

- **Bilan énergétique du Silex Bambou**
  - L'analyse énergétique du Silex Bambou permet d'évaluer l'impact des différents matériaux utilisés pour la fabrication du châssis et de la coque L'objectif est de privilégier autant que possible des matériaux **biosourcés, disponibles localement et peu énergivores**, tout en conservant les performances mécaniques nécessaires au véhicule.
- Énergie grise des matériaux**

Le bambou pousse rapidement et stocke du carbone. C'est une graminée : la coupe d'une chaume ne détruit donc pas la plante. La récolte peut être réalisée manuellement à la scie égoïne. L'impact énergétique dépend principalement du transport entre la bambouseraie et l'atelier. Selon la distance parcourue, le bambou peut être considéré comme un puit de carbone.

- **Énergie grise estimée des matériaux du véhicule Silex**

| Matériau         | Utilité                  | Poids (kg) | Énergie grise (kWh/kg) | Énergie dépensée dans le véhicule (kWh) | Part du total max. |
|------------------|--------------------------|------------|------------------------|-----------------------------------------|--------------------|
| Bambou           | Cadre                    | 7          | Non chiffrée           | Non incluse                             | —                  |
| Chanvre tissé    | Coque                    | 3          | 5                      | 15                                      | 6,0 %              |
| Fibre de chanvre | Cadre                    | 2          | ≈ 0,118                | ≈ 0,235                                 | 0,1 %              |
| Acier            | Axes, direction, boulons | 4          | 2,6 à 5,6              | 10,4 à 22,4                             | 9,0 %              |
| Inox             | Disques                  | 0,2        | 6,4 à 20,3             | 1,28 à 4,06                             | 1,6 %              |
| Aluminium        | Roues                    | 0,5        | 43                     | 21,5                                    | 8,7 %              |
| Colle d'os       | Coque                    | 1          | 8 à 15                 | 8 à 15                                  | 6,0 %              |
| Colophane        | Coque                    | 1          | 5 à 10                 | 5 à 10                                  | 4,0 %              |
| Cuivre           | Électrique               | 0,5        | 16                     | 8                                       | 3,2 %              |
| Résine époxy     | Cadre                    | 4          | 38                     | 152                                     | 61,2 %             |
| TOTAL            | —                        | 23,2       | —                      | 221,4 à 248,2*                          | 100 %*             |

\* Total calculé hors énergie grise du bambou, qui n'a pas été chiffrée dans les données retenues..

L'ensemble est compris entre 221.4 et 248.2 **kWh d'énergie grise pour le châssis et la coque**, pour un poids d'environ **23,2 kg**, hors moteur et batterie.

### **Entretien et durée de vie**

Les éléments de transmission sont parmi les pièces les plus sollicitées et devront être remplacés régulièrement : chaîne, dérailleur, pédalier, plateau, roulements, etc. Une solution consiste à **surdimensionner la transmission** afin d'augmenter sa durée de vie. L'utilisation d'une boîte de vitesses intégrée, comme une transmission à moyeu, pourrait également être envisagée afin de limiter l'usure par rapport à un dérailleur classique. Les éléments de freinage devront également être remplacés en fonction de l'utilisation et du style de conduite. Leur surdimensionnement pourrait permettre d'augmenter leur durée de vie. L'acier et l'aluminium utilisés pour ces pièces présentent par ailleurs l'avantage d'être recyclables.

Les **pneus** constituent un autre point important. Ils sont fortement sollicités et devront être remplacés régulièrement. Le rechapage pourrait constituer une piste intéressante afin de prolonger leur durée de vie. Il serait intéressant d'étudier la possibilité de concevoir une **carcasse de pneu durable pouvant être rechapée plusieurs fois**, ainsi qu'une bande de roulement utilisant des matériaux moins polluants.

### **Origine des matériaux**

Une attention particulière est portée à l'origine des matériaux.

