

INDIGO version 2.0

Auteurs de la fiche : **C. Bockstaller, C. Rabolin**

Adresse : INRA 28 rue Herrlisheim, BP20507

68021 Colmar

Tel. 03.89.22.49.80

chantal.rabolin@colmar.inra.fr

Conception de la méthode : 1994-2008

Conception de l'outil informatique : 2004-2010

CONCEPTEUR :



Avec le soutien de :



FINANCEURS :

- Union européenne Programme Interreg I, II, III via programme ITADA (1994-2005) avec la participation de la Région Alsace, Land Bade-Würtemberg, l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse
- ONEMA (2010)

FINALITÉS

Outil destinés aux agronomes pour leur permettre d'évaluer les impacts sur l'environnement (eau, sol, air, ressources non-renouvelables, etc.) de systèmes de culture existant ou en cours de conception afin :

- d'identifier les points faibles et forts des systèmes
- repérer les pistes d'améliorations pour orienter le conseil
- sélectionner les systèmes de culture les plus performants, etc.

■ Domaine d'application

Domaine géographique : Paramétrage pour le Nord de la Loire (adaptation à la zone Sud ou Océanique possible)

Exploitations concernées :

- grandes cultures
- polyculture-élevage
- élevage (surface en prairies)

Outil disponible aussi pour la viticulture

■ Temps de réalisation

Pour une exploitation agricole (> 10 parcelles)

Collecte des données : ½ journée (données fixes) et ½ journée (données de l'année)

Saisie informatique : idem

Restitution et élaboration du plan d'action : ½ journée

■ Aspects informatiques

- Envoi d'un lien pour télécharger le fichier d'installation après signature d'une licence
- Configuration requise : Windows XP, Vista, 7, Office 2003, 2007 et 2010

■ Accès à l'outil

Licence gratuite pour des applications en R&D et enseignement

Licence payante pour application en prestation de service, (réponse à appels d'offre).

■ Points forts de l'outil

- **Sensibilité** des indicateurs aux **pratiques agricoles** à l'échelle de la parcelle (+ historique) permettant une analyse détaillée des pratiques (Ex : par application de substance active)
- Prise en compte du **milieu** dans l'évaluation des impacts
- **Transparence** des méthodes de construction des indicateurs,
- Evolution et paramétrage de l'outil possible.
- Calcul d'un indicateur isolé possible
- Exportations possible des résultats et figures (Radar, histogrammes) vers **Excel** pour une valorisation au libre choix de l'utilisateur.

■ Limites de l'outil

- Pas de prise en compte de thématique spécifique à l'élevage (bâtiment d'élevage, conduite du troupeau, etc.)
- Pas de prise en compte des processus hydrologiques au niveau bassin versant
- Quantités de données nécessaires en première année d'utilisation (climat, sol, historique, etc.) mais fonction des indicateurs calculés
- Les données requise ne sont pas (encore) en format normalisé

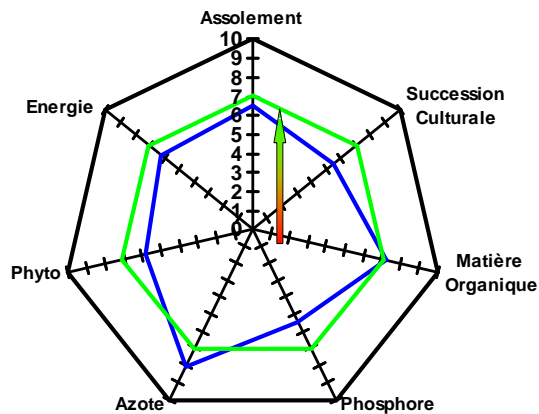
INDIGO version 2.0

■ Restitution

Exemples de restitution (les chiffres présentés dans les tableaux ci-dessous ne sont pas à prendre en compte. Ils permettent d'illustrer les différents formats de restitution déjà utilisés à partir des résultats obtenus par le logiciel)

