

PRÉVENIR LA COMPACTION AVEC TERRANIMO

EXPÉRIENCE D'UTILISATION DU LOGICIEL TERRANIMO, VERSION QUÉBEC, POUR SIMULER
LES CONDITIONS D'UTILISATION DES ÉQUIPEMENTS SERVANT À L'ÉPANDAGE DE FUMIER

COLLOQUE BIO POUR TOUS

Victoriaville, 29 février 2024

Daniel Turner

Ferme LD Turner

St-Paulin



Questionnement et craintes

- Quoi faire pour éviter la compaction lors de l'épandage de fumier au printemps avant les semis ?
- Est-ce que Terranimo est un outil d'évaluation fiable ?
- Est-ce que je vais pouvoir trouver toutes les informations nécessaires à la simulation; tracteur, épandeur, poids et pneus ?
- Comment déterminer la charge maximale acceptable dans l'épandeur, le transfert de poids sur le tracteur ?
- Comment éviter les conclusions erronées en expérimentant avec Terranimo ?
- Comment bien comprendre et analyser correctement les résultats que Terranimo va fournir ?



Tandem tracteur-épandeur

Tracteur Deutz 6140 TTV, 140 HP - Épandeur de précision Tebbe MS 140, 14 m³

Collecte d'informations

Tracteur Deutz 6140 TTV

Poids base	5500
Pesées roues arr.	355
Chargeur	580
Godet	150

Poids total 6585 kg

Répartition poids = 40% - 60% (avant - arrière)
 Pneus avant = 380/70R 28 (Trelleborg TM700)
 Pneus arrière = 480/70R 38
 Pression minimale des pneus rec. par Deutz = 1,6 b ou **23,2 psi**
 Poids tracteur = 6285 kg
 Contrepoids avant = 300 kg (portion poids du chargeur + godet)
 Vitesse = 10 km/h

Épandeur Tebbe MS 140

Poids vide	6000
Chargement max.	8000
Charge appui max.	4000
Charge appui min.	800
Nbre d'essieu	1

Poids maximum 14000 kg

Répartition poids = voir tableau Charge d'appui
 Pneus = 800/65R 32 Alliance 360 (181 A8)
 Volume de charge utile ≈ 14 m3
Compost charge max = 0,546 t/m3 x 14 m3 = 7,64 t ou 7640 kg

Variation du poids et de la charge d'appui lors du déchargement (kg)

Poids total	Charge d'appui	Chargement
14000	4000	8000
13000	3714	7000
12000	3429	6000
11000	3143	5000
10000	2857	4000
9000	2571	3000
8000	2286	2000
7000	1600	1000
6000	800	0

Specs du mfg

- *Vitesse : 10 km/h
- *Largeur de travail : 2 m et 18 m
- *Charge d'appui : variable au cours du déchargement
- *Sol: glaciaire loameux fin des Appalache/Laurentides (19 % argile, 44 % limon, 37 % sable, 3,4 % M.O.)
- *Option: travail de sol récent
- *Condition de sol : "Humide"
- * Pressions exprimées en "psi"

Définitions

- **Pression** = force exercée par unité de surface (bar, kg/cm², lb/po² ou psi, ...)
 - Pression exercée par l'air sur la paroi interne d'un pneu
 - Terme généralement utilisé pour les gaz et les fluides
- **Contrainte ou « stress »** = force appliquée sur une surface générant une contrainte (bar, N/mm², lb/po² ou psi, ...). Il y a différents types de contraintes; tension, torsion, compression, ...
 - Résultat de la force ou pression exercée sur le sol via la surface d'un pneu (compression)
 - Terme généralement utilisé dans le cas des matériaux et structures (acier, bois, sol...)
- La pression et la contrainte sont exprimées avec les mêmes unités dans le logiciel Terranimo, version Québec, soit en « psi »

Simulations exploratoires avec Terranimo

- ❑ Toujours faire varier qu'une seule variable à la fois
- ❑ Garder tous les autres paramètres de la simulation constants
- ❑ Prendre note des résultats pour pouvoir les comparer
- ❑ Sélectionner la variable critique, faire varier uniquement cette dernière

Exemple de simulation:

	P appui = 3100 kg			Chargement = 5000 kg					
	Pression des pneus	Contrainte, surface du sol	Contrainte à 35 cm dans sol	Pression des pneus	Contrainte, surface du sol	Contrainte à 35 cm dans sol	Pression des pneus	Contrainte, surface du sol	Contrainte à 35 cm dans sol
Tract roues avant	14,5 psi	24,1	6,67	14,5	24,1	6,67	14,5	24,1	6,67
Tract roues arrière	20,4 psi (rec 21,4)	23,9	14,36	18,9	22,2	13,92	17,4	20,5	13,2
Épandeur roues	13 psi	15,5	11,6	13	15,5	11,6	13	15,5	11,6

- ❖ Cellules en rouge = risque de compaction sévère, en profondeur
- ❖ Fait varier la pression des pneus roues arrière du tracteur seulement, toujours tenir compte de la pression recommandée par le fabricant, ici 21,4 psi
- ❖ Comparer les valeurs des contraintes à chaque changement de pression des pneus
- ❖ Attention pour ne pas abaisser trop la pression, risque de déjanter les pneus

Observations; « notre cas spécifique »

- **La largeur de travail** : pas d'influence sur la contrainte à la surface du sol et contrainte dans le sol
- **Contrepoids avant (300 kg)**: peu d'influence pour réduire la contrainte dans le sol
- **Avantages d'activer l'option « travail de sol récent » :**
 - Sol sec – réduit la contrainte à la surface du sol (-20 %) & contrainte dans le sol à 35 cm (-8 %)
 - Sol humide - réduit la contrainte à la surface du sol (-12 %) & contrainte dans le sol à 35 cm (-7 %)
 - Sol mouillé – réduit la contrainte à la surface du sol (-9 %) & contrainte dans le sol à 35 cm (-5 %)
- **Valeurs types de résistance du sol** (portance) selon le niveau d'humidité:
 - Sol sec = 27,4 psi
 - Sol humide = **10,7 psi**
 - Sol mouillé = 7,1 psi

(valeurs à comparer avec la « *contrainte dans le sol* » dans le diagramme de décision)

Ajustement de la pression des pneus; dégonfleur automatique, un outil essentiel !