Le **bambou** pousse dans de nombreuses régions françaises et plusieurs entreprises proposent des chaumes secs.

Le **chanvre** est largement cultivé en France, qui est le premier producteur européen. Sa culture nécessite peu ou pas de produits phytosanitaires, même si elle nécessite une terre suffisamment riche en azote.

La **résine de pin** peut provenir des Landes. Elle est récoltée sur des arbres vivants, sans nécessiter leur abattage.

La **colle d'os** est également être fabriquée en France. L'objectif est donc de favoriser autant que possible des **filières françaises et des matériaux disponibles localement**, afin de limiter les impacts liés au transport et à la production.

## . **Fin de vie**

- . La conception du Silex Bambou privilégie la **réparabilité et la réutilisation**. Le cadre peut être rénové sur une très longue durée, car chaque élément peut être réparé, remplacer individuellement sans devoir changer l'ensemble du châssis. La coque en fibre de chanvre/époxy peut également être réparée, sur le principe des réparations réalisées sur des embarcations en fibres composites. Lorsque le véhicule arrive réellement en fin de vie, les différents matériaux peuvent être séparés. Les éléments mécaniques, le moteur, le contrôleur, les câbles et la batterie peuvent notamment être **réutilisés sur un autre véhicule**. Les éléments naturels qui ne peuvent plus être réutilisés pourraient, selon leur composition et leur état, être valorisés ou éventuellement biodégradés, après retrait des éléments métalliques, plastiques et électroniques. L'objectif est donc de concevoir un véhicule dont la durée de vie ne dépend pas uniquement de la durée de vie de ses composants, mais également de sa **capacité à être réparé, rénové et réutilisé**.

### **Retour sur nos choix**

Le bilan énergétique fait apparaître très clairement que, dans la construction actuelle du Silex Bambou, **la résine époxy constitue le principal poste d'énergie grise**. Elle représente à elle seule environ **61 % de l'énergie grise chiffrée du châssis et de la coque**.

L'un des objectifs initiaux du projet était pourtant de réaliser un véhicule utilisant autant que possible des matériaux bruts, biosourcés, locaux et peu transformés. Le bambou et le chanvre répondent bien à cette démarche, mais leur association nécessite actuellement l'utilisation d'une quantité importante de résine époxy pour obtenir des assemblages suffisamment résistants et durables.

Le premier prototype a probablement consommé davantage de résine qu'une construction optimisée. Il serait donc possible d'en réduire sensiblement la quantité lors d'une prochaine fabrication. Néanmoins, ce bilan nous amène à **nous interroger sur la pertinence de l'association bambou / chanvre / époxy** si l'objectif prioritaire est de réduire l'énergie grise et de faciliter la fin de vie du véhicule.

Une structure utilisant de **l'acier plat et tubulaire recyclé associé à de l'épicéa** constitue une piste intéressante pour le prochain prototype. À masse égale, l'épicéa permet d'utiliser des sections beaucoup plus importantes que l'acier en raison de sa faible densité. Il peut ainsi présenter une **très bonne rigidité spécifique**, notamment en flexion, à condition que la structure soit conçue spécifiquement pour le bois et que les fibres soient correctement orientées. L'acier resterait utilisé aux endroits où les efforts sont concentrés : assemblages, axes, direction, supports mécaniques et zones fortement sollicitées.

Cette solution permettrait également de revenir à l'un des principes initiaux du projet : **un châssis pouvant être assemblé lors de stages ou d'ateliers participatifs**, sans nécessiter que chaque participant maîtrise la soudure. Les éléments en épicea pourraient être préparés et assemblés mécaniquement à des pièces métalliques standardisées.

Le bilan change cependant fortement lorsque l'on considère le véhicule complet. **La batterie, le moteur et, dans la version solaire, les panneaux photovoltaïques deviennent prépondérants dans l'énergie grise totale.** Les efforts réalisés sur quelques kilogrammes de matériaux du châssis deviennent alors proportionnellement beaucoup moins visibles.