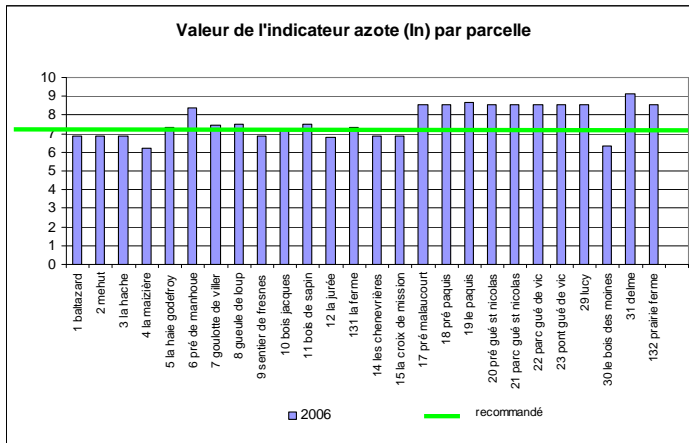
→ Sur fichiers Excls (Extrait du logiciel) :

Tableau de bord d'une exploitation agricole



— exploitation — recommandé — max

Résultats parcellaires (Ex: Indicateur azote IN)



Résultats détaillées (Ex : I-Phy par substance active)

N° Parcelle	Nom Matière Active	Dose matière active (g/ha)	Potentiel Lessivage	Potentiel Ruissellement	Potentiel Dérive	Risque Eaux Profondeur	Risque Eaux Surface	Risque Air	Risque Dose	Risque Global pour l'environnement (phyma)
7	S-métolachlore	1647	1	0	1	3,4	10,0	0,0	1,6	4,8
21	S-métolachlore	1647	0,5	0	1	5,1	10,0	0,0	1,6	2,1
7	carbofuran	600	1	0	1	1,0	10,0	0,0	3,6	2,5
22	carbofuran	600	0,5	0	1	3,3	10,0	0,0	3,6	3,1
1	carbofuran	600	1	0	0	1,0	10,0	10,0	3,6	3,7
3	S-métolachlore	1647	1	0	0	3,4	10,0	10,0	1,6	4,3
22	sulcotrione	150	0,5	0	1	7,1	10,0	0,0	6,7	5,1
12	sulcotrione	150	1	0	1	7,2	10,0	0,0	6,7	5,2
13	carbofuran	600	0,5	0	0	3,3	10,0	10,0	3,6	5,4
15	S-métolachlore	1647	0,5	0	0	5,1	10,0	10,0	1,6	5,9
7	cyperméthrine	75	1	0	1	10,0	8,3	0,0	8,0	6,2
11	sulcotrione	60	1	0	1	7,2	10,0	0,0	8,4	6,3
21	bénoxacor	81	0,5	0	1	10,0	9,9	0,0	7,9	6,5
22	nicosulfuron	20	0,5	0	1	5,8	10,0	1,5	9,8	6,6
4	nicosulfuron	20	1	0	0	3,9	10,0	10,0	9,8	6,0
18	sulcotrione	150	0,5	0	0	7,1	10,0	10,0	6,7	8,3

■ Validation

La validation de la construction de la plupart des indicateurs s'est faite par soumission à des experts et une publication scientifique.

Plusieurs indicateurs ont fait l'objet d'une validation des sorties par confrontation à des mesures de terrain (Azote, I-Phy, Energie)

■ Utilisation de l'outil

Importance de l'utilisation : près de 190 utilisations différentes (recensés depuis 2002) en France en août 2011 (cf.tableau),

Principales utilisations :

- Les indicateurs azote (IN) et phyto (I-Phy) ont fait l'objet de la majorité des applications

Utilisateurs de l'outil : en majorité techniciens de chambre d'Agriculture, étudiants, chercheurs INRA, ingénieurs d'Instituts techniques.

Utilisateurs	Nombre	%
Chambres Agriculture	38	20
Etudiants	30	16
INRA	27	14
Instituts techniques et équivalents (ARAA, Agro-Transferts)	21	11
Enseignement supérieur	19	10
Organisations professionnelles agricoles	14	7
Privés (Bureau étude, Coop, etc.)	11	6
Lycées Agricoles	10	5
Europe	6	3
Organismes recherche	6	3
Administrations	4	2
Agriculteurs et groupements	2	1
Institutions gestion de l'eau	2	1
Hors Europe	1	1
Total	191	100

INDIGO version 2.0

■ Description de la méthode

8 indicateurs synthétiques :

Assolement, succession culturale, matière organique, phosphore, azote, phyto (I-Phy), irrigation, énergie,

Les indicateurs sont exprimés sur une échelle de performance environnementale entre 0 (impact inacceptable) et 10 (impact faible voire nul) avec une valeur de référence à 7 correspondant à un minimum acceptable

