzata, 2020. Yields, Calorific Value and Chemical Properties of Cup Plant *Silphium perfoliatum* L. Biomass, Depending on the Method of Establishing the Plantation. *Agronomy*. 15 juin 2020. Vol. 10, n° 6, pp. 851. DOI [10.3390/agronomy10060851](https://doi.org/10.3390/agronomy10060851).
- CHAMBRE D'AGRICULTURE ALSACE, 2019. La silphie perfoliée. In : *Chambre d'Agriculture Alsace* [en ligne]. 2019. [Consulté le 8 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : [https://alsace.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/Grand-Est/040\\_Inst-Alsace/RUBR-productions-vegetales/Cultures\\_speciales/plaquette\\_silphie\\_2019\\_bd.pdf](https://alsace.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Grand-Est/040_Inst-Alsace/RUBR-productions-vegetales/Cultures_speciales/plaquette_silphie_2019_bd.pdf)
- CHAMBRES D'AGRICULTURE PAYS-DE-LOIRE, 2021. Commande groupée de semence de silphie. In : *Chambre d'Agriculture Pays-de-Loire* [en ligne]. 2021. [Consulté le 19 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://extranet-pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/vos-chambres/vendee/formulaires/commande-groupee-de-semence-de-silphie/>
- CHAMBRE D'AGRICULTURE DES LANDES, 2020. La Silphie perfoliée, vous connaissez ?. *Journal les 4 saisons – FDGEDA des Landes*. Juillet 2020. N° 70, pp.17-18.
- CONRAD, M., BIERTUMPFEL, A., VETTER, A., 2009. Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) - von der Futterpflanze zum Koferment. In : *Veranstaltungen.fnr* [en ligne]. 2009. [Consulté le 6 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : [http://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/Energiepflanzen2009/Conrad\\_freigegeben.pdf](http://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/Energiepflanzen2009/Conrad_freigegeben.pdf)
- CRIDLING, Jeanne, 2021. Innovation. Un agriculteur de Formigny teste la silphie, une plante prometteuse | La Renaissance le Bessin. *Actu* [en ligne]. 5 juillet 2021. [Consulté le 19 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : [https://actu.fr/normandie/creully-sur-seulles\\_14200/innovation-un-agriculteur-de-formigny-teste-la-silphie-une-plante-prometteuse\\_43200628.html](https://actu.fr/normandie/creully-sur-seulles_14200/innovation-un-agriculteur-de-formigny-teste-la-silphie-une-plante-prometteuse_43200628.html)
- CUMPLIDO-MARIN, Laura, GRAVES, Anil R., BURGESS, Paul J., MORHART, Christopher, PARIS, Pierluigi, JABLONOWSKI, Nicolai D., FACCIOTTO, Gianni, BURY, Marek, MARTENS, Reent et NAHM, Michael, 2020. Two Novel Energy Crops: Sida hermaphrodita (L.) Rusby and *Silphium perfoliatum* L.- State of Knowledge. *Agronomy*. 28 juin 2020. Vol. 10, n° 7, pp. 928. DOI [10.3390/agronomy10070928](https://doi.org/10.3390/agronomy10070928).
- ENDE, L. Marie, KNÖLLINGER, Katja, KEIL, Moritz, FIEDLER, Angelika J. et LAUERER, Marianne, 2021. Possibly Invasive New Bioenergy Crop *Silphium perfoliatum*: Growth and Reproduction Are Promoted in Moist Soil. *Agriculture*. 1 janvier 2021. Vol. 11, n° 1, pp. 24. DOI [10.3390/agriculture11010024](https://doi.org/10.3390/agriculture11010024).
- FIGAS, A., SAWILSKA, A. K., ROLBIECKI, R. et TOMASZEWSKA-SOWA, M., 2016. Morphological characteristics of achenes and fertility plants of cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) obtained from micropropagation growing under irrigation. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*. 2016. Vol. nr IV/2. DOI [10.14597/infraeco.2016.4.2.100](https://doi.org/10.14597/infraeco.2016.4.2.100).