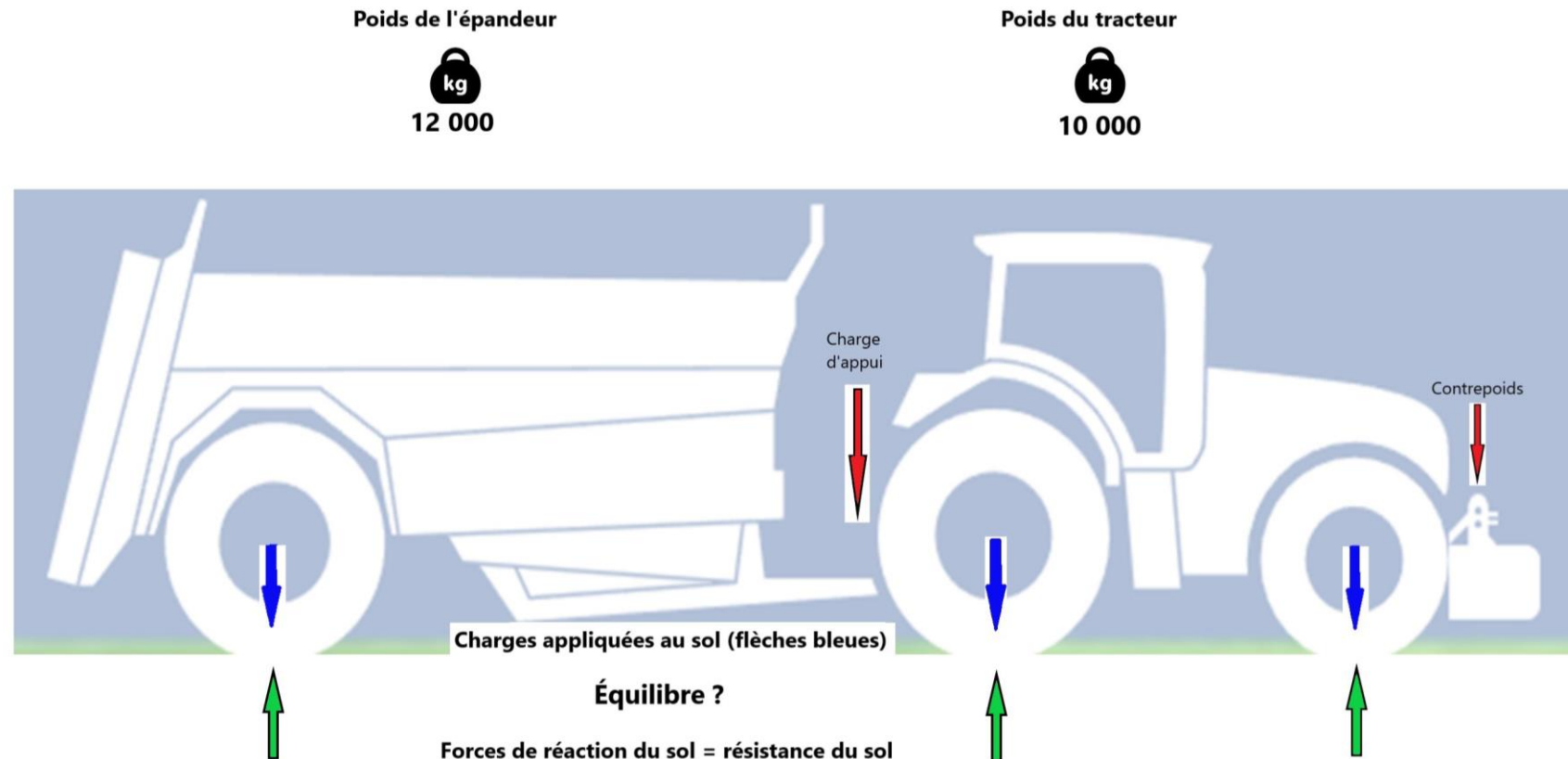


Simulations en conditions réelles avec déchargement graduel de l'épandeur

	P appui = 3400 kg		Chargement = 6000 kg		Pression & contrainte = psi	
	Pression des pneus	Contrainte, surface du sol	Contrainte à 35 cm dans sol		Résistance du sol	
Tracteur roues avant	14,5 psi	23,2	6,38		Valeur cible	(3975 kg/roue)
Tracteur roues arrière	22 psi (rec 23,4)	26,7	15,52		10,7 psi	
Épandeur roues	13 psi	15,4	11,89			
	P appui = 3100 kg		Chargement = 5000 kg			
	Pression des pneus	Contrainte, surface du sol	Contrainte à 35 cm dans sol		Résistance du sol	
Tracteur roues avant	14,5 psi	24,1	6,67			(3785 kg/roue)
Tracteur roues arrière	22 psi (rec 21,4)	25,5	14,79		10,7 psi	
Épandeur roues	13 psi	15,5	11,6			
	P appui = 2800 kg		Chargement = 4000 kg			
	Pression des pneus	Contrainte, surface du sol	Contrainte à 35 cm dans sol		Résistance du sol	
Tracteur roues avant	14,5 psi	23,1	6,82			(3595 kg/roue)
Tracteur roues arrière	22 psi (rec 19,3)	24,4	14,21		10,7 psi	
Épandeur roues	13 psi	17,4	11,89			
	P appui = 2500 kg		Chargement = 3000 kg			
	Pression des pneus	Contrainte, surface du sol	Contrainte à 35 cm dans sol		Résistance du sol	
Tracteur roues avant	14,5 psi	22	6,82			(3405 kg/roue)
Tracteur roues arrière	22 psi (rec 17,2)	23,2	13,49		10,7 psi	
Épandeur roues	13 psi	17,7	11,31			
	P appui = 2300 kg		Chargement = 2000 kg			
	Pression des pneus	Contrainte, surface du sol	Contrainte à 35 cm dans sol		Résistance du sol	
Tracteur roues avant	14,5 psi	22,6	6,96			(3275 kg/roue)
Tracteur roues arrière	22 psi (rec 15,9)	22,3	12,91		10,7 psi	
Épandeur roues	13 psi	19,4	11,02			
	P appui = 1600 kg		Chargement = 1000 kg			
	Pression des pneus	Contrainte, surface du sol	Contrainte à 35 cm dans sol		Résistance du sol	
Tracteur roues avant	14,5 psi	20,9	7,25			(2960 kg/roue)
Tracteur roues arrière	22 psi (rec 11,3)	23,1	12,18		10,7 psi	
Épandeur roues	13 psi	18,6	10,44			

Cellules en **rouge** =
compaction sévère
roues arrière tracteur

Sommaire des charges appliquées et forces de réaction



Cas de chargement maximal : charge de fumier dans l'épandeur = 6 000 kg
charge d'appui sur le tracteur = 3 400 kg
contrepoids avant = 300 kg

SIMULATION: Tableau des données, tracteur-épandeur, (chargement 6 000 kg, charge d'appui 3 400 kg)

Sélectionner la machinerie

Machines automotrices

Tracteurs

configurer Tracteur 130-180 CV

Machinerie tractée

configurer Épandeur monocoque

Machinerie sur attelage 3 points

Épandeur monocoque

Tracteur 130-180 CV

Charge remorquée	12'000 kg	Poids effectif	10'000 kg
Poids à vide	6'000 kg	Poids à vide	6'300 kg
Poids du chargement	6'000 kg	Contrepoids avant	300 kg
Charge d'appui	3'400 kg	Charge d'appui	3'400 kg
Charge à l'essieu*	8'600 kg	Pourcentage de charge sur l'essieu avant (chargé)*	21 %
Largeur de travail	18 m	Charge sur l'essieu avant (chargé)*	2'050 kg
Poids total du convoi	18'600 kg	Charge sur l'essieu arrière (chargé)*	7'950 kg
Poids d'adhérence*	54 %	Vitesse	10 km/h
☐ Retirer l'outil agricole		Largeur de travail	2 m
		GPS	Oui

* les valeurs affichées sont arrondies



sol glaciaire loameux fin des
Appalaches/Laurentides - humide

humide mouillé

Conditions de simulation : Terranimo Expert; situation réelle d'épandage, chargement maximal avec « déchargement graduel », pression constante des pneus. Sol humide et récemment travaillé.



Tracteur 130-180 CV

Poids à vide 6300 kg

Pourcentage de charge sur l'essieu avant (vide) 40 %

Contrepoids avant 300 kg

Charge d'appui 3400 kg

Vitesse 10 km/h

Largeur de travail 2 m

GPS 

Épandeur monocoque		Tracteur 130-180 CV	
Charge remorquée	12'000 kg	Poids effectif	10'000 kg
Poids à vide	6'000 kg	Poids à vide	6'300 kg
Poids du chargement	6'000 kg	Contrepoids avant	300 kg
Charge d'appui	3'400 kg	Charge d'appui	3'400 kg
Charge à l'essieu*	8'600 kg	Pourcentage de charge sur l'essieu avant (chargé)*	21 %
Largeur de travail	18 m	Charge sur l'essieu avant (chargé)*	2'050 kg
Poids total du convoi	18'600 kg	Charge sur l'essieu arrière (chargé)*	7'950 kg
Poids d'adhérence*	54 %	Vitesse	10 km/h
☐ Retirer l'outil agricole		Largeur de travail	2 m
		GPS	Oui
* les valeurs affichées sont arrondies			

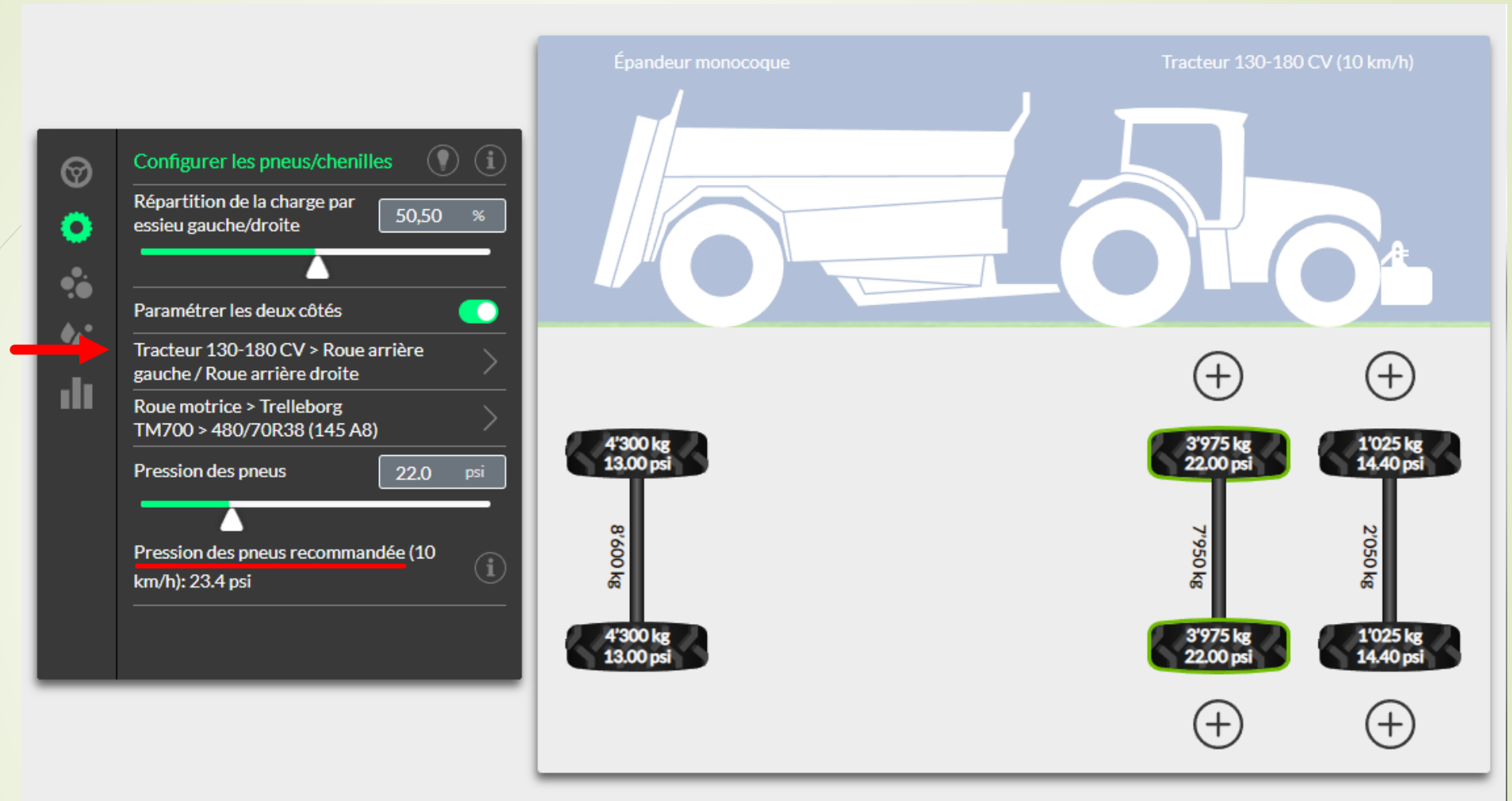


sol glaciaire loameux fin des Appalaches/Laurentides - humide

 humide  mouillé

Configurer paramètres du tracteur

Répartition des charges pour le tracteur



Sélection des pneus et pression de gonflage, tracteur

Charge/roue = 3,9 t > **3,5 t suggéré**; roues arrière tracteur



Épandeur monocoque

Poids à vide 6000 kg

Poids du chargement 6000 kg

Charge d'appui 3400 kg

Largeur de travail 18 m

Épandeur monocoque		Tracteur 130-180 CV	
Charge remorquée	12'000 kg	Poids effectif	10'000 kg
Poids à vide	6'000 kg	Poids à vide	6'300 kg
Poids du chargement	6'000 kg	Contrepoids avant	300 kg
Charge d'appui	3'400 kg	Charge d'appui	3'400 kg
Charge à l'essieu*	8'600 kg	Pourcentage de charge sur l'essieu avant (chargé)*	21 %
Largeur de travail	18 m	Charge sur l'essieu avant (chargé)*	2'050 kg
Poids total du convoi	18'600 kg	Charge sur l'essieu arrière (chargé)*	7'950 kg
Poids d'adhérence*	54 %	Vitesse	10 km/h
☐ Retirer l'outil agricole		Largeur de travail	2 m
		GPS	Oui
* les valeurs affichées sont arrondies			