Echelle

Temporelle : annuelle (azote), cycle cultural (les autres) avec 4 années de données pour les indicateurs *succession culturale* et *matière organique*
Spatiale : parcelle ou exploitation (assolement), calcul d'une moyenne pondérée au prorata de la surface des parcelles

Méthode d'agrégation : pas d'agrégation par le biais du logiciel

Méthode de calcul

Indicateur Assolement (I_{As})

Cet indicateur évalue l'impact de l'assolement sur la biodiversité et sur le paysage

L'assolement sera évalué par le facteur diversité des cultures et par la taille des parcelles. sachant qu'une diversité des cultures et une taille de parcelle raisonnable est favorable au maintien de la diversité biologique et à la préservation d'un paysage de qualité. Il ne sera pas tenu compte de la position respective des cultures et des parcelles entre elle, pour limiter le nombre de données nécessaire.

Le calcul est fait sur l'exploitation :

$$I_{As} = k \cdot NC \cdot D \cdot T$$

avec :

k : facteur de calibrage en facteur du nombre de culture (NC)

NC : nombre de cultures (quelque soit sa proportion dans l'assolement).

D : facteur de répartition des cultures

T : facteur taille de parcelle

Indicateur Succession Culturelle (I_{SC})

Cet indicateur évalue les successions culturales mises en œuvre par rapport aux principes de la Production Intégrée pour établir un diagnostic de la cohérence des systèmes de culture mis en place qui peut influencer sur le résultat des autres indicateurs.

Nous nous intéresserons aux effets de la culture précédente inclus sur la pression phytosanitaire (maladies, ravageurs, adventices), la structure du sol, sur la nutrition azotée pour la culture suivante, aux quels viennent s'ajouter le temps de retour de la culture et la diversité des cultures sur la succession. Si ces effets sont positifs ou si les effets négatifs sont limités par le choix d'une succession appropriée, la cohérence du système sera améliorée et permettra à l'agriculteur de mieux gérer son système de culture et notamment les intrants.

Calcul au niveau de la parcelle sur la succession des quatre dernières années.

$$I_{SC} = k_p \cdot k_r \cdot k_d$$

avec :

k_p : effet de la culture précédente (noté sur 6 points)

k_r : temps de retour de la culture (noté entre 0 et 1,2)

k_d : diversité des cultures (notée entre 1 et 1,4)

Rem : $I_{SC} = 10$ si $k_p \cdot k_r \cdot k_d > 10$

La valeur pour une rotation est la moyenne de chaque séquence de la rotation.

INDIGO version 2.0

■ Description de la méthode (suite)

Indicateur Matière Organique (I_{MO})

Cet indicateur évalue l'impact des pratiques culturales (succession, travail du sol, gestion des résidus, amendements organiques) sur la qualité chimique du sol, dans ce cas la teneur en humus.

Un grand nombre de propriétés des sols, physiques, chimiques et biologiques, qui entrent dans le concept global de fertilité des sols, sont liées à la teneur en matière organique (Boiffin et al., 1986). Cet indicateur estimera de manière indirecte l'impact des pratiques culturales sur la qualité physiques et biologiques des sols par le biais de la teneur en matière organique.

Calcul au niveau de chaque parcelle :

$$I_{MO} = 7 \cdot A_X / A_R$$

avec :

A_X : Apports pour les quatre dernières cultures moyens en humus (matière organique * 1,72) venant des résidus de culture et des apports organiques

A_R : Apports recommandés calculés à l'aide du modèle de Henin-Dupuis (Boiffin et al., 1986) pour maintenir le sol à long terme à une teneur d'équilibre qui soit satisfaisante (pour des conditions moyennes).

Les apports recommandés varient en fonction du taux d'argile et de calcaire du sol. Ils sont majorés de 25 % en cas d'irrigation (favorisant la minéralisation) et minorés en cas de diminution de la profondeur de labour et de simplification du travail du sol. Pour cela, le travail le plus profond et le plus perturbant sur 4 ans est pris en compte.

Indicateur Phosphore (I_P)

Cet indicateur évalue l'impact des pratiques de fertilisation phosphatée sur la qualité chimique du sol et sur l'économie des ressources non renouvelables dont fait parti le phosphore (Mengel, 1997). Le principe est que les apports doivent correspondre aux besoins pour éviter les gaspillages et l'enrichissement excessif ou à l'inverse un appauvrissement des sols. D'une manière indirecte l'indicateur prend en compte un risque pour les eaux de surface et de profondeur en mettant en évidence les situations d'excès d'apport en phosphore, auxquelles ces risques sont liés (Sharpley et al., 2000).