- GANSBERGER, Markus, MONTGOMERY, Lucy F.R. et LIEBHARD, Peter, 2015. Botanical characteristics, crop management and potential of *Silphium perfoliatum* L. as a renewable resource for biogas production: A review. *Industrial Crops and Products*. janvier 2015. Vol. 63, pp. 362-372. DOI [10.1016/j.indcrop.2014.09.047](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.09.047).
- GANSBERGER, Markus, STÜGER, Hans-Peter, WEINHAPPEL, Manfred, MODER, Karl, LIEBHARD, Peter, VON GEHREN, Philipp, MAYR, Josef et RATZENBÖCK, Andreas, 2017. Germination characteristic of *Silphium perfoliatum* L. seeds. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*. 30 juin 2017. Vol. 68, n° 2, pp. 73-79. DOI [10.1515/boku-2017-0007](https://doi.org/10.1515/boku-2017-0007).

- GOUALAN, Nicolas, 2020. La silphie, une culture intéressante pour la méthanisation. In : *Paysan-Breton* [en ligne]. 28 janvier 2020. [Consulté le 8 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.paysan-breton.fr/2020/01/la-silphie-une-culture-interessante-pour-la-methanisation/>
- GREBE, S., BELEU, T., DÖHLER, H., ECKEL, H., FRISCH, J., FRÖBA, N., FUNK, M., GRUBE, J., HARTMANN, S., HORLACHER, D., HORN, C., KLOEPFER, F., LORBACHER, F.R., SAUER, N., SCHROERS, J.O., WIRTH, B., WITZEL, E., 2012. Energiepflanzen: Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus. In : *KTBL* [En ligne]. 2012. [Consulté le 8 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.ktbl.de/fileadmin/produkte/leseprobe/19508excerpt.pdf>
- GOUALAN, Nicolas, [sans date]. La silphie, une culture intéressante pour la méthanisation. In : *Journal Paysan Breton* [en ligne]. [Consulté le 6 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.paysan-breton.fr/2020/01/la-silphie-une-culture-interessante-pour-la-methanisation/>
- HARTMANN, Anja et LUNENBERG, Tatjana, 2016. Ertragspotenzial der Durchwachsenen Silphie unter bayerischen Anbaubedingungen. *Journal für Kulturpflanzen*. 1 décembre 2016. pp. 385- 388 Seiten. DOI [10.5073/JFK.2016.12.07](https://doi.org/10.5073/JFK.2016.12.07).
- HEDĚNEC, Petr, NOVOTNÝ, David, UŠŤAK, Sergej, CAJTHAML, Tomáš, SLEJŠKA, Antonín, ŠIMÁČKOVÁ, Hana, HONZÍK, Roman, KOVÁŘOVÁ, Monika et FROUZ, Jan, 2014. The effect of native and introduced biofuel crops on the composition of soil biota communities. *Biomass and Bioenergy*. 1 janvier 2014. Vol. 60, pp. 137-146. DOI [10.1016/j.biombioe.2013.11.021](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.021).
- KOWALSKA, Grażyna, PANKIEWICZ, Urszula et KOWALSKI, Radosław, 2020. Evaluation of Chemical Composition of Some *Silphium* L. Species as Alternative Raw Materials. *Agriculture*. 17 avril 2020. Vol. 10, n° 4, pp. 132. DOI [10.3390/agriculture10040132](https://doi.org/10.3390/agriculture10040132).
- KOWALSKI, Radosław et KĘDZIA, Bogdan, 2007. Antibacterial Activity of *Silphium perfoliatum* extracts. *Pharmaceutical Biology*. janvier 2007. Vol. 45, n° 6, pp. 494-500. DOI [10.1080/13880200701389409](https://doi.org/10.1080/13880200701389409).
- Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ), 2016. Informationen für die Pflanzenproduktion - Ergebnisse der Versuche mit Durchwachsener Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) in Baden-Württemberg. In : *ltz.landwirtschaft-bw.de* [en ligne]. 2016. [Consulté le 7 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://ltz.landwirtschaft-bw.de/pb/,Lde/Startseite/Service/Informationen+fuer+die+Pflanzenproduktion?SORT=2&REVERSE=true>
- LUNENBERG, Tatjana et HARTMANN, Anja, 2016. Nährstoffentzüge von Durchwachsener Silphie in Bayern. *Journal für Kulturpflanzen*. 1 décembre 2016. pp. 389- 391 Seiten. DOI [10.5073/JFK.2016.12.08](https://doi.org/10.5073/JFK.2016.12.08).
- MECHEKOUR, Franck, 2020. « J'envisage de mettre 35 % de silphie dans la ration des génisses ». *Réussir lait* [en ligne]. 2 octobre 2020. [Consulté le 19 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.reussir.fr/lait/jenvisage-de-mettre-35-de-silphie-dans-la-ration-des-genisses>
- MECHEKOUR, Franck, 2021. La silphie, une pérenne remise au goût du jour. *Réussir lait* [en ligne]. 6 juillet 2021. [Consulté le 6 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.reussir.fr/lait/la-silphie-une-piste-creuser-pour-pallier-un-deficit-en-fourrages-chez-les-bovins>
- Metzler & Brodmann Saaten GmbH. Donau Silphie. In : *Donau-silphie* [En ligne]. 2021 [Consulté le 19 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.donau-silphie.de/>
- Missouri Botanical Garden, St. Louis, MO & Harvard University Herbaria, Cambridge, MA, 2008. *Silphium perfoliatum* Linnaeus, Syst. Nat. ed. 10. 2: 1232. 1759. In : *efloras* [en ligne]. 2008. [Consulté le 6 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : [http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora\\_id=1&taxon\\_id=242417268](http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=1&taxon_id=242417268)
- MUELLER, Anna Lena, BIERTÜMPFEL, Andrea, FRIEDRITZ, Lennart, POWER, Eileen F, WRIGHT, Geraldine A et DAUBER, Jens, 2020. Floral resources provided by the new energy crop, *Silphium perfoliatum* L. (Asteraceae). *Journal of Apicultural Research*. 14 mars 2020. Vol. 59, n° 2, pp. 232-245. DOI [10.1080/00218839.2019.1668140](https://doi.org/10.1080/00218839.2019.1668140).
- NIQUEUX, M., 1981. Une nouvelle plante fourragère : le silfe (*Silphium perfoliatum* L.). *Fourrages*. Septembre 1981. n°87, pp. 119-136.
- N.L. CHRESTENSEN, 2019. Anbauanleitung für die Aussaat von Durchwachsene Silphie. In : *Chrestensen.de* [en ligne]. 2019. [Consulté le 8 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : [https://www.chrestensen.de/fileadmin/user\\_upload/pdf/Silphie-Anbauanleitung-Aussaat-2019-web.pdf](https://www.chrestensen.de/fileadmin/user_upload/pdf/Silphie-Anbauanleitung-Aussaat-2019-web.pdf)
- OHLER, M., et HORN, H. 2012. Die Eignung der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum*) als Trachtquelle für Honigbienen. In : Bericht der Landesanstalt für bienenkunde der Universität Hohenheim für das Jahr 2012 (pp. 16-17) [En ligne]. 2013. [Consulté le 11 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : [https://www.uni-hohenheim.de/fileadmin/einrichtungen/bienenkunde/Downloads/Jahresbericht/2012\\_jahresbericht\\_lab\\_.pdf](https://www.uni-hohenheim.de/fileadmin/einrichtungen/bienenkunde/Downloads/Jahresbericht/2012_jahresbericht_lab_.pdf)

- OLIVIEN, P., 2021. Silphie : ne pas se fier aux oracles... *L'Union du Cantal* [en ligne]. 16 juin 2021. [Consulté le 19 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.lunion-cantal.com/actualites/silphie-ne-pas-se-fier-aux-oracles:XBBCA78C.html>
- PENI, Dumitru, STOLARSKI, Mariusz Jerzy, BORDIEAN, Anna, KRZYŻANIAK, Michał et DĘBOWSKI, Marcin, 2020. *Silphium perfoliatum* - A Herbaceous Crop with Increased Interest in Recent Years for Multi-Purpose Use. *Agriculture*. 16 décembre 2020. Vol. 10, n° 12, pp. 640. DOI [10.3390/agriculture10120640](https://doi.org/10.3390/agriculture10120640).
