

Patteinte = probabilité d'atteinte d'un point donné autour de l'éolienne (sachant que l'éolienne est orientée de manière à projeter un élément en direction de ce point et qu'elle est en rotation)

Présence = probabilité de présence d'un enjeu donné au point d'impact sachant que l'élément est projeté en ce point donné

Dans le cadre des études de dangers des éoliennes, une approche majorante assimilant la probabilité d'accident ($P_{accident}$) à la probabilité de l'événement redouté central (P_{ERC}) a été retenue.

VIII.1.5 NIVEAU DE RISQUE

Pour conclure sur l'acceptabilité du risque, la matrice de criticité ci-dessous, adaptée de la circulaire du 29 septembre 2005 reprise dans la circulaire du 10 mai 2010 mentionnée précédemment, sera utilisée.

La matrice de criticité est définie par le croisement de la probabilité et de la gravité.

Tableau 31 : Matrice de criticité (source : INERIS/SER/FEE, 2012)

Conséquence	Classe de Probabilité				
	E	D	C	B	A
Désastreux					
Catastrophique					
Important					
Sérieux					
Modéré					

Légende de la matrice :

Niveau de risque	Couleur	Acceptabilité
Risque très faible		acceptable
Risque faible		acceptable
Risque important		non acceptable

Ainsi, la criticité de l'événement, définie à partir d'une cotation du couple probabilité-gravité, définit 3 zones :

- **En vert** : une zone pour laquelle les risques peuvent être qualifiés de moindre et donc acceptable, et l'événement est jugé sans effet majeur et nécessite pas de mesures particulières
- **En jaune** : une zone de risques intermédiaires, pour laquelle les mesures de sécurité sont jugées suffisantes et la maîtrise des risques concernés doit être assurée et démontrée par l'exploitant (contrôles appropriés pour éviter tout écart dans le temps)
- **En rouge** : une zone de risques élevés, qualifiés de non acceptable pour laquelle des modifications substantielles doivent être définies afin de réduire le risque à un niveau acceptable ou intermédiaire, par la démonstration de la maîtrise de ce risque.

VIII.2 CARACTERISATION DES SCENARIOS RETENUS

Le parc de la plaine de Balusson est composé de 6 aérogénérateurs et de 3 postes de livraison. Chaque aérogénérateur a une hauteur de mât de 125 m maximum au sens de la réglementation ICPE, et un diamètre de rotor de 150 m maximum, soit une hauteur totale en bout de pale de 200 m maximum.

Pour rappel : le constructeur et le modèle précis d'éolienne qui sera installé sur le parc de la plaine de Balusson seront définis ultérieurement. La machine sera conforme aux dispositions de la norme NF EN 61400-1. À ce stade de développement, seul un gabarit de machine a été choisi, possédant une puissance maximale de 5,7 MW. La puissance totale du parc éolien sera donc de 34,2 MW au maximum.

Les dimensions utilisées dans cette étude sont donc des dimensions « maximisantes », définies à partir de modèles existants, mais qui ne correspondent pas à un modèle précis d'aérogénérateur.

VIII.2.1 EFFONDREMENT DE L'ÉOLIENNE

VIII.2.1.1 ZONE D'EFFET

La zone d'effet de l'effondrement d'une éolienne correspond à une surface circulaire de rayon égal à la hauteur totale de l'éolienne en bout de pale, soit **200 m au maximum** dans le cas des éoliennes du parc de la plaine de Balusson.

Cette méthodologie se rapproche de celles utilisées dans la bibliographie (références [5] et [6]). Les risques d'atteinte d'une personne ou d'un bien en dehors de cette zone d'effet sont négligeables et ils n'ont jamais été relevés dans l'accidentologie ou la littérature spécialisée.

VIII.2.1.2 INTENSITÉ

Pour le phénomène d'effondrement de l'éolienne, le degré d'exposition correspond au ratio entre la surface totale balayée par le rotor et la surface du mât non balayée par le rotor, d'une part, et la superficie de la zone d'effet du phénomène, d'autre part.

Le tableau ci-dessous permet d'évaluer l'intensité du phénomène d'effondrement de l'éolienne dans le cas du parc éolien de la plaine de Balusson.