L'indicateur repose sur la comparaison des apports (minéraux et organiques) avec une dose recommandée calculée avec une nouvelle méthode de prescription REGIFERT développée par l'INRA (Pellerin et al., 2000 ; Colomb et al., 1999). Celle-ci est supposée prendre en compte la nécessité d'assurer une alimentation indispensable au bon développement de la culture, donc ne pas appauvrir le sol (cf. qualité chimique du sol) sans entraîner un enrichissement excessif des sols (cf économie de ressources renouvelables).

Calcul au niveau de chaque parcelle :

$$I_P = 10 - \text{Max}(P_{\text{sol}}, P_{\text{res}})/C$$

avec

C facteur de calibrage permettant une tolérance de ± 30 kg P₂O₅/ha pour $I_P=7$

P_{sol} : module sol

$P_{\text{sol}} = X_a - X_R$ si $X < X_R$ sinon $P_{\text{sol}} = 0$

X_a : dose P assimilable

X_R : dose recommandée avec méthode Regifert, Comifer

P_{res} : module ressource non renouvelable

$P_{\text{res}} = X - X_R$ si $X > X_R$ sinon $P_{\text{res}} = 0$

X : dose P totale

X_R : dose recommandée

Cette approche a été préférée à l'approche classique d'un bilan apports-exportations qui ne tient pas compte des besoins de la plante, ni de la teneur du sol, ni de l'immobilisation du phosphore par le sol. Le calcul d'une dose recommandée selon une méthode comme REGIFERT permet d'inclure ces paramètres et fournit une donnée intéressante pour le conseil agronomique qui sera basé sur l'indicateur.

INDIGO version 2.0

Description de la méthode (suite)

Indicateur Azote (I_N)

L'indicateur est construit à partir de trois modules qui reposent respectivement sur le calcul des pertes par lessivage NO_3 , des pertes par émissions de N_2O et des pertes par volatilisation de NH_3 .

Les pertes sont estimées chronologiquement à l'aide d'un modèle empirique basé sur le système de culture (itinéraire technique et interculture suivante), (Figures 1) : Ainsi la volatilisation est prise en compte en premier, ce phénomène se produisant rapidement dans les heures qui suivent l'apport (Terman, 1979). Le lessivage lié aux apports d'azote est un phénomène plus lent. Ce risque est lié au décalage entre l'apport et la phase d'absorption par la culture. L'étape suivante est l'estimation du risque de lessivage hivernal post-récolte dû à la gestion de l'interculture et à une éventuelle surfertilisation (Machet et al., 1997) à l'aide d'un bilan d'azote minérale entre la récolte et le début du drainage (entrée hiver). Ce bilan comprend une estimation des reliquats récoltes prenant en compte la surfertilisation éventuelle, la minéralisation de la matière organique et des résidus de récolte, ainsi que l'absorption d'azote par un éventuel couvert (culture hiver ou CIPAN) avant l'hiver). Il est pondéré par un coefficient de lessivage obtenu à l'aide de l'équation de Burns (Burns 1996) pour obtenir le lessivage .

Enfin faute d'informations suffisantes sur leur chronologie (Germon et al., 1999 ; Conen et al., 2000), les pertes de N_2O sont estimées par un coefficient d'émission rapport à la dose globale dont on a enlevé les pertes par volatilisation (Bouwman, 1996) et lessivage. Ce coefficient est majoré en cas de sol hydromorphe, d'absence de labour.

Calcul de I_N sur chaque parcelle:

$$I_N = \text{minimum} (I_{\text{NO}_3}, I_{\text{NH}_3}, I_{\text{N}_2\text{O}})$$

Avec :

I_{NO_3} , I_{NH_3} , $I_{\text{N}_2\text{O}}$: module évaluant les pertes d'azotes (en kg N/ha) sous forme NO_3 , NH_3 et N_2O et transformée sur une échelle entre 0 et 10 selon la Figure 2.