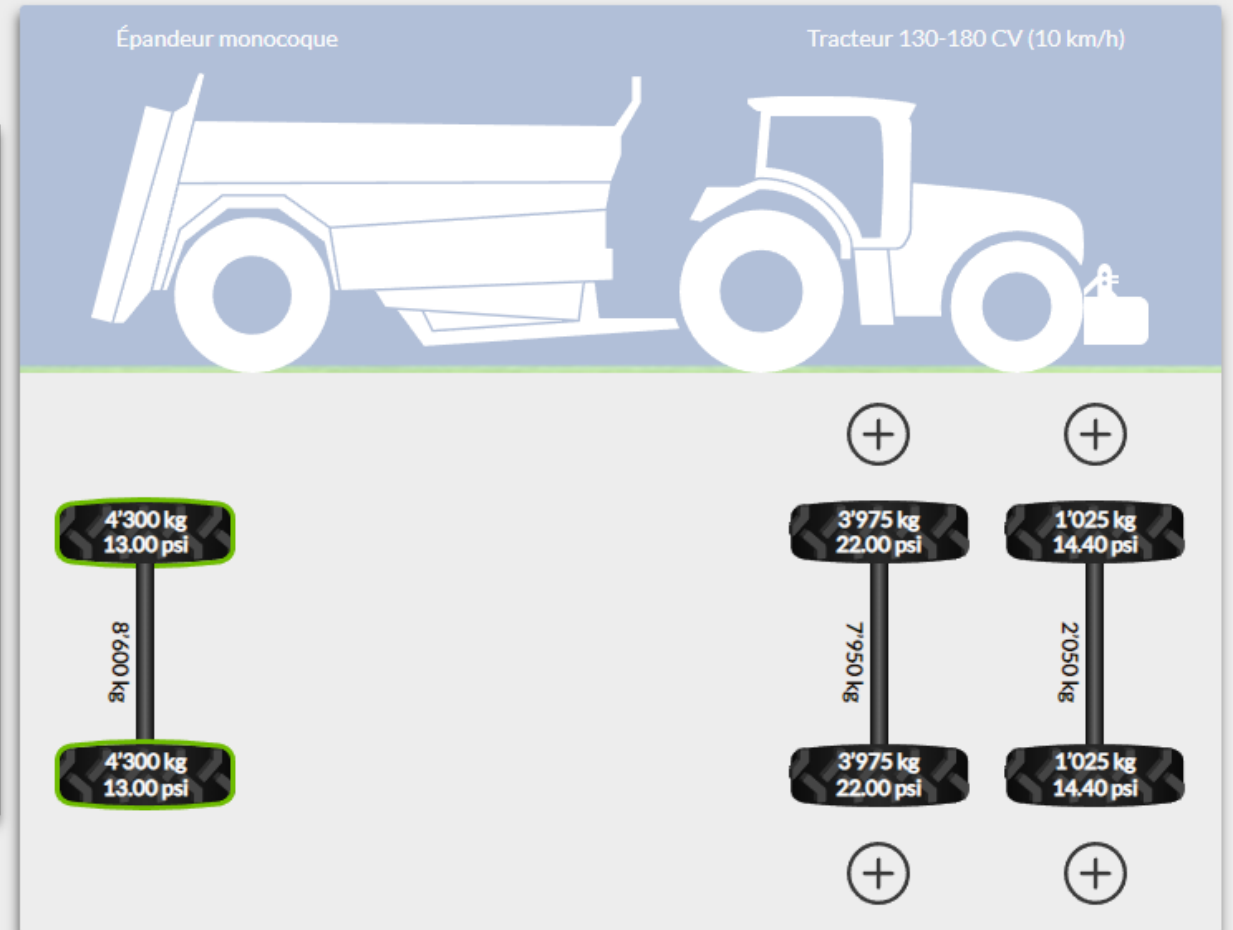
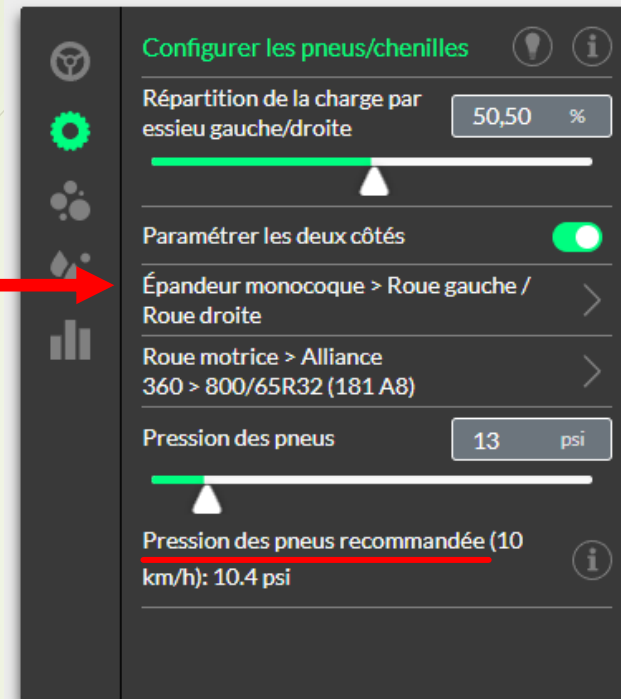


sol glaciaire loameux fin des Appalaches/Laurentides - humide

humide mouillé

Configurer paramètres de l'épandeur

Répartition des charges pour l'épandeur



Sélection des pneus et pression de gonflage, épandeur

Charge/roue = 4,3 t > **3,5 t suggéré**; épandeur

Définir le sol

Choisir un sol type >

sol glaciaire loameux fin des Appalaches/Laurentides >

Assistant Choix du sol

Afficher les horizons >

Travail de sol récent ☒

sol glaciaire loameux fin des Appalaches/Laurentides

Série de sol type	Calais
Sous-groupe pédologique	Gleysol humique orthique
Mode de dépôt	Till (morainique)
Région pédologique	(B4) Bas plateau de Compton (180-700 m)
Classe de drainage	Mal drainé
Modelé du terrain	Plat
Séries de sol apparentées	Dufferin, Magog, Ascot, Sherbrooke



Horizon	Limite inférieure	Argile	Limon	Sable	Matière organique	Masse volumique apparente
Ap1	10 cm / 4"	19.0 %	44.0 %	37.0 %	3.4 %	1.29 g/cm³
Ap2	35 cm / 14"	19.0 %	43.0 %	38.0 %	3.2 %	1.26 g/cm³
Bg	50 cm / 20"	19.0 %	46.0 %	35.0 %	1.3 %	1.30 g/cm³
Cg	100 cm / 39"	19.0 %	57.0 %	24.0 %	0.2 %	1.69 g/cm³

Choix du type de sol et option « travail de sol récent »

Choisir le type de sol s'apparentant le plus possible au sol de la ferme. Utiliser les résultats **d'analyses de sol** pour faire la sélection.

 Définir la teneur en eau du sol  

 Choisir un état approximatif de la teneur en eau >

 humide >

humide

Couche n°	Limite inférieure	Potentiel matriciel
1	10 cm / 4 °	10 cbar
2	20 cm / 8 °	10 cbar
3	30 cm / 12 °	10 cbar
4	40 cm / 16 °	10 cbar
5	50 cm / 20 °	10 cbar
6	60 cm / 24 °	9 cbar
7	70 cm / 28 °	8 cbar
8	80 cm / 31 °	7 cbar
9	90 cm / 35 °	6 cbar
10	100 cm / 39 °	5 cbar

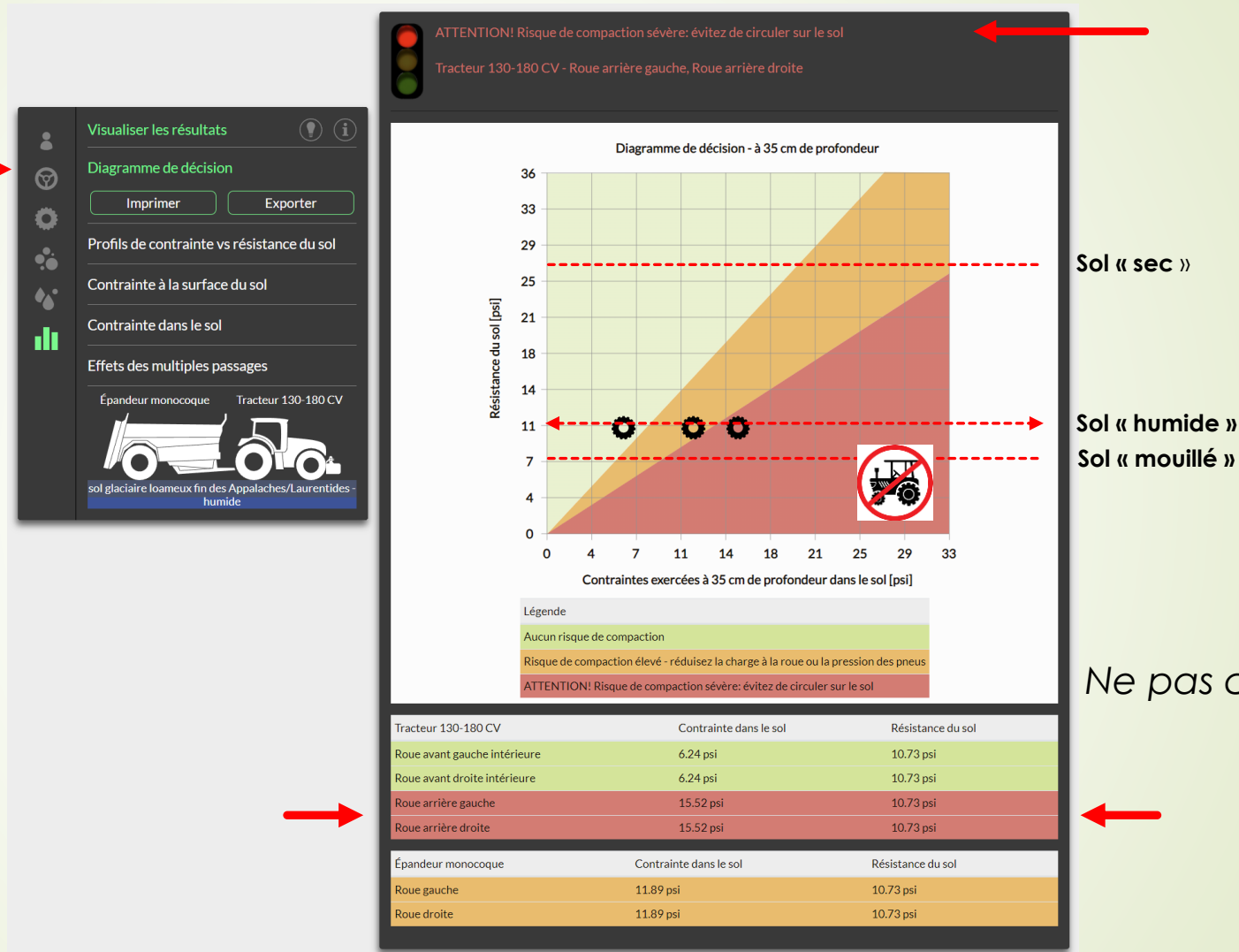


1 cbar = 1 kPa = 10 hPa = 10 cm de hauteur d'eau

Choisir l'état du sol; sec, humide ou mouillé

Sol humide; choix sécuritaire à l'automne et au printemps

Résultats: diagramme de décision (chargement 6 000 kg, charge d'appui 3 400 kg)



Contrainte dans le sol à 35 cm (≈ 14 po) de profondeur, sol humide.
Roue arrière du tracteur = **zone critique** = compaction profonde. Contrainte dans le sol $>$ résistance du sol.