Les données utilisées sont les suivantes :

- **R** = longueur de la pale = 75 m
- **H** = hauteur du mât = 125 m
- **L** = largeur du mât = 4,3 m
- **LB** = largeur de la base de la pale = 4,2 m

Tableau 32 : Intensité du scénario « Effondrement de l'éolienne »

Effondrement de l'éolienne (dans un rayon inférieur ou égal à la hauteur totale de l'éolienne en bout de pale : 200 m)			
Zone d'impact en m ²	Zone d'effet du phénomène étudié en m ²	Degré d'exposition du phénomène étudié en %	Intensité
$Z_i = (H \times L) + (3 \times R \times LB/2)$	$Z_e = \pi \times (H+R)^2$	$D = Z_i/Z_e$	Exposition modérée
La zone d'impact est de 1 010 m ²	La zone d'effet est de 125 664 m ²	Le degré d'exposition est de 0,80 % (<1%)	

L'intensité du phénomène d'effondrement est nulle au-delà de la zone d'effondrement.

VIII.2.1.3 GRAVITÉ

En fonction de cette intensité et des définitions issues de l'arrêté du 29 septembre 2005 (voir paragraphe VIII.1.3.), il est possible de définir les différentes classes de gravité pour le phénomène d'effondrement, dans le rayon inférieur ou égal à la hauteur totale de l'éolienne :

- Plus de 1000 personnes exposées → « Désastreux »
- Entre 100 et 1000 personnes exposées → « Catastrophique »
- Entre 10 et 100 personnes exposées → « Important »
- Au plus 10 personne exposée → « Sérieux »

- Présence humaine exposée inférieure à « une personne » → « Modéré »

Le tableau suivant récapitule, pour chaque aérogénérateur, le nombre de personnes exposées dans la zone d'effet du phénomène d'effondrement et la gravité associée :

Tableau 33 : Gravité du scénario « Effondrement de l'éolienne »

Effondrement de l'éolienne (dans un rayon inférieur ou égal à la hauteur totale de l'éolienne en bout de pale : 200 m)			
Eolienne	Nombre de personnes permanentes (ou équivalent personnes permanentes)	Total (personnes permanentes)	Gravité
E1	0,13 (terrains non aménagés)	0,14	Modéré
	0,01 (terrains aménagés peu fréquentés)		
E2	0,13 (terrains non aménagés)	0,16	Modéré
	0,03 (terrains aménagés peu fréquentés)		
E3	0,13 (terrains non aménagés)	0,67	Modéré
	0,03 (terrains aménagés peu fréquentés)		
	0,51 (chemins et voies piétonnes)		
E4	0,13 (terrains non aménagés)	0,13	Modéré
E5	0,13 (terrains non aménagés)	0,14	Modéré
	0,01 (terrains aménagés peu fréquentés)		
E6	0,13 (terrains non aménagés)	0,15	Modéré
	0,02 (terrains aménagés peu fréquentés)		

Pour rappel, la méthode de comptage des enjeux humains dans chaque secteur ainsi que la méthode de calcul est présentée en Annexe 1. Elle se base sur la fiche n°1 de la circulaire du 10 mai 2010 relative aux règles méthodologiques applicables aux études de dangers.

VIII.2.1.4 PROBABILITE

Pour l'effondrement d'une éolienne, les valeurs retenues dans la littérature sont détaillées dans le tableau suivant :

Tableau 34 : Valeurs de la littérature pour la probabilité d'effondrement d'une éolienne

Source	Fréquence	Justification
Guide de zonage des éoliennes basé sur les risques [5]	$4,47 \times 10^{-4}$	Retour d'expérience
Spécification des distances minimales [6]	$1,8 \times 10^{-4}$ (effondrement de la nacelle et de la tour)	Retour d'expérience

Ces valeurs correspondent à une classe de probabilité « C » selon l'arrêté du 29 septembre 2005.

A fin 2011, le retour d'expérience français montre une classe de probabilité « C ». En effet, il a été recensé seulement 7 événements pour 15 667 années d'expérience¹, soit une probabilité de $4,47 \times 10^{-4}$ par éolienne et par an.

Ces événements correspondent également à la définition qualitative de l'arrêté du 29 septembre 2005 d'une probabilité « C », à savoir : « *Événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité* ».