Indicateur azote (suite)

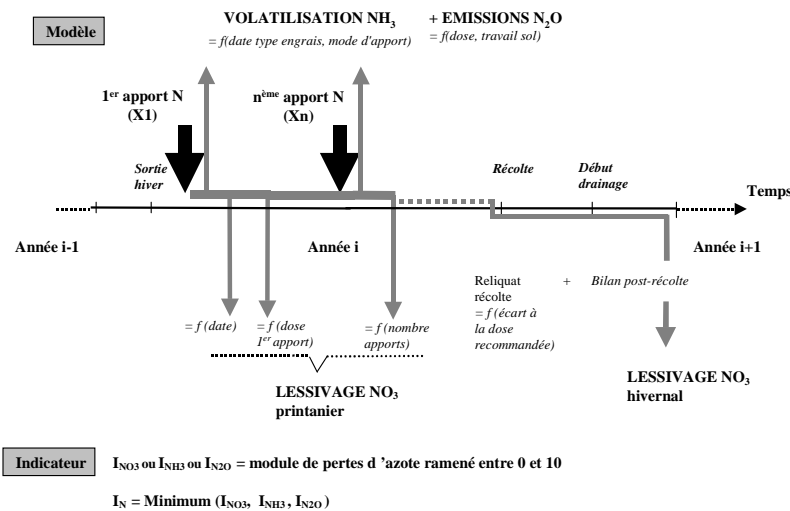


Figure 1- Présentation générale de la démarche de construction de l'indicateur azote. Entre parenthèse sont données les pratiques culturales prises en compte. Des caractéristique des sols et des données climatiques moyennes entrent aussi dans l'estimation des différents types de pertes d'azote.

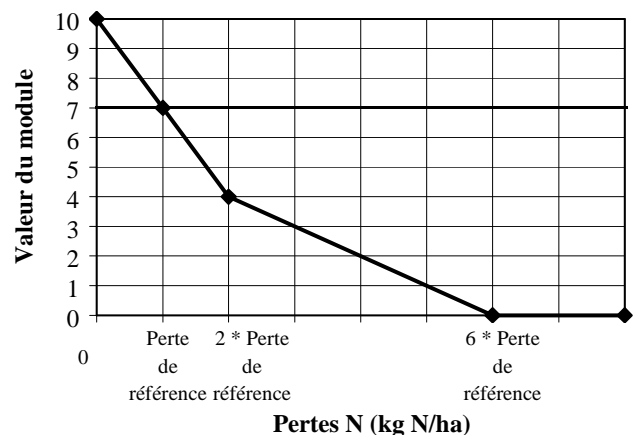


Figure 2- Calcul des modules I_{NO_3} , I_{NH_3} , $I_{\text{N}_2\text{O}}$ (lessivage de NO_3 , volatilisation de NH_3 et émission de N_2O) à partir de l'estimation des pertes d'azote (Figure 1).

Les pertes de références (Figure 2) correspondant à :
 I_{NO_3} , I_{NH_3} , $I_{\text{N}_2\text{O}}$: = 7 sont basées sur :
 - sur la norme de qualité de l'eau (50 mg NO_3 /l)
 - Pour la volatilisation, nous nous sommes appuyés sur des valeurs de seuil de retombées atmosphériques, au delà desquels, il existe des effets sur la qualité des sols (acidification) ou sur la composition floristique. A partir de la synthèse de Bobbink et al., 1996), on peut fixer ce seuil autour de 20 kg/ha (5-35 kg N/ha selon les effets).
 - pour les émissions de N_2O , les pertes de références ont été fixées à 3 kg N_2O -N/ha.

INDIGO version 2.0

Description de la méthode (suite)

Indicateur phytosanitaire (I-Phy)

Cet indicateur peut se calculer à différents niveaux (Figure 3) avec un niveau de base à la substance active.

Le devenir des substances actives dans l'environnement après traitement résultent de différents processus (van der Werf, 1996). Pour simplifier et faute de connaissance précise sur tous les processus, l'indicateur *I-Phy* se limite à **quatre types de risque** (note sur l'échelle d'INDIGO, 0 (risque nul) et 10 (risque maxi) :

- Un risque d'entraînement vers les **eaux souterraines** par lessivage, qui est aggravé si la substance active est toxique pour l'homme (de manière chronique). Cette toxicité est évaluée par la DJA (dose journalière admissible).
- Un risque d'entraînement vers les **eaux de surface** par ruissellement/érosion ou/et par dérive. Ce risque est aggravé si la substance active est toxique pour les organismes aquatiques (poisson, daphnies, algues) ou toxique pour l'homme, ceci pour tenir compte que dans certaines régions, les eaux de surface servent à l'approvisionnement en eau potable (Roussel et al., 2000).
- Un risque de propagation vers l'**air** par volatilisation qui est aggravé si la substance active est toxique pour l'homme (toxicité donnée par la DJA).
- Le dernier risque appelé **dose** est simplement lié à la quantité de substance active. Plus la dose est élevée, plus le risque pour l'environnement est élevé.