Visualiser les résultats

Diagramme de décision

Profils de contrainte vs résistance du sol

Contrainte à la surface du sol

Choisir le type d'affichage

3D

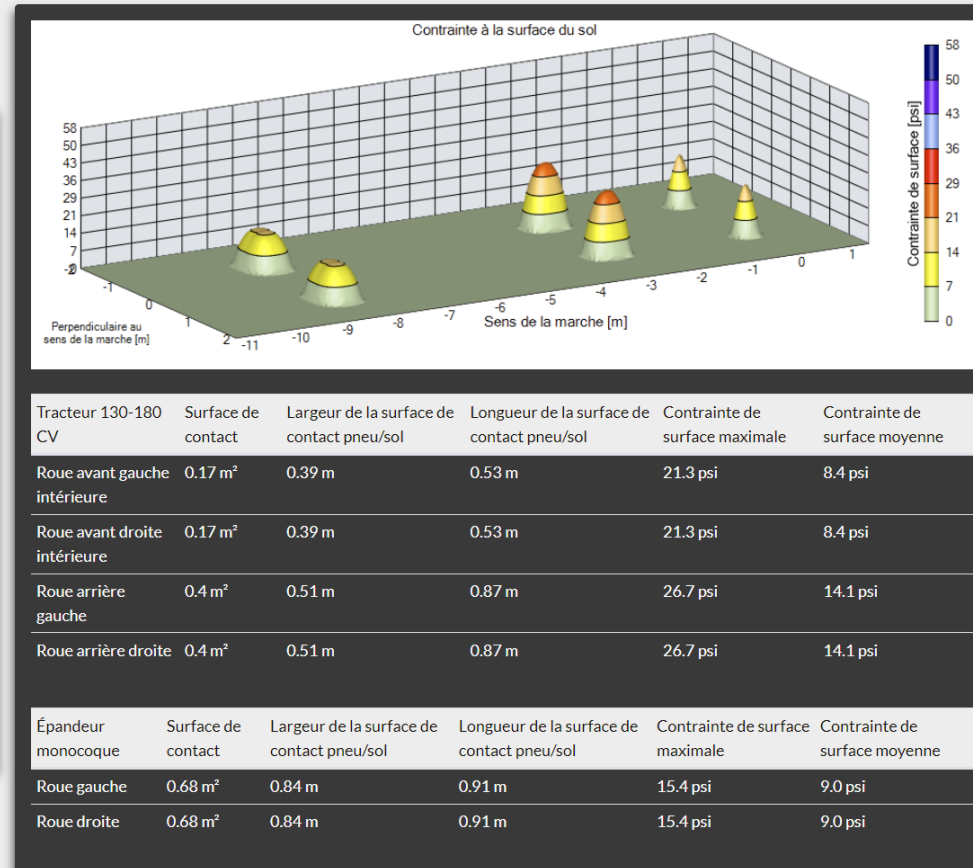
Imprimer Exporter

Contrainte dans le sol

Effets des multiples passages

Épandeur monocoque Tracteur 130-180 CV

sol glacière loameux fin des Appalaches/Laurentides humide



Contrainte maximale à la surface du sol

Représentation 3D de la contrainte à la surface du sol.
Zones en rouge = contrainte excessive; 26,7 psi

Visualiser les résultats

Diagramme de décision

Profils de contrainte vs résistance du sol

Contrainte à la surface du sol

Contrainte dans le sol

Sélectionner l'essieu

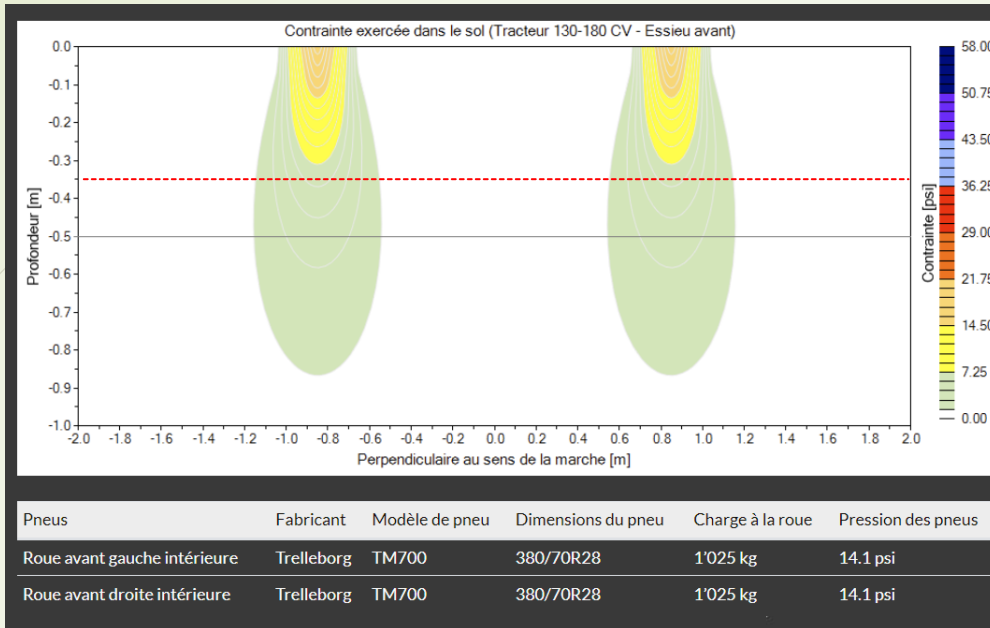
Tracteur 130-180 CV - Essieu arrière

Imprimer Exporter

Effets des multiples passages

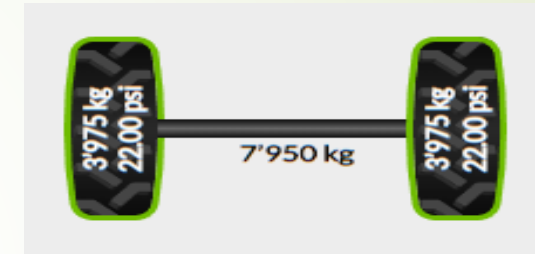
Épandeur monocoque Tracteur 130-180 CV

sol glaciale loameux fin des Appalaches/Laurentides - humide



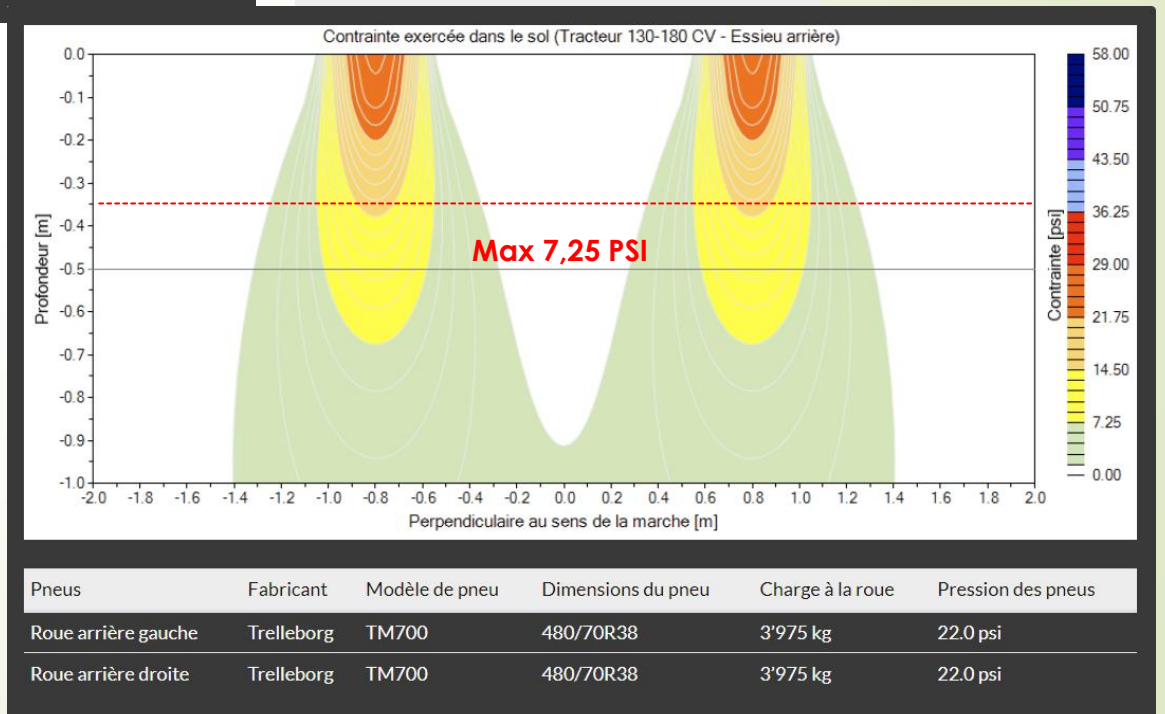
Tracteur, essieu avant:

Profil de contraintes dans le sol,
(21,3 psi en surface, 14,5 psi à 15 cm
et 3,5 psi à 50 cm)



Tracteur, essieu arrière:

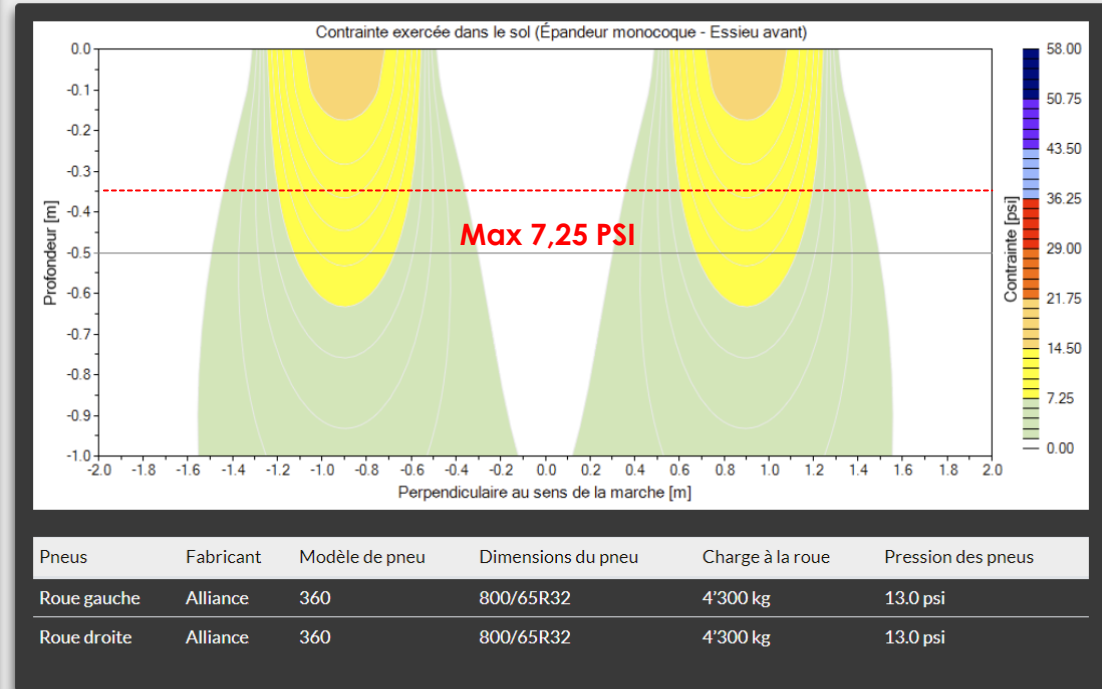
Profil de contraintes dans le sol,
contrainte excessive (26,7 psi en
surface, 22 psi à 18 cm et 11 psi à
50 cm).