- PICHARD, Gastón, 2012. Management, production, and nutritional characteristics of cup-plant (*Silphium perfoliatum*) in temperate climates of southern Chile. *Ciencia e investigación agraria*. avril 2012. Vol. 39, n° 1, pp. 61-77. DOI [10.4067/S0718-16202012000100005](https://doi.org/10.4067/S0718-16202012000100005).
- R., H., 2021. Diversification | Peu connue, la silphie s'avère intéressante pour la méthanisation. *Anjou agricole* [en ligne]. 27 mai 2021. [Consulté le 19 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.anjou-agricole.com/peu-connue-la-silphie-savere-interessante-pour-la-methanisation>
- ROY, Cyrill, 2021. Apiculteurs et agriculteurs se rencontrent pour travailler de concert. *Terra*. *Terra* [en ligne]. 15 juillet 2021. [Consulté le 19 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.terra.bzh/apiculteurs-et-agriculteurs-se-rencontrent-pour-travailler-de-concert>
- RUF, Thorsten, MAKSELON, Jennifer, UDELHOVEN, Thomas et EMMERLING, Christoph, 2018. Soil quality indicator response to land-use change from annual to perennial bioenergy cropping systems in Germany. *GCB Bioenergy*. 2018. Vol. 10, n° 7, pp. 444-459. DOI [10.1111/gcbb.12513](https://doi.org/10.1111/gcbb.12513).
- RUIDISCH, M., NGUYEN, T. T., LI, Y. L., GEYER, R. et TENHUNEN, J., 2015. Estimation of annual spatial variations in forest production and crop yields at landscape scale in temperate climate regions. *Ecological Research*. 2015. Vol. 30, n° 2, pp. 279-292. DOI [10.1007/s11284-014-1208-4](https://doi.org/10.1007/s11284-014-1208-4).
- SCHÄFER, Andreas, MEINHOLD, Tobias, DAMEROW, Lutz et SCHULZE LAMMERS, Peter, 2015. Crop establishment of *Silphium perfoliatum* by precision seeding. *LANDTECHNIK*. 22 décembre 2015. pp. 254- 261 Seiten. DOI [10.1515/LT.2015.3115](https://doi.org/10.1515/LT.2015.3115).
- SCHOO, B., SCHROETTER, S., KAGE, H. et SCHITTENHELM, S., 2017. Root traits of cup plant, maize and lucerne grass grown under different soil and soil moisture conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2017. Vol. 203, n° 5, pp. 345-359. DOI [10.1111/jac.12194](https://doi.org/10.1111/jac.12194).
- SCHOO, B., WITTICH, K. P., BÖTTCHER, U., KAGE, H. et SCHITTENHELM, S., 2017. Drought Tolerance and Water-Use Efficiency of Biogas Crops: A Comparison of Cup Plant, Maize and Lucerne-Grass. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2017. Vol. 203, n° 2, pp. 117-130. DOI [10.1111/jac.12173](https://doi.org/10.1111/jac.12173).
- SCHORPP, Quentin et SCHRADER, Stefan, 2016. Earthworm functional groups respond to the perennial energy cropping system of the cup plant (*Silphium perfoliatum* L.). *Biomass and Bioenergy*. avril 2016. Vol. 87, pp. 61-68. DOI [10.1016/j.biombioe.2016.02.009](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.02.009).
- SILPHIE-FRANCE, 2021. Silphie France, votre fournisseur de Silphie ABICA Perfo en France. *Silphie France* [en ligne]. 2021. [Consulté le 19 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.silphie-france.fr/silphie-france-votre-fournisseur-de-silphie-en-france.html>
- SOKOLOV, V. S., et GRITSAK, Z. I., 1972. *Silphium* – a valuable fodder and nectariferous crop. *World Crops*. 1972. n°24, pp. 299-301.