Les 3 modules de risque, eau souterraine, eau de surface et air sont calculés dans un premier temps indépendamment de la dose. Ils comprennent chacun des variables liées

- à la molécule (Ex: indice GUS résultant de la demi-vie et du coefficient d'adsorption KOC, Figure 4).
- au milieu (estimé sous forme de potentiel de lessivage, de ruissellement, de dérivation par le logiciel ou par expertise de terrain),
- aux traitements (couverture de sol lié à la date, incorporation, etc.).

Chaque module de risque est basé sur arbre de décision associant des sous-ensembles flous (Figure 4). Cette approche mathématique permet d'éviter les effets des changements brutaux de classes (ici « favorable » et « défavorable ») dans les règles de décision « si alors ».

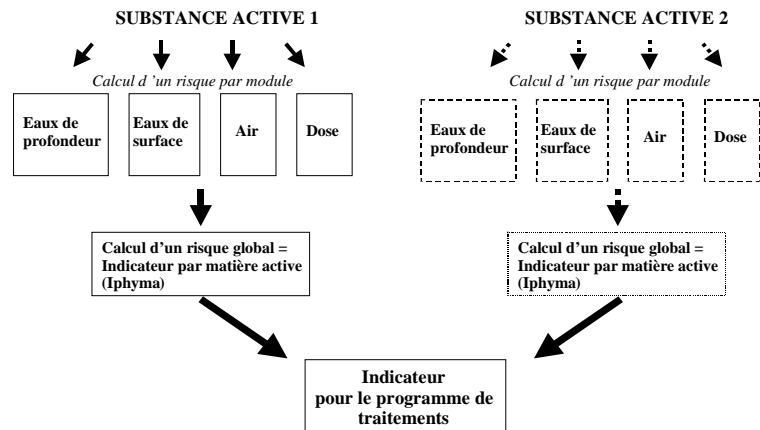


Figure 3- Les différentes étapes du calcul de l'indicateur.

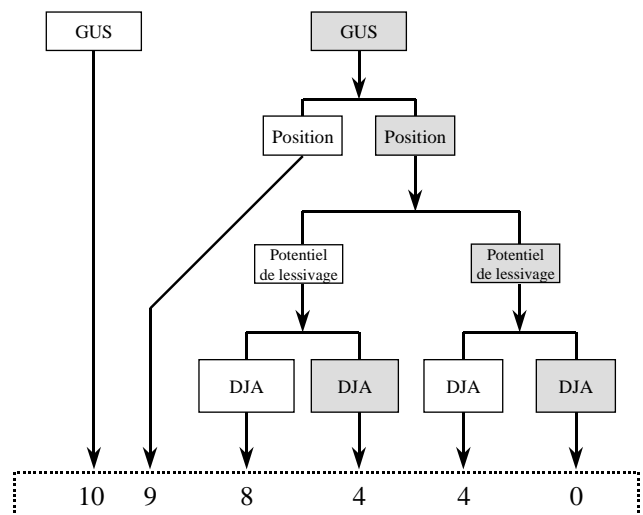


Figure 4- Règles de décision pour le module "eaux souterraines". Les cases en clair représentent les cas où la variable est favorable et les cases en sombre les cas où la variable est défavorable. Pour la signification des variables, voir texte.

Dans le cas des eaux souterraines, les propriétés de la molécules sont supposées jouer un rôle prépondérant comme pour l'air (constante de Henry). Pour les **eaux de surface**, il s'agit du **milieu** (estimé par le potentiel de ruissellement et de dérivation).

Les trois risques sont agrégés avec la dose avec la même méthode avec pour hypothèse:

- Une molécule à risque élevé pour un compartiment mais à faible dose (< 10 g/ha) prendra une valeur **au seuil d'acceptabilité de 7**.
- Une molécule à risque élevé pour un compartiment mais à faible dose (> 10 000 g/ha) prendra une valeur de **2**.