Visualiser les résultats

- Diagramme de décision
- Profils de contrainte vs résistance du sol
- Contrainte à la surface du sol
- Contrainte dans le sol**
- Sélectionner l'essieu
Épandeur monoque - Essieu avant
- Imprimer
- Exporter
- Effets des multiples passages
Épandeur monoque Tracteur 130-180 CV
- 
sol glaciaire loameux fin des Appalaches/Laurentides - humide



Épandeur

Profil de contraintes dans le sol; élevée mais acceptable.
(15 psi à la surface, 14,5 psi à 16 cm et 9 psi à 50 cm).



Chargement de l'épandeur

Loader avec balance intégrée pour uniformiser les chargements et aider à la calibration de l'épandeur



Vidéo gracieuseté de Garage Wendel Mathis



RECHERCHE DE SOLUTIONS

SOLUTION #1; roues doubles de 19 po de large à l'essieu arrière du tracteur



Configurer les pneus/chenilles

Répartition de la charge par essieu gauche/droite: 50,50 %

Paramétrer les deux côtés: ☒

Tracteur 130-180 CV > Roue arrière gauche / Roue arrière droite >

Roue motrice > Trelleborg TM700 > 480/70R38 (145 A8) >

Pression des pneus: 13 psi

Pression des pneus recommandée (10 km/h): 10.8 psi

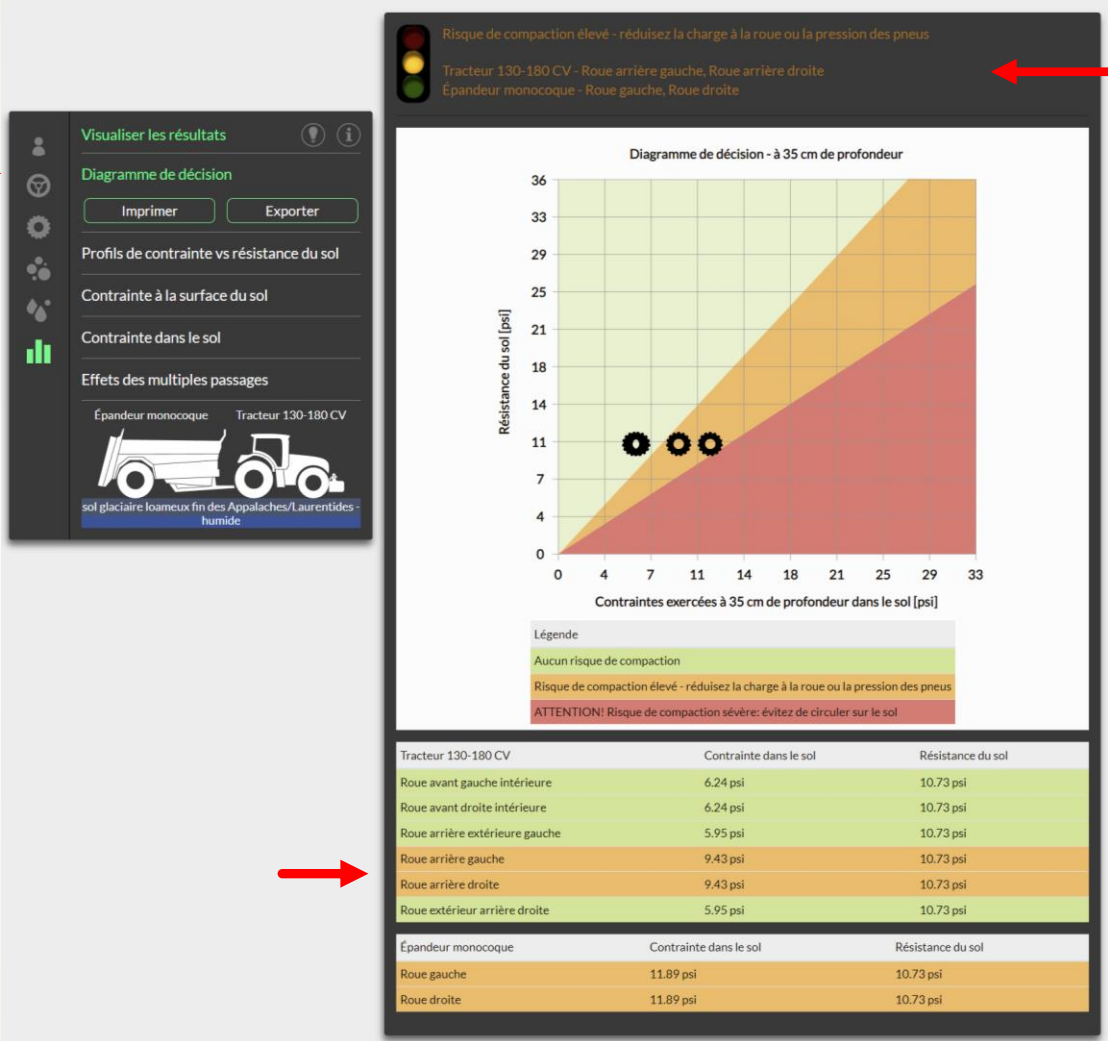
Pourcentage de charges sur roues multiples: 70,30 %

Machinerie actuelle: Tandem Deutz doubles1 - Tebbe

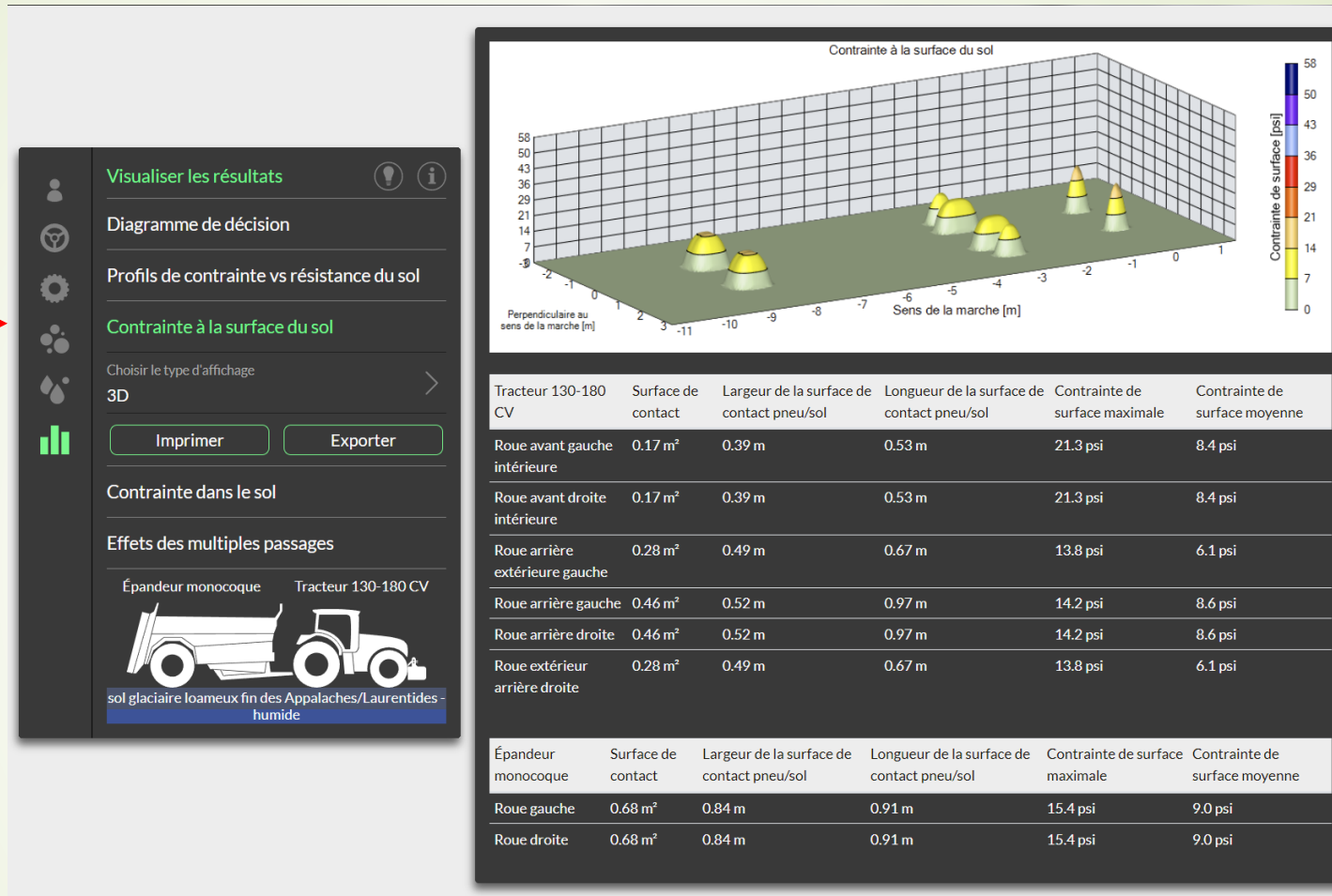
Épandeur monocoque Tracteur 130-180 CV (10 km/h)

Axe	Côté	Poids (kg)	Pression (psi)
Avant	Gauche	4'300	13.00
	Droite	4'300	13.00
Arrière	Gauche	2'785	13.00
	Droite	1'025	14.10

Résultats, diagramme de décision (charge 6 000 kg, pression d'appui 3 400 kg)



Contrainte dans le sol à 35 cm (≈ 14 po) de profondeur.
Roue doubles arrière du tracteur = amélioration vs roues simples. Contrainte dans le sol $<$ résistance du sol.