- STANFORD, G. *Silphium perfoliatum* (cup-plant) as a new forage. In Proceedings of the Twelfth North American Prairie Conference: Recapturing a Vanishing Heritage, Cedar Falls, Iowa, 5–9 August 1990; pp. 33–37
- ȚÎȚEI, Victor, TELEUTA,, Alexandru et MUNTEAN, Alexandru, 2013. The Perspective of Cultivation and Utilization of the Species *Silphium Perfoliatum* L. and *Helianthus Tuberosus* L. in Moldova. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture*. 26 novembre 2013. Vol. 70, n° 1, pp. 160-166. DOI [10.15835/buasvmcn-agr:9780](https://doi.org/10.15835/buasvmcn-agr:9780).
- ȚÎȚEI, Victor, CÎRLIG, Natalia et GUȚU, Ana, 2021. Some biological peculiarities and economic value of the cultivation of cup plant, *Silphium perfoliatum* L. [en ligne]. 11 janvier 2021. [Consulté le 29 août 2021]. DOI [10.5281/ZENODO.4431626](https://doi.org/10.5281/ZENODO.4431626). Disponible à l'adresse : <https://zenodo.org/record/4431626>
- TRÖLENBERG, S D, KRUSE, M et JONITZ, A, 2012. Verbesserung der Saatgutqualität bei der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.). *VDLUFA-Schriftenreihe* 68. 2012. pp. 8.

USTAK, Sergej et MUNOZ, Jakub, 2018. Cup-plant potential for biogas production compared to reference maize in relation to the balance needs of nutrients and some microelements for their cultivation. *Journal of Environmental Management*. 15 décembre 2018. Vol. 228, pp. 260-266. DOI [10.1016/j.jenvman.2018.09.015](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.015).

VON COSSEL, Moritz, AMARYSTI, Canesia, WILHELM, Hanna, PRIYA, Nishu, WINKLER, Bastian et HOERNER, Lucia, 2020. The replacement of maize (*Zea mays* L.) by cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) as biogas substrate and its implications for the energy and material flows of a large biogas plant. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. mars 2020. Vol. 14, n° 2, pp. 152-179. DOI [10.1002/bbb.2084](https://doi.org/10.1002/bbb.2084).

VON GEHREN, P., GANSBERGER, M., MAYR, J. et LIEBHARD, P., 2016. The effect of sowing date and seed pretreatments on establishment of the energy plant *Silphium perfoliatum* by sowing. *Seed Science and Technology*. 30 août 2016. Vol. 44, n° 2, pp. 310-319. DOI [10.15258/sst.2016.44.2.04](https://doi.org/10.15258/sst.2016.44.2.04).

WEVER, Christian, HÖLLER, Martin, BECKER, Lukas, BIERTÜMPFEL, Andrea, KÖHLER, Johannes, VAN INGHELANDT, Delphine, WESTHOFF, Peter, PUDE, Ralf et PESTSOVA, Elena, 2019. Towards high-biomass yielding bioenergy crop *Silphium perfoliatum* L.: phenotypic and genotypic evaluation of five cultivated populations. *Biomass and Bioenergy*. 1 mai 2019. Vol. 124, pp. 102-113. DOI [10.1016/j.biombioe.2019.03.016](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.03.016).

WRÓBEL, Marek, FRANCIK, Slawomir, ŚLIPEK, Zbigniew et MUDRYK, Krzysztof, 2013. Influence of degree of fragmentation on chosen quality parameters of briquette made from biomass of cup plant. *Silphium perfoliatum* L. *Engineering for rural Development*. 24 mai 2013. Vol. 23, pp. 653-657.

ZHANG, Xingfeng, XIA, Hanping, LI, Zhian, ZHUANG, Ping et GAO, Bo, 2010. Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils. *Bioresource Technology*. 1 mars 2010. Vol. 101, n° 6, pp. 2063-2066. DOI [10.1016/j.biortech.2009.11.065](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.065).