INDIGO version 2.0

■ Description de la méthode (suite)

Indicateur phytosanitaire (I-Phy), (suite)

Le risque global est estimé par programme de traitement est estimé de la manière suivante:

On part de la valeur minimale de l'indicateur par substance active et on enlève des points en fonction de la valeur de l'indicateur pour chaque substance active:

$$I\text{-Phy} = \text{Min}(I\text{physa}_i) - \sum k_i$$

avec :

Min (Iphysa_i) : valeur minimale l'indicateur par substance active du programme de traitement

$\sum k_i$: somme des pénalités en fonction des valeurs de l'indicateur par substance active des autres traitements (Ex: $k_i = 0$ si $I\text{physa}_i = 10$, $k_i = 0,07$ si $I\text{physa}_i = 7$, $k_i = 0,2$ si $I\text{physa}_i = 5$).

Indicateur irrigation (I_{irrig})

L'indicateur repose sur le calcul d'un bilan hydrique simplifié, calculé par décade depuis le 1^{er} janvier de l'année jusqu'à la dernière décade où une irrigation a été apportée selon la méthode proposée par (Jacquart et Choissnel, 1995).

L'indicateur est calculé de la manière suivante :

$$I_{\text{irrig}} = 10 - \text{Max}(D, E)/C$$

avec :

D: drainage suscité par l'irrigation à partir d'un calcul de bilan hydrique (cf. §5.1.)

E : excès d'irrigation par rapport aux rationnements. En fait, on a : $E \geq D$.

En l'absence de rationnement, on accepte une irrigation basée sur un équilibre du bilan hydrique (ou « irrigation à l'ETM », et dans ce cas $E = D$ voir calcul ci-dessous. Par contre en cas de rationnement, l'irrigation sera fondé non sur l'ETM mais sur $r * \text{ETM}$ ($r < 1$). Dans ce cas, il peut y avoir excès sans que cela conduise à un drainage.

C facteur calage pour obtenir la valeur minimale acceptable de 7.

Cet indicateur nécessite des données météo (pluies et ETP décadales).

Indicateur énergie (I_{En})

L'indicateur repose sur l'estimation de la consommation d'énergie résultant de la somme de quatre postes de consommation :

- **d'énergie directe** due au **machinisme** Ces consommations sont obtenues par une équation empirique intégrant, le type de machine, la vitesse d'avancement et la largeur de travail, une estimation du niveau d'entretien du matériel, la taille de la parcelle.
- **d'énergie directe** due à **l'irrigation**. Cette consommation est obtenue par une équation empirique intégrant, le type de matériel, la quantité d'eau, des données sur le forage.
- **d'énergie indirecte** entrant dans la production **d'engrais** et de **produits phytosanitaires** calculée à partir de coefficients énergétiques:

L'indicateur résulte de la transformation de l'énergie totale calculée en un indicateur entre 0 et 10 à l'aide d'une fonction polynomiale de calage, obtenue avec trois points de référence pour la culture du blé pour un système:

- Biologique (= 10)
- Intégré (=7)
- Conventionnel très intensif (=0)

■ Bibliographie sur l'outil

Bockstaller C., Gaillard G., Baumgartner D., Freiermuth Knuchel R., Reinsch M., Brauner R., Unterseher E., 2006. Méthodes d'évaluation agri-environnementale des exploitations agricoles : Comparaison des méthodes INDIGO, KUL/USL, REPRO et SALCA, Colmar, ITADA, p. 112.

Bockstaller C., Girardin P., 2008. Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO®, p. 115.

Bockstaller C., Girardin P., 2006. Evaluation agri-environnementale des systèmes de culture : la méthode INDIGO®. Oléoscope, n°85, 4-6.

Bockstaller C., Wohlfahrt J., Huber A., Hennebert P., Zahm F., Vernier F., Keichinger O., Girardin P., 2008. Les indicateurs de risque de transfert de produits phytosanitaires et leur validation: exemple de l'indicateur I-PHY. Ingénieries, n°86, 103-114.

Girardin P., Guichard L., Bockstaller C., 2005. Indicateurs et tableaux de bord. Guide pratique pour l'évaluation: Londres, Paris, New-York, Lavoisier, 39 p.

Pervanchon F., Thiolllet M., Amiaud B., Bockstaller C., Girardin P., Keichinger O., 2004. Un indicateur INDIGO® pour l'analyse énergétique des systèmes de production. Travaux et Innovations, n°105, 35-37.

Van Der Werf H. M. G., Zimmer C., 1999. Un indicateur d'impact environnemental de pesticides basé sur un système expert à logique floue. Courrier de l'environnement de l'INRA, n°34, 47-66.