Contrainte maximale à la surface du sol

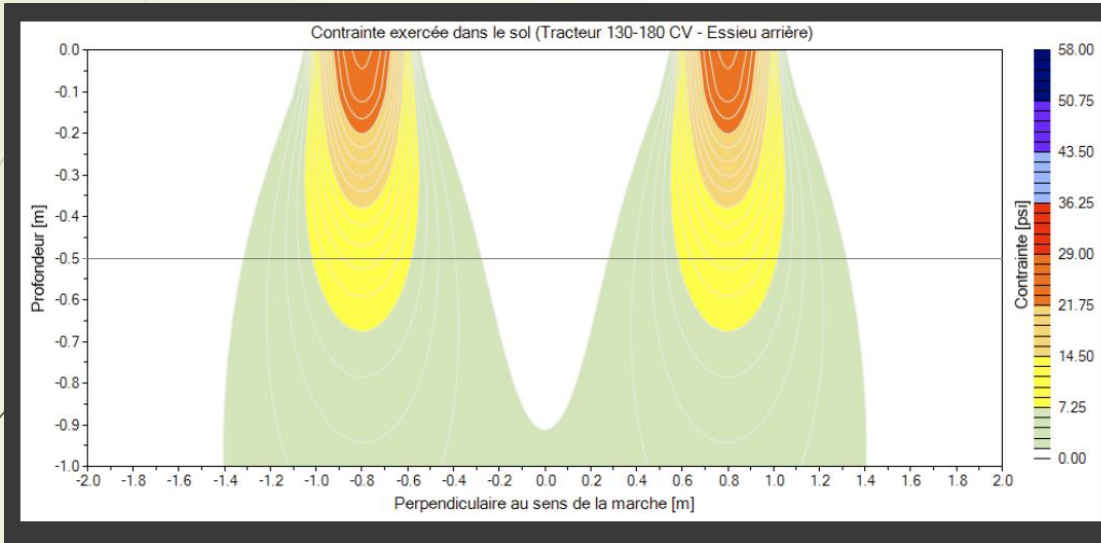
Représentation 3D de la contrainte à la surface du sol. Contrainte excessive éliminée. (Contrainte entre 13,8 psi et 14,2 psi aux roues arrière).



Tracteur, essieu arrière

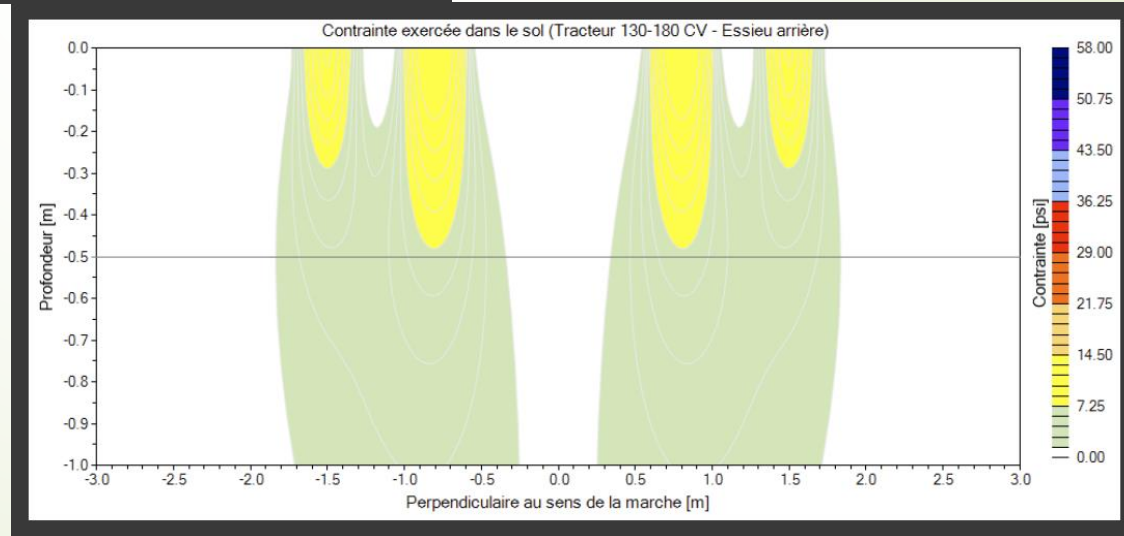
Profil de **contraintes dans le sol**. Grande amélioration → **charge à la roue < 3,5t**. Contraintes acceptables. (15 psi à la surface, 14,5 psi à 12 cm et **7 psi à 50 cm**).

Comparaison des Profils de contraintes dans le sol; roues simples et doubles de 19 po de large, essieu arrière tracteur

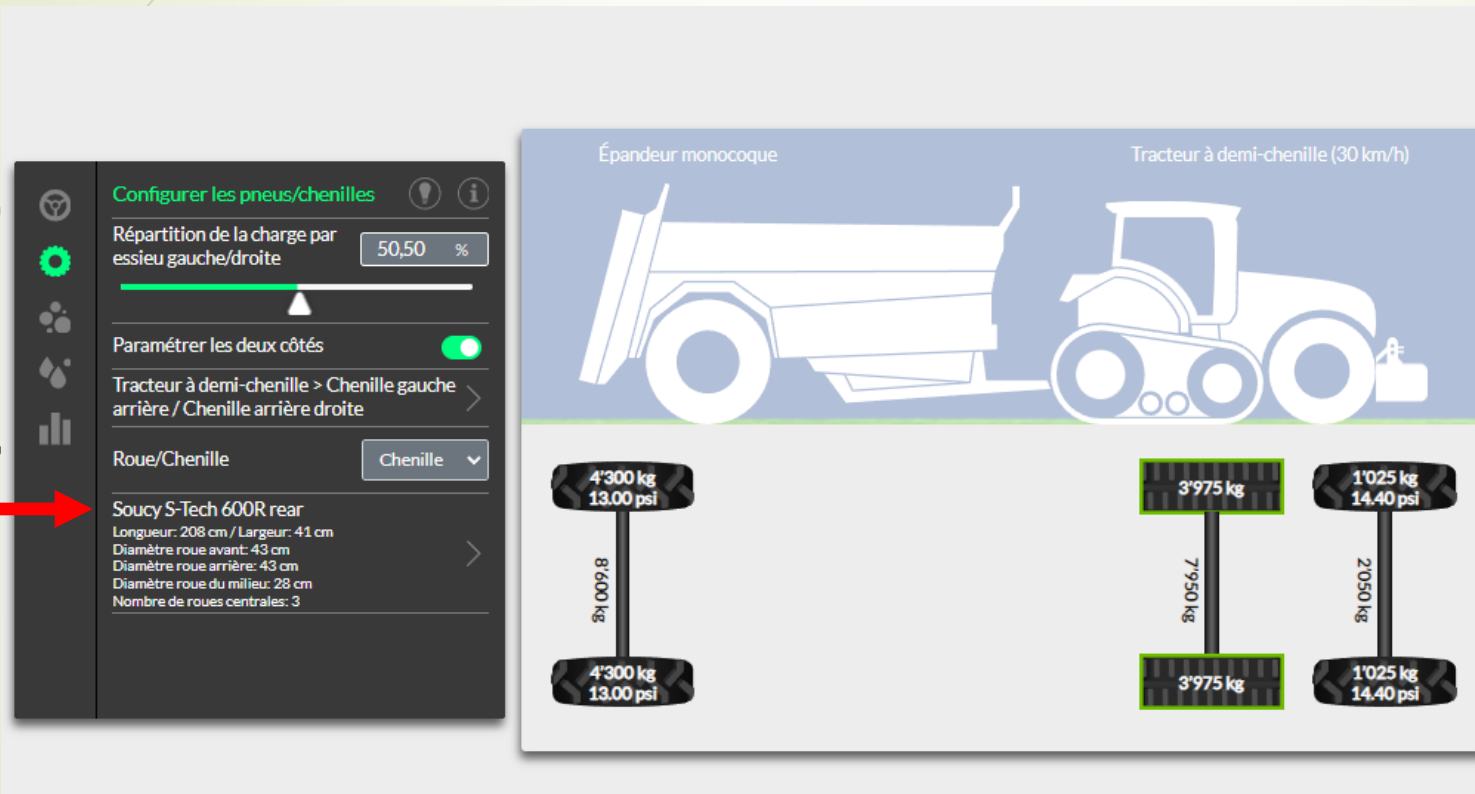


ROUES SIMPLES

ROUES DOUBLES



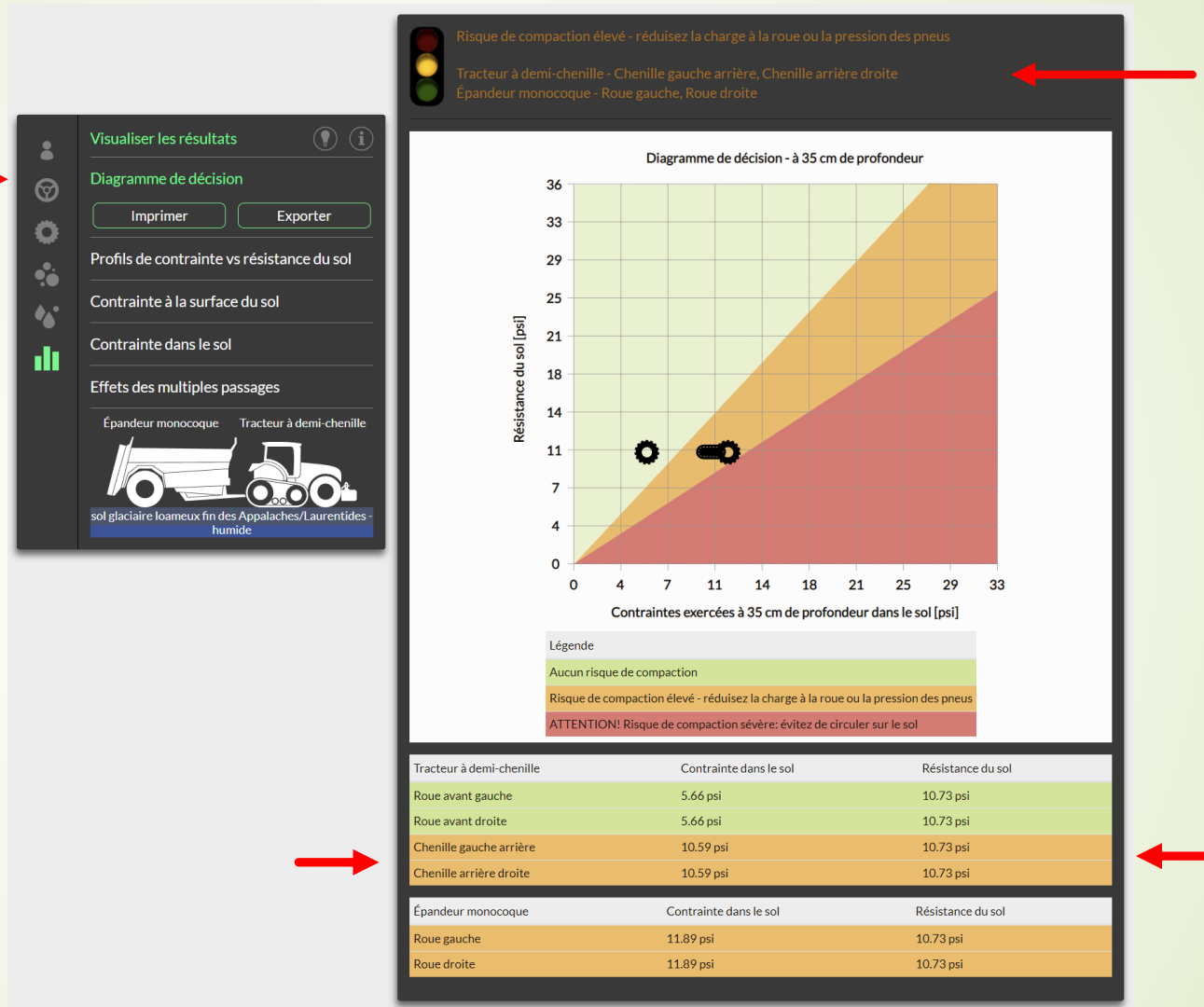
SOLUTION #2; chenilles triangulaires de 41 cm ou 16 po de large à l'essieu arrière du tracteur