Cela ne signifie pas qu'ils sont inutiles. Au contraire, cette analyse montre qu'il faut maintenant travailler simultanément sur plusieurs leviers : **réduire la masse du véhicule, limiter la quantité de résine, utiliser une batterie aussi petite que possible, prolonger la durée de vie des composants et privilégier leur réparation et leur réemploi.**

La comparaison des versions avec **100 km et 200 km d'autonomie** illustre particulièrement bien ce point : réduire l'autonomie permet de diminuer fortement la masse de la batterie et son énergie grise. Le dimensionnement de la batterie doit donc correspondre aux usages réels du véhicule plutôt qu'à la recherche d'une autonomie maximale.

Enfin, la version sans panneaux solaires montre également qu'il faut distinguer **l'énergie nécessaire à la fabrication** de l'énergie consommée pendant toute la vie du véhicule. Un équipement peut demander beaucoup d'énergie à fabriquer mais éventuellement apporter un bénéfice pendant son utilisation. La pertinence du solaire embarqué devra donc être évaluée sur l'ensemble du cycle de vie et pas uniquement sur son énergie grise initiale.

## Bilan provisoire de l'énergie grise du véhicule Silex

Version incluant motorisation, batterie, solaire, électronique de puissance et pneus

| Matière / équipement | Utilité          | Poids (kg) | Énergie grise (kWh/kg) | Énergie dépensée dans le véhicule (kWh) | Part du total max. (%) |
|----------------------|------------------|------------|------------------------|-----------------------------------------|------------------------|
| Bambou               | Cadre            | 7          | Non chiffrée           | Non incluse                             | —                      |
| Chanvre tissé        | Coque            | 3          | 5                      | 15                                      | 0,4 %                  |
| Fibre de chanvre     | Cadre            | 2          | ≈ 0,118                | ≈ 0,235                                 | 0,0 %                  |
| Acier                | Axes, direction, | 4          | 2,6 à 5,6              | 10,4 à 22,4                             | 0,6 %                  |

|                            |                          |      |             |                     |        |
|----------------------------|--------------------------|------|-------------|---------------------|--------|
|                            | boulons                  |      |             |                     |        |
| Inox                       | Disques                  | 0,2  | 6,4 à 20,3  | 1,28 à 4,06         | 0,1 %  |
| Aluminium                  | Roues                    | 0,5  | 43          | 21,5                | 0,5 %  |
| Colle d'os                 | Coque                    | 1    | 8 à 15      | 8 à 15              | 0,4 %  |
| Colophane                  | Coque                    | 1    | 5 à 10      | 5 à 10              | 0,3 %  |
| Cuivre                     | Électrique               | 0,5  | 16          | 8                   | 0,2 %  |
| Résine époxy               | Cadre                    | 4    | 38          | 152                 | 3,9 %  |
| Moteur électrique 1 000 W  | Propulsion               | 5    | 16 à 20*    | 80 à 100*           | 2,5 %  |
| Batterie Li-ion ≈ 3 kWh    | Autonomie ≈ 200 km       | 20   | 42,49       | ≈ 849,8             | 21,7 % |
| Contrôleur moteur          | Commande moteur          | 0,7  | 20 à 40*    | 14 à 28*            | 0,7 %  |
| Régulateur solaire MPPT    | Gestion recharge solaire | 0,5  | 20 à 40*    | 10 à 20*            | 0,5 %  |
| Panneaux solaires 1 000 Wc | Recharge solaire         | 15   | ≈ 173,3**   | ≈ 2 600**           | 66,3 % |
| Pneus                      | Roulement                | 2    | 18,8 à 38,9 | 37,5 à 77,8         | 2,0 %  |
| TOTAL                      | Hors énergie du bambou   | 66,4 | —           | ≈ 3 812,7 à 3 923,8 | 100 %  |