Néanmoins, les dispositions constructives des éoliennes ayant fortement évolué, le niveau de fiabilité est aujourd'hui bien meilleur. Des mesures de maîtrise des risques supplémentaires ont été mises en place sur les

¹ Une année d'expérience correspond à une éolienne observée pendant une année. Ainsi, si on a observé une éolienne pendant 5 ans et une autre pendant 7 ans, on aura au total 12 années d'expérience.

machines récentes et permettent de réduire significativement la probabilité d'effondrement. Ces mesures de mesures de sécurité sont notamment :

- Respect intégral des dispositions de la norme IEC 61 400-1
- Contrôles réguliers des fondations et des différentes pièces d'assemblages
- Système de détection des survitesses et un système redondant de freinage
- Système de détection des vents forts et un système redondant de freinage et de mise en sécurité des installations – un système adapté est installé en cas de risque cyclonique
- Système de batterie avec mise à l'arrêt et mise en sécurité.

A fin 2019, il a été recensé 4 effondrements pour des éoliennes de technologie récente (installation à partir de 2002 et puissance supérieure à 0,8 MW). Cela correspond à 4 effondrements pour 60 000 années d'expérience, soit une probabilité de $6,7 \times 10^{-5}$ par éolienne et par an soit une probabilité 7 fois plus faibles que le calcul de fin 2011.

Ces valeurs mises à jour correspondent à une classe de probabilité « D » selon l'arrêté du 29 septembre 2005.

De manière générale, le respect des prescriptions de l'arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations éoliennes soumises à autorisation permet de s'assurer que les éoliennes font l'objet de mesures réduisant significativement la probabilité d'effondrement.

Aucun effondrement n'est recensé au niveau national pour des éoliennes mises en service après 2011.

Ces événements correspondent également à la définition qualitative de l'arrêté du 29 septembre 2005 d'une probabilité « D », à savoir : « *S'est déjà produit mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement la probabilité* ».

Une probabilité de classe « D » est donc retenue par défaut pour ce type d'événement.

Il est considéré que la classe de probabilité de l'accident est « D », à savoir : « S'est produit mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement la probabilité ».

VIII.2.1.5 ACCEPTABILITE

Le tableau suivant rappelle, pour chaque aérogénérateur du parc de la plaine de Balusson, la gravité associée et le niveau de risque (acceptable/inacceptable) :

Tableau 35 : Acceptabilité du scénario « Effondrement de l'éolienne »

Effondrement de l'éolienne (dans un rayon inférieur ou égal à la hauteur totale de l'éolienne en bout de pale : 200 m)		
Eolienne	Gravité	Niveau de risque
E1	Modéré	Acceptable
E2	Modéré	Acceptable
E3	Modéré	Acceptable
E4	Modéré	Acceptable
E5	Modéré	Acceptable
E6	Modéré	Acceptable

Ainsi, pour le parc éolien de la plaine de Balusson, le phénomène d'effondrement des éoliennes constitue un risque acceptable pour les personnes.



VIII.2.2 CHUTE DE GLACE

VIII.2.2.1 CONSIDERATIONS GENERALES

Les périodes de gel et l'humidité de l'air peuvent entraîner, dans des conditions de température et d'humidité de l'air bien particulières, une formation de givre ou de glace sur l'éolienne, ce qui induit des risques potentiels de chute de glace.

Selon l'étude WECO [15], une grande partie du territoire français (hors zones de montagne) est concerné par moins d'un jour de formation de glace par an. Certains secteurs du territoire comme les zones côtières affichent des moyennes variant entre 2 et 7 jours de formation de glace par an.

Lors des périodes de dégel qui suivent les périodes de grand froid, des chutes de glace peuvent se produire depuis la structure de l'éolienne (nacelle, pales). Normalement, le givre qui se forme en fine pellicule sur les pales de l'éolienne fond avec le soleil. En cas de vents forts, des morceaux de glace peuvent se détacher. Ils se désagrègent généralement avant d'arriver au sol. Ce type de chute de glace est similaire à ce qu'on observe sur d'autres bâtiments et infrastructures.

La température annuelle moyenne dans le secteur de la plaine de Balusson est de 12,5°C. On compte 40 à 60 jours de gel en moyenne par an dans le département des Deux-Sèvres (79).

VIII.2.2.2 ZONE D'EFFET

Le risque de chute de glace est cantonné à la zone de survol des pales, soit un disque de rayon égal à un demi-diamètre de rotor autour du mât de l'éolienne. Pour le parc éolien de la plaine de Balusson, **la zone d'effet a donc un rayon de 75 mètres.**

Cependant, il convient de noter que, lorsque l'éolienne est à l'arrêt, les pales n'occupent qu'une faible partie de cette zone.

VIII.2.2.3 INTENSITE

Pour le phénomène de chute de glace, le degré d'exposition correspond au ratio entre la surface d'un morceau de glace et la superficie de la zone d'effet du phénomène (zone de survol).

Le tableau ci-dessous permet d'évaluer l'intensité du phénomène de chute de glace dans le cas du parc éolien de la plaine de Balusson avec :

- Z_I = la zone d'impact
- Z_E = la zone d'effet
- R = la longueur de pale ($R = 75$ m)
- SG = est la surface du morceau de glace majorant ($SG = 1$ m²).

Tableau 36: Intensité du scénario « Chute de glace »

Chute de glace			
(dans un rayon inférieur ou égal à un demi-diamètre de rotor en bout de pale : $D/2 = 75$ m)			
Zone d'impact en m ²	Zone d'effet du phénomène étudié en m ²	Degré d'exposition du phénomène étudié en %	Intensité
$Z_I = SG$ La zone d'impact est de 1 m ²	$Z_E = \pi \times R^2$ La zone d'effet est de 17 671 m ²	$d = Z_I / Z_E$ $d = 0,006$ % (< 1 %)	Exposition modérée

L'intensité est nulle hors de la zone de survol.

VIII.2.2.4 GRAVITE

En fonction de cette intensité et des définitions issues de l'arrêté du 29 septembre 2005 (voir paragraphe VIII.1.3.), il est possible de définir les différentes classes de gravité pour le phénomène de chute de glace, dans la zone de survol de l'éolienne :

- Plus de 1000 personnes exposées → « Désastreux »
- Entre 100 et 1000 personnes exposées → « Catastrophique »
- Entre 10 et 100 personnes exposées → « Important »
- Moins de 10 personnes exposées → « Sérieux »
- Présence humaine exposée inférieure à « une personne » → « Modéré »

Le tableau suivant indique, pour chaque aérogénérateur, le nombre de personnes exposées dans la zone d'effet du phénomène de chute de glace et la gravité associée :

Tableau 37: Gravité du scénario « Chute de glace »

Chute de glace			
(dans un rayon inférieur ou égal à un demi-diamètre de rotor en bout de pale : $D/2 = 75$ m)			
Eolienne	Nombre de personnes permanentes (ou équivalent personnes permanentes)	Total (personnes permanentes)	Gravité
E1	0,02 (terrains non aménagés)	0,02	Modéré
E2	0,02 (terrains non aménagés)	0,02	Modéré
E3	0,02 (terrains non aménagés)	0,02	Modéré
E4	0,02 (terrains non aménagés)	0,02	Modéré
E5	0,02 (terrains non aménagés)	0,02	Modéré
E6	0,02 (terrains non aménagés)	0,02	Modéré

VIII.2.2.5 PROBABILITE

Le projet européen Wind Energy production in COld climates (WECO)², piloté par l'institut météorologique de Finlande, a établi une carte européenne des zones les plus exposées au givre. Il apparaît que le secteur concerné ne présente qu'un risque occasionnel. Cependant la conjonction observée des jours de gel et d'humidité à la station proche de Niort indique un risque.

De façon conservatoire, il est considéré que pour chaque jour où les conditions sont réunies pour la formation de glace sur un aérogénérateur, une chute de morceau de glace est possible. Cette hypothèse est simplificatrice dans la mesure où lors de ce type d'épisode, le cas de plusieurs chutes de glace et d'aucune chute de glace peut se présenter.

Il est considéré que la probabilité est de classe « A », c'est-à-dire une probabilité supérieure à 10⁻².

VIII.2.2.6 ACCEPTABILITE

Le tableau suivant rappelle, pour chaque aérogénérateur du parc de la plaine de Balusson, la gravité associée et le niveau de risque (acceptable/inacceptable) :

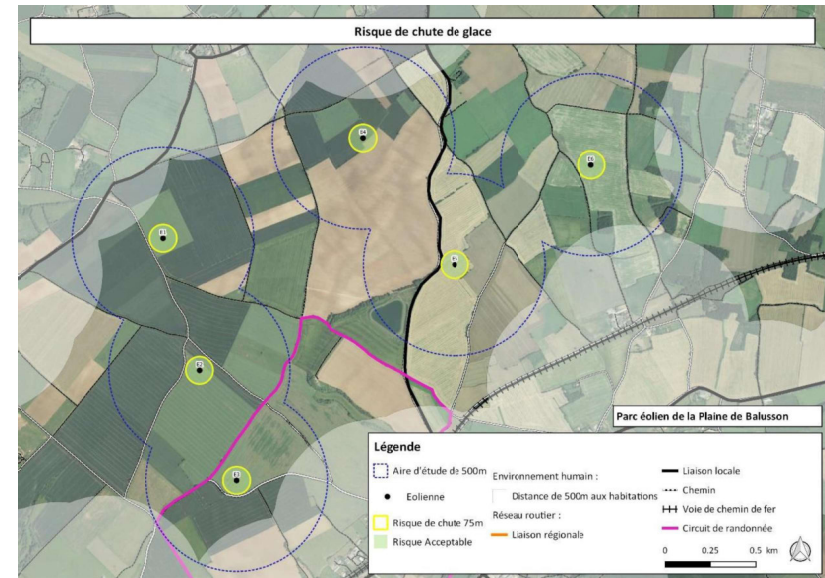
Tableau 38 : Acceptabilité du scénario « Chute de glace »

Chute de glace (dans un rayon inférieur ou égal à un demi-diamètre de rotor en bout de pale : D/2 = 75 m)		
Eolienne	Gravité	Niveau de risque
E1	Modéré	Acceptable
E2	Modéré	Acceptable
E3	Modéré	Acceptable
E4	Modéré	Acceptable
E5	Modéré	Acceptable
E6	Modéré	Acceptable

Ainsi, pour le parc éolien de la plaine de Balusson, le phénomène de chute de glace des éoliennes constitue un risque acceptable pour les personnes.

Il convient également de rappeler que, conformément à l'article 14 de l'arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations éoliennes soumises à autorisation, un panneau informant le public des risques (et notamment des risques de chute de glace) sera installé sur le chemin d'accès de chaque aérogénérateur, c'est-à-dire en amont de la zone d'effet de ce phénomène. Cette mesure permettra de réduire les risques pour les personnes potentiellement présentes sur le site lors des épisodes de grand froid.

² Source : Finnish meteorological institute



VIII.2.3 CHUTE D'ÉLÉMENTS DE L'ÉOLIENNE

VIII.2.3.1 ZONE D'EFFET

La chute d'éléments comprend la chute de tous les équipements situés en hauteur : trappes, boulons, morceaux de pales ou pales entières. Le cas majorant est ici le cas de la chute de pale entière. Il est retenu dans l'étude détaillée des risques pour représenter toutes les chutes d'éléments.

Le risque de chute d'élément est cantonné à la zone de survol des pales, c'est-à-dire une zone d'effet correspondant à un disque de rayon égal à un demi-diamètre de rotor autour du mât de l'éolienne en projection verticale. Pour le parc éolien de la plaine de Balusson, la zone d'effet a donc un rayon de 75 mètres.

VIII.2.3.2 INTENSITE

Pour le phénomène de chute d'éléments, le degré d'exposition correspond au ratio entre la surface d'un élément (cas majorant d'une pale entière se détachant de l'éolienne) et la superficie de la zone d'effet du phénomène (zone de survol).

Le tableau ci-dessous permet d'évaluer l'intensité du phénomène de chute d'éléments de l'éolienne dans le cas du parc éolien de la plaine de Balusson avec :

- d = le degré d'exposition
- Z_i = la zone d'impact
- Z_e = la zone d'effet
- R = la longueur de la pale (R= 75 m)
- LB la largeur de la base de la pale (LB= 4,2 m)

Tableau 39 : Intensité du scénario « Chute d'éléments »

Chute d'éléments de l'éolienne (dans un rayon inférieur ou égal à un demi-diamètre de rotor en bout de pale : D/2 = 75 m)
--

Zone d'impact en m ²	Zone d'effet du phénomène étudié en m ²	Degré d'exposition du phénomène étudié en %	Intensité
$Z_i = R * LB / 2$ La zone d'impact est de 158 m ²	$Z_e = \pi * R^2$ La zone d'effet est de 17 671 m ²	$d = Z_i / Z_e$ $d = 0,89 \% (< 1 \%)$	Exposition modérée

L'intensité en dehors de la zone de survol est nulle.

VIII.2.3.3 GRAVITE

En fonction de cette intensité et des définitions issues de l'arrêté du 29 septembre 2005 (voir paragraphe VIII.1.3.), il est possible de définir les différentes classes de gravité pour le phénomène de chute d'élément de l'éolienne, dans la zone de survol de l'éolienne :

- Plus de 1000 personnes exposées → « Désastreux »
- Entre 100 et 1000 personnes exposées → « Catastrophique »
- Entre 10 et 100 personnes exposées → « Important »
- Moins de 10 personnes exposées → « Sérieux »
- Présence humaine exposée inférieure à « une personne » → « Modéré »

Le tableau suivant indique, pour chaque aérogénérateur, le nombre de personnes exposées dans la zone d'effet du phénomène de chute de glace et la gravité associée :

Tableau 40 : Gravité du scénario « Chute d'élément »

Chute d'élément d'une éolienne (dans un rayon inférieur ou égal à un demi-diamètre de rotor en bout de pale : D/2 = 75 m)			
Eolienne	Nombre de personnes permanentes (ou équivalent personnes permanentes)	Total (personnes permanentes)	Gravité
E1	0,02 (terrains non aménagés)	0,02	Modéré
E2	0,02 (terrains non aménagés)	0,02	Modéré
E3	0,02 (terrains non aménagés)	0,02	Modéré
E4	0,02 (terrains non aménagés)	0,02	Modéré
E5	0,02 (terrains non aménagés)	0,02	Modéré
E6	0,02 (terrains non aménagés)	0,02	Modéré

VIII.2.3.4 PROBABILITE

Peu d'éléments sont disponibles dans la littérature pour évaluer la fréquence des événements de chute d'éléments d'éoliennes.

A fin 2011, le retour d'expérience connu en France montre que ces événements ont une classe de probabilité « C ». En effet, 2 chutes et 5 incendies pour 15 667 années d'expérience, soit $4,47 \times 10^{-4}$ événement par éolienne et par an.

A fin 2019, il a été recensé 5 chutes et 18 incendies pour des éoliennes de technologie récente (installation à partir de 2002 et puissance supérieure à 0,8 MW). Cela correspond à 23 incidents de ce type pour 60 000 années d'expérience, soit une probabilité de $3,8 \times 10^{-4}$ par éolienne soit un niveau équivalent à celui de 2011.

Ces événements correspondent également à la définition qualitative de l'arrêté du 29 Septembre 2005 d'une probabilité « C » : « Événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité ».

Une probabilité de classe « C » est donc retenue par défaut pour ce type d'événement.

VIII.2.3.5 ACCEPTABILITE

Le tableau suivant rappelle, pour chaque aérogénérateur du parc de la plaine de Balusson, la gravité associée et le niveau de risque (acceptable/inacceptable) :

Tableau 41 : Acceptabilité du scénario « Chute d'élément »

Chute d'élément d'une éolienne (dans un rayon inférieur ou égal à un demi-diamètre de rotor en bout de pale : D/2 = 75 m)		
Eolienne	Gravité	Niveau de risque
E1	Modéré	Acceptable
E2	Modéré	Acceptable
E3	Modéré	Acceptable
E4	Modéré	Acceptable
E5	Modéré	Acceptable
E6	Modéré	Acceptable

Ainsi, pour le parc éolien de la plaine de Balusson, le phénomène de chute d'éléments de l'éolienne constitue un risque acceptable pour les personnes.