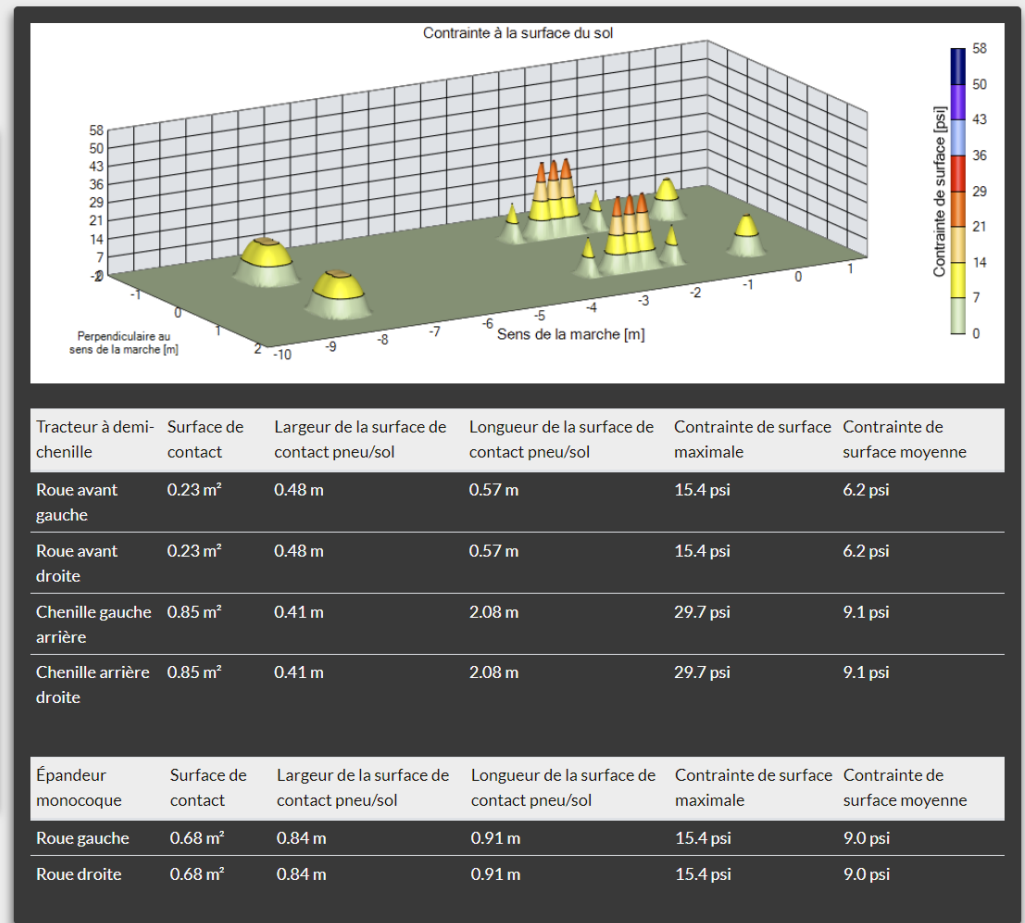
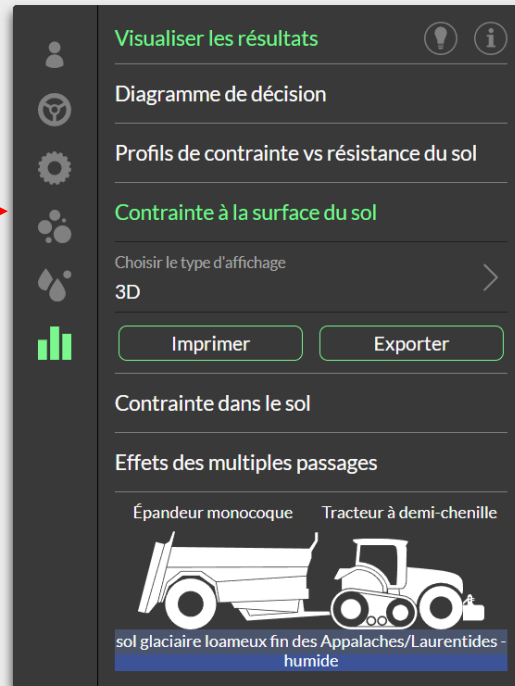
S-TECH 600R



Résultats, diagramme de décision (charge 6 000 kg, pression d'appui 3 400 kg)

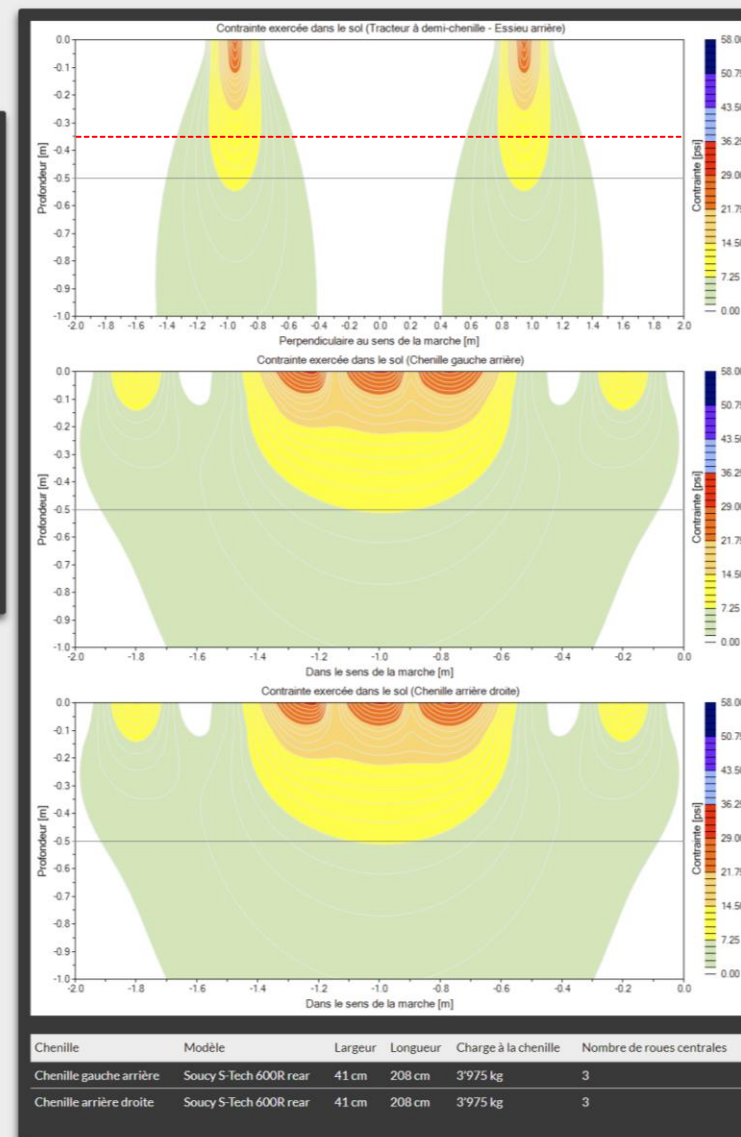
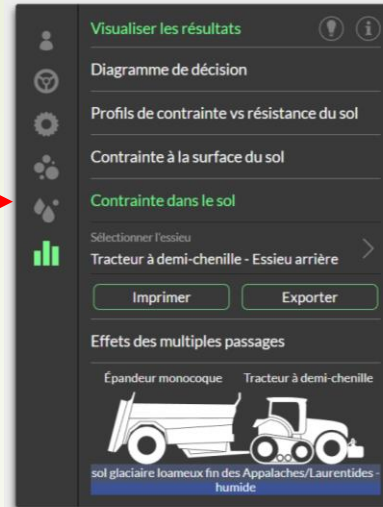


Contrainte dans le sol à 35 cm (≈ 14 po) de profondeur.
Chenilles arrière du tracteur = amélioration v/s roues simples; $\rightarrow$ compaction surface.
Contrainte dans le sol $\approx$ résistance du sol.



Contrainte maximale à la surface du sol

Représentation 3D de la contrainte à la surface du sol. Les zones en **rouge** = contrainte excessive (29,7 psi) → 3 roues de support centrales

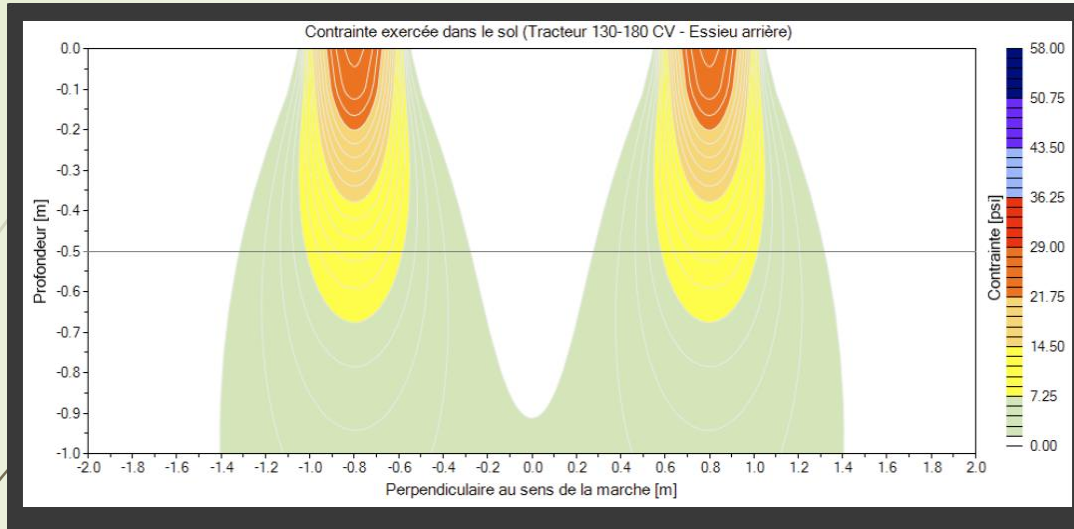


Vues de profil

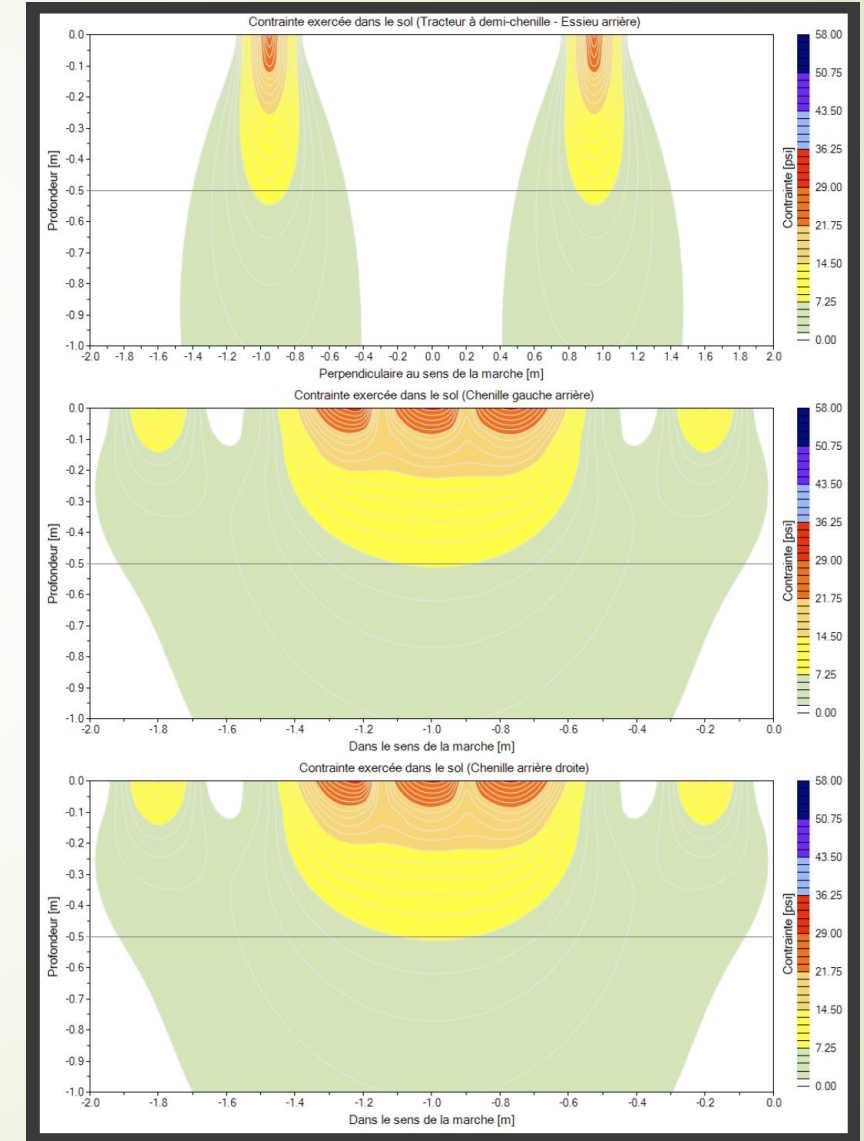
Tracteur, chenilles à l'essieu arrière

Profil de contraintes dans le sol. Zone critique sous les roues de support centrales. Compaction superficielle sévère. (29,7 psi à la surface, 22 psi à 10 cm et 7,5 psi à 50 cm).

Comparaison des Profils de contraintes dans le sol; roues simples 19 po et chenilles 16 po, essieu arrière tracteur



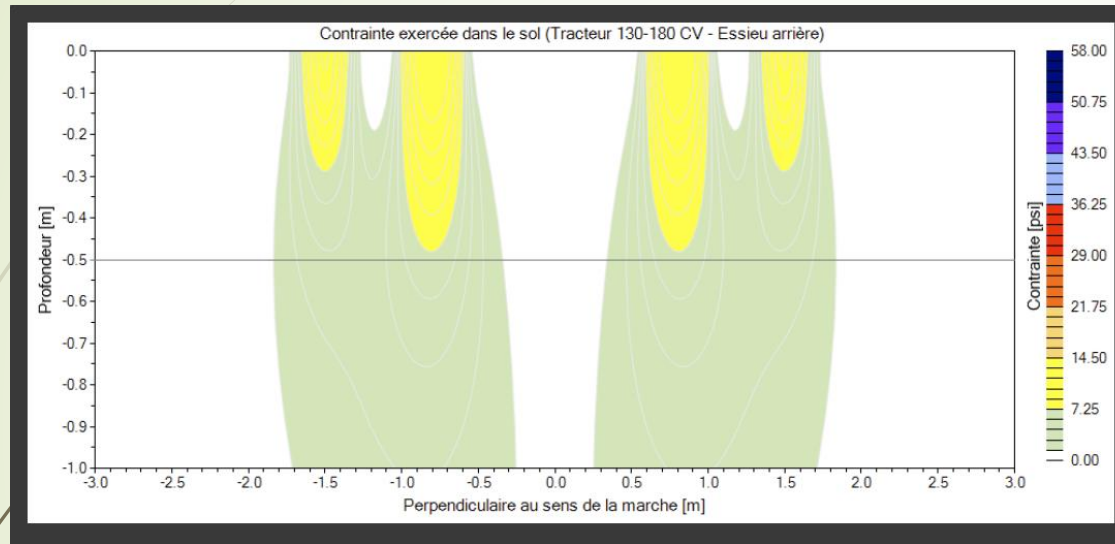
ROUES SIMPLES



CHENILLES

Les contraintes de surface maximales sont aussi élevées dans les 2 cas à 26,7 psi (roues simples) et 29,7 psi (chenilles).
Plus superficielles dans le cas des chenilles = semelle de compaction.

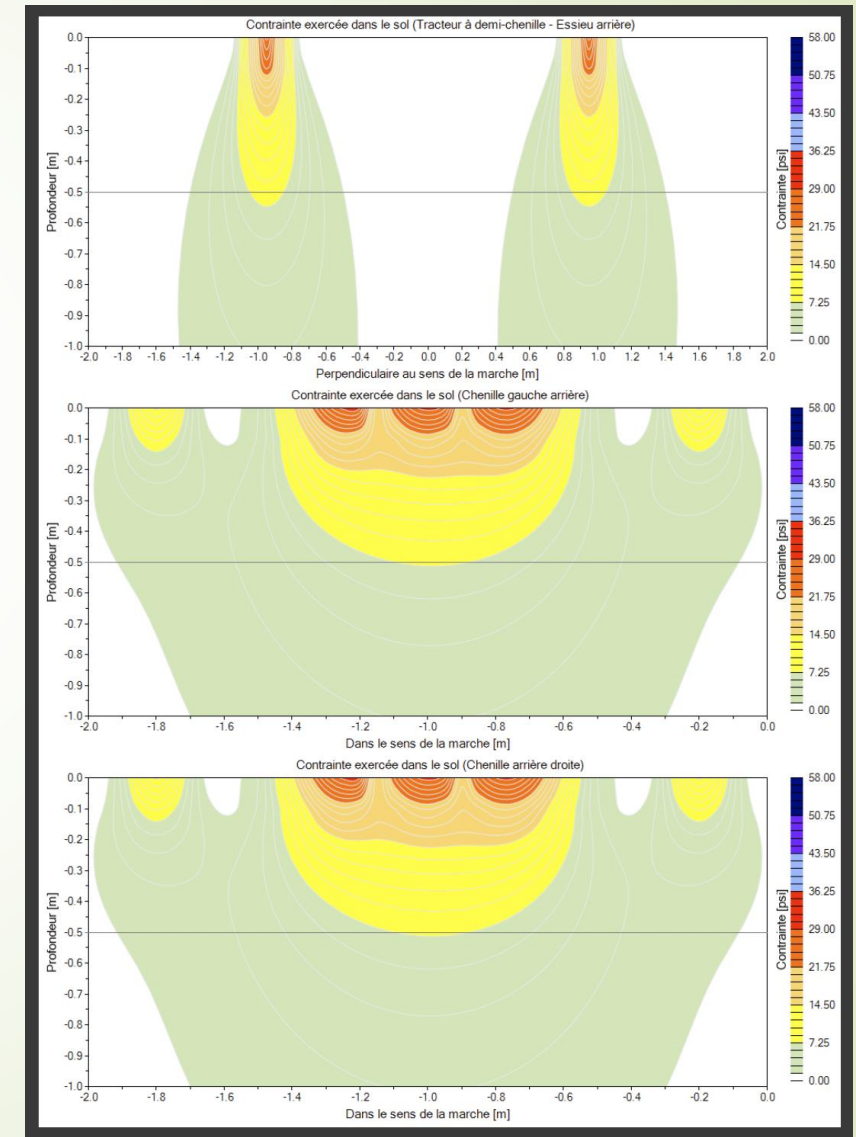
Comparaison des Profils de contraintes dans le sol; roues doubles 19 po et chenilles 16 po, essieu arrière tracteur



ROUES DOUBLES

CHENILLES

Les contraintes de surface maximales sont beaucoup plus élevées dans le cas des chenilles à 29,7 psi, contre 15 psi pour les roues doubles. Avantage aux roues doubles !!



Constatations

- Terranimo est un bon outil pour évaluer les risques de compaction
- Facile à utiliser; menus relativement simples, bien illustrés et assez intuitif dans son ensemble
- Bonne intégration des banques de données des manufacturiers de pneus, plus de 1000 modèles différents avec suggestions de pression à utiliser en fonction des charges
- Résultats présentés sous forme visuelle faciles à interpréter
- Terranimo est aussi très utile pour explorer des solutions potentielles, sans risques et à peu de frais !
- Garder à l'esprit que les résultats obtenus ne sont pas des valeurs absolues mais des estimations → comparaisons
- Attention à la précision lors de l'entrée de données, « garbage in – garbage out » !
- C'est presque impossible de ne pas causer un certain niveau de compaction dans le sol
- **Pour limiter la compaction:** charge à la roue < 3,5 t, contrainte à 50 cm ≤ 7,25 psi, pression des pneus → plus basse possible selon la charge et recommandations du mfg.
- À améliorer dans Terranimo: choix de niveaux d'humidité du sol, un peu restreint



MERCI POUR VOTRE INTÉRÊT !

QUESTIONS